

Klimamodellauswertung Sachsen-Anhalt 1961–2100

Erarbeitung der klimatologischen
Grundlagen und Durchführung einer
Klimamodellanalyse für Sachsen-Anhalt



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 eine/des Fotos^{****} von XY

1. Auflage

Juni 2021

Zitiervorschlag: Ulrich, Max (2021): 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)

Zusammenfassung

Dieser Endbericht beinhaltet die Ergebnisse der Untersuchung zur Änderung des Klimas in Sachsen-Anhalt, die aufgrund des anthropogenen, durch den Ausstoß von Treibhausgasen verursachten Klimawandels auftreten. Die Kernaussagen zu folgenden Klimakenngrößen fassen die Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammen:

Temperatur

Die Temperatur wird bis in das Jahr 2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 sehr wahrscheinlich um mindestens +1,1 bis +2,2 K ansteigen. Im Falle einer anhaltenden Steigerung der Treibhausgas-Emissionen wird der Temperaturanstieg bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich bei +3,2 bis +5,2 K liegen. Um dies grob einzuordnen: in diesem Fall ist in Sachsen-Anhalt im Normalfall mit anhaltend hohen Temperaturen und derart großer Hitzebelastung im Sommer zu rechnen, die in ihrem Ausmaß die äußerst warmen Sommer von 2018 bis 2020 deutlich übertreffen. Die Änderungssignale zur Erwärmung der Temperatur sind statistisch hoch signifikant und robust. Die Hitzebelastung wird stark zunehmen, Perioden mit Frost- und Eistagen werden hingegen nur noch selten auftreten.

Niederschlag

Die Jahresmengen des Niederschlages nehmen wahrscheinlich weder stark zu noch ab, jedoch besteht die Tendenz zu feuchteren Wintern und trockeneren Sommern. Sommerliche Trockenperioden bis hin zu verheerender Dürre werden zunehmen. Die Intensität von Starkregen steigt an, jedoch sind aufgrund der hohen Streuung der Änderungssignale Aussagen zu extremen Niederschlägen statistisch kaum belastbar. Etwaige Änderungen der Niederschlagsmengen hängen stark mit der Änderung der Zirkulation und Wetterlagen zusammen, welche in diesem Projekt nicht untersucht wurden.

Weitere Änderungen

Die winterliche Windgeschwindigkeit wird möglicherweise leicht zunehmen und die sommerliche etwas abnehmen. Die Solarstrahlung und damit die Sonnenscheindauer werden besonders im Sommerhalbjahr zunehmen. Ursache für diese Änderungen sind möglicherweise Veränderungen der Zirkulation. Im Sommer könnten länger andauernde Hochdruckwetterlagen vermehrt auftreten, die durch eine Nordwärtsverlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels verursacht wird. Die Zunahme der Windgeschwindigkeit im Winter ist nicht konsistent mit der beobachteten Nordwärtsverlagerung von Zyklonenzugbahnen. Möglicherweise hat diese Zunahme thermodynamische Ursachen, wie ein selteneres Auftreten von Inversionswetterlagen. Die relative Luftfeuchtigkeit wird mit voranschreitendem Klimawandel zurückgehen und im Winterhalbjahr zu einer geringeren Neigung zu Nebel führen. Andererseits wird die absolute Luftfeuchtigkeit durch erhöhte Verdunstungsraten über Gewässern aufgrund höherer Temperaturen signifikant zunehmen. Daraus ergibt sich ein größerer Wasserdampfgehalt der Luft, welcher möglicherweise Auswirkungen auf konvektives Wettergeschehen, winterliche Niederschlagsraten und thermisches Empfinden hat.

Auswirkungen des zukünftigen Klimawandels bis 2100 für Sachsen-Anhalt

Die Hitzebelastung wird erheblich zunehmen und wahrscheinlich über das Maß hinaus, wie es in Sachsen-Anhalt bisher aufgetreten ist. Deshalb müssen Strategien zur Bewältigung der Hitzebelastung und ihrer Folgen wie in der Anpassungsstrategie des Landes Sachsen-Anhalt beschrieben, umgesetzt werden. Dürreperioden im Sommerhalbjahr werden sich auf den Wasserhaushalt auswirken und die heimische Vegetation vor große Herausforderungen stellen. Ohne entsprechende Anpassungsmaßnahmen werden wasserintensive Betriebe, wie die

Viehhaltung, durch die Ressourcenknappheit in Bedrängnis geraten und viele Zweige der Landwirtschaft könnten ohne Veränderung der Anbaumethoden und eingesetzten Pflanzen hohen Ernteverlusten entgegensehen. Der Verbrauch von Trinkwasser in Haushalten und Wirtschaftsgebäuden muss durch den Einsatz wassersparender Technologien und Verhaltensweisen reduziert werden. Der Wintersporttourismus im Harz wird aufgrund der Erwärmung an Bedeutung verlieren und kein verlässlicher Bestandteil der regionalen Wirtschaft mehr sein. Die Saison für Städte- und Kulturtourismus wird sich deutlich verlängern. Die Bedingungen für Aktivtourismus werden sich ebenfalls verbessern, weshalb die Identifikation von Chancen durch den Klimawandel für die Tourismusbranche ökonomische Potenziale eröffnen dürfte. Die Gefährdung für Gebäude und Infrastruktur durch Starkniederschläge in kurzer Zeit sowie Hochwasserereignisse könnte deutlich zunehmen, da der atmosphärische Wasserdampfgehalt zunimmt. Diese Herausforderungen sollten bei der Fortschreibung der „Strategie des Landes zur Anpassung an den Klimawandel mit Stand 2019“ berücksichtigt werden.

Ausblick

Es ist empfehlenswert, auf der Grundlage der in dieser Studie erarbeiteten Datensätze weitere Untersuchungen durchzuführen, um mittels geeigneter Wirkmodellierung bereits bestehende konkrete Handlungsempfehlungen zu überprüfen, weitere Maßnahmen sowie Zielindikatoren für die vom Klimawandel betroffenen Sektoren und Regionen zu erarbeiten. Insbesondere trifft dies auf die Landwirtschaft, den Tourismus, die Infrastruktur (Vulnerabilität hervorgerufen durch Extremereignisse) und weitere Auswirkungen des Klimawandels, wie der Verknappung des oberflächlichen Wasserangebots durch erhöhte Verdunstungsraten, zu. Zudem ist eine Auswertung zu der Entwicklung von Häufigkeit und Stärke von Extremwetterereignissen und Konvektionspotential im Zuge des Klimawandels empfehlenswert, da sich die Ergebnisse bisheriger Studien durch die Verwendung einer weniger breiten Datenbasis möglicherweise wesentlich von Ergebnissen auf der Basis der hier ausgewerteten Klimaprojektionen unterscheiden. Der Klimawandel wird auch das Potenzial für nachhaltige Energiegewinnung aus Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie verändern, was ebenfalls mit einer wissenschaftlichen Untersuchung präzisiert werden sollte, um Risiken erkennen und Chancen nutzen zu können. Gegebenenfalls ist im Rahmen zukünftiger Untersuchungen von Klimafolgen ein indikativer Ausblick bis in das Jahr 2300 zu erstellen. Dieser Zeitraum wird durch einige Klimaprojektionen bereits abgedeckt und eine entsprechende Untersuchung kann besonders für die Forstwirtschaft hilfreiche Erkenntnisse zur Szenarienbildung liefern, da der Planungs- und Maßnahmenhorizont mehr als 100 Jahre beträgt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
1.1	Klimasystem	17
1.2	Klimawandel	18
1.3	Vorarbeiten zum Klimawandel in Sachsen-Anhalt	20
1.4	Motivation	21
1.5	Berichtsstruktur	22
2	Daten und Methodik	23
2.1	HYRAS-Datensatz	23
2.2	ERA5-Datensatz	23
2.2.1	Bemerkung	24
2.3	Mitteldeutsches Referenzensemble	24
2.3.1	Empirisch-Statistische Regionalisierungsmethoden	25
2.3.2	Regionale Klimamodelle	26
2.4	Berechnung Klimakenngrößen und Änderungssignale	26
2.4.1	Berechnung Klimakenngrößen	26
2.4.2	Schwellwertanpassung	30
2.4.3	Weitere Klimakenngrößen	31
2.4.4	Regionalisierung	33
2.4.5	Klimaänderungssignale	35
2.5	Signifikanzbetrachtung	36
2.5.1	T-Test adaptiert nach Welch	37
2.5.2	Kolgomorov-Smirnoff Test	37
2.5.3	Robustheitsbetrachtung	38
2.6	Ensemblevergleich	38
2.7	Datenübergabe	40
2.8	Interpretation der Ergebnisse	40
3	Das Klima der Referenzperiode 1961 – 1990	41
3.1	Mitteltemperaturen	41
3.2	Temperaturkenttage	47
3.3	Extremtemperaturen	51
3.4	Thermische Vegetationsperiode	53
3.5	Niederschlagsmengen	54
3.6	Niederschlagstage	56
3.7	Klimatische Wasserbilanz	58
3.8	Weitere Niederschlagskenngößen	61
3.9	Weitere Klimakenngößen	63

4	Klimaänderungssignale	68
4.1	Mitteltemperaturen	69
4.2	Temperaturkentage	75
4.3	Extremtemperaturen.....	85
4.4	Thermische Vegetationsperiode.....	87
4.5	Niederschlagsmengen.....	90
4.6	Niederschlagstage	93
4.7	Klimatische Wasserbilanz	97
4.8	Weitere Niederschlagskenngößen	103
4.9	Weitere Klimakenngößen	106
5	Signifikanz- und Robustheitsbetrachtungen.....	111
5.1	Signifikanzbetrachtung	112
5.1.1	Temperatur	113
5.1.2	Temperaturkentage	114
5.1.3	Niederschläge	115
5.1.4	Klimatische Wasserbilanz	116
5.1.5	Weitere Klimakenngößen.....	117
5.2	Robustheitsbetrachtung	120
5.2.1	Temperatur	120
5.2.2	Niederschläge	121
5.2.3	Klimatische Wasserbilanz	123
5.2.4	Weitere Klimakenngößen.....	125
5.3	Zusammenfassung.....	128
6	Ensemblevergleich.....	130
6.1	Temperatur	130
6.2	Niederschlag	134
6.3	Weitere Kenngößen	138
6.4	Zusammenfassung.....	140
7	Ergebnisdiskussion und Zusammenfassung.....	142
7.1	Bewertung der Datengrundlage und Klimaprojektionen.....	142
7.2	Klima der Referenzperiode.....	143
7.3	Änderungssignale durch den Klimawandel.....	144
7.4	Ensemblevergleich und Bewertung Kernensemble	146
7.5	Interpretation des Klimawandels in Sachsen-Anhalt.....	146
8	Literaturverzeichnis	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Temperaturrekorde für die RP, höchstes T_{\max} (links) und tiefstes T_{\min} (rechts) aus dem HYRAS-Datensatz des DWD. Die Flächenmittel sind numerisch dargestellt.	18
Abbildung 2.1.: Illustration der Schwellwertanpassung am Beispiel der Eistage.	31
Abbildung 2.2: Illustration der Regionalisierungsmethode. Dargestellt sind Grenzen des Landes Sachsen-Anhalt, der jeweiligen Region und farbig der Flächenanteil jedes Gitterpunktes innerhalb der jeweiligen Region. Zusätzlich sind die Flächenanteile der Regionen an der Gesamtfläche von Sachsen-Anhalt in der jeweiligen Überschrift aufgeführt.....	35
Abbildung 2.3: Illustration der Auswertung und Darstellung der Klimaänderungssignale am Beispiel der durchschnittlichen jährlichen höchsten T_{\max}	36
Abbildung 3.1: Jahresmittel von T_{mit} , T_{\max} und T_{\min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben rechts angegeben.	42
Abbildung 3.2: Mittelwerte des Winters (Dezember, Januar, Februar) von T_{mit} , T_{\max} und T_{\min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben recht angegeben.....	43
Abbildung 3.3: Mittelwerte des Frühlings (März, April, Mai) von T_{mit} , T_{\max} und T_{\min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben recht angegeben.	43
Abbildung 3.4: Mittelwerte des Sommers (Juni, Juli, August) von T_{mit} , T_{\max} und T_{\min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben rechts angegeben.....	44
Abbildung 3.5: Mittelwerte des Herbstes (September, Oktober, November) von T_{mit} , T_{\max} und T_{\min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben recht angegeben.....	45
Abbildung 3.6: Anzahl von thermischen Kenntaggrößen. Dargestellt sind von oben links: Eistage, Frosttage, Heizgradtage, Strengfrosttage und die jährliche Anzahl von Tagen in Kälteperioden. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	47
Abbildung 3.7: Anzahl von thermischen Kenntaggrößen. Dargestellt sind von oben links: Sommertage, Hitzetage, Tage mit NOAA-Heatindex > 39 °C, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und Kühlgradtage. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	49
Abbildung 3.8: Anzahl von Perioden mit Kenntagen in der RP.	50
Abbildung 3.9: Darstellung des 1. Perzentils (obere Reihe) und des mittleren jährlichen Minimums (untere Reihe) für, von links nach rechts: T_{\max} , T_{mit} und T_{\min} . Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	51
Abbildung 3.10: Darstellung des 99. Perzentils (obere Reihe) und des mittleren jährlichen Maximums (untere Reihe) für, von links nach rechts: T_{\max} , T_{mit} und T_{\min} . Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.....	52

Abbildung 3.11: Darstellung der thermischen Vegetationsperiode in der RP. Von links nach rechts: Länge, Beginn und Ende der thermischen Vegetationsperiode. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	53
Abbildung 3.12: Durchschnittliche Niederschlagsmengen in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	54
Abbildung 3.13: Durchschnittliche Anzahl an Niederschlagstagen mit $P \geq 1$ mm in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	56
Abbildung 3.14: Durchschnittliche Anzahl an Niederschlagstagen mit $P > 10$ mm in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	57
Abbildung 3.15: Durchschnittliche Anzahl an Niederschlagstagen mit $P > 20$ mm in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	58
Abbildung 3.16: Durchschnittliche KWB nach Penman-Monteith FAO56 für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	59
Abbildung 3.17: Durchschnittliche Verdunstung über Gras nach Penman-Monteith FAO56 für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	60
Abbildung 3.18: Starkregenkenngößen für die RP. Berechnungsmethoden können in 2.4 nachvollzogen werden. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	61
Abbildung 3.19: Von links oben: Trockenperioden, Regenperioden, Anzahl der SPI Trocken- und Nässeperioden für die RP. Berechnungsmethoden können in 2.4 nachvollzogen werden.	62
Abbildung 3.20: Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst.	64
Abbildung 3.21: Durchschnittliche Spezifische Luftfeuchtigkeit, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	65
Abbildung 3.22: Durchschnittliche Solarstrahlung, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst.	66
Abbildung 3.23: Durchschnittliche Windgeschwindigkeit, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.	66
Abbildung 4.1: Illustration der Auswertung und Darstellung der Klimaänderungssignale am Beispiel der durchschnittlichen jährlichen höchsten T_{max}	69
Abbildung 4.2: Mittleres Änderungssignal in [K] gegenüber der RP für das durchschnittliche jährliche T_{mit}	70
Abbildung 4.3: Mittleres Änderungssignal in [K] gegenüber der RP für das durchschnittliche jährliche T_{max}	71
Abbildung 4.4: Mittleres Änderungssignal in [K] gegenüber der RP für das durchschnittliche jährliche T_{min}	71

Abbildung 4.5: Bandbreite und saisonale Auswertung der Änderungssignale des T_{mit} . Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.	72
Abbildung 4.6: Bandbreite und saisonale Auswertung der Änderungssignale des T_{max} . Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.	73
Abbildung 4.7: Bandbreite und saisonale Auswertung der Änderungssignale des T_{min} . Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.	74
Abbildung 4.8: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für jährliche Anzahl von Sommertagen.....	75
Abbildung 4.9: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für jährliche Anzahl von Hitzetagen.....	76
Abbildung 4.10: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für jährliche Anzahl von Tagen mit starker Hitzebelastung.	77
Abbildung 4.11: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Kühlgradtage. Die Änderung ist in [K] angegeben.	78
Abbildung 4.12: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Heizgradtage. Die Änderung ist als relatives Signal in % angegeben.	79
Abbildung 4.13: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Eistage.	80
Abbildung 4.14: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Frosttage.....	80
Abbildung 4.15: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Tropennächte.	81
Abbildung 4.16: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Strengfrostage.....	82
Abbildung 4.17 Bandbreite der Änderungssignale für (von oben links nach rechts unten): Sommertage, Hitzetage, Tage mit starker Hitzebelastung, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und Anteil warmer Tage. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.	83
Abbildung 4.18: Bandbreite der Änderungssignale für (von oben links nach rechts unten): Frosttage, Eistage, Strengfrostage, Tage in Kälteperioden und Anteil kalter Tage. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.	84
Abbildung 4.19: Bandbreite der Änderungssignale für das 99. Perzentil (oben) und das durchschnittliche jährliche Maximum (unten) von T_{max} , T_{mit} und T_{min} (v.l.n.r.).	86
Abbildung 4.20: Bandbreite der Änderungssignale für das 1. Perzentil (oben) und das durchschnittliche jährliche Minimum (unten) von T_{max} , T_{mit} und T_{min} (v.l.n.r.). Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.	87
Abbildung 4.21: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für den Beginn der thermischen Vegetationsperiode.	88

Abbildung 4.22: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Länge der thermischen Vegetationsperiode.	89
Abbildung 4.23: Mittleres Änderungssignal in [mm] gegenüber der RP für den Jahresniederschlag.	90
Abbildung 4.24: Mittleres relatives Änderungssignal in [%] gegenüber der RP für den Niederschlag im Winterhalbjahr (Oktober bis März).....	91
Abbildung 4.25: Mittleres relatives Änderungssignal in [%] gegenüber der RP für den Niederschlag im Sommerhalbjahr (April bis September).	92
Abbildung 4.26: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale Niederschlagsmengen. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.	93
Abbildung 4.27: Mittlere relative Änderungssignale in [%] der Anzahl der Regentage mit $P \geq 1$ mm für das Winterhalbjahr (Oktober bis März).	94
Abbildung 4.28: Mittlere Änderungssignale der Anzahl der Regentage mit $P \geq 1$ mm für das Sommerhalbjahr (April bis September).	95
Abbildung 4.29: Bandbreite der Änderungssignale der Anzahl in [%] der Regentage mit $P \geq 1$ mm, saisonal ausgewertet. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft.	96
Abbildung 4.30: Bandbreite der Änderungssignale der Anzahl der jährlichen Regentage mit $P \geq 1$ mm, $P > 10$ mm und $P > 20$ mm (v.l.n.r.). Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft.	96
Abbildung 4.31: Mittlere Änderungssignale der KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Gesamtjahr.....	97
Abbildung 4.32: Mittlere Änderungssignale der KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Winterhalbjahr (Oktober bis März).	98
Abbildung 4.33: Mittlere Änderungssignale der KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Sommerhalbjahr (April bis September).	99
Abbildung 4.34: Mittlere Änderungssignale der potentiellen Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Gesamtjahr.	100
Abbildung 4.35: Mittlere Änderungssignale der potentiellen Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Winterhalbjahr (Oktober bis März).	101
Abbildung 4.36: Mittlere Änderungssignale der potentiellen Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Sommerhalbjahr (April bis September).	101
Abbildung 4.37: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56).	102
Abbildung 4.38: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale potentielle Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56).	103
Abbildung 4.39: Bandbreite der Änderungssignale für Starkregenindikatoren.	104
Abbildung 4.40: Bandbreite der Änderungssignale für Trocken- und Regenperioden.	105

Abbildung 4.41: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die spezifische Luftfeuchtigkeit.	107
Abbildung 4.42: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale Mittelwerte der Solarstrahlung. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.	108
Abbildung 4.43: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Solarstrahlung	109
Abbildung 4.44: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale Mittelwerte der Windgeschwindigkeit.	110
Abbildung 5.1: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für die Mitteltemperatur. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	111
Abbildung 5.2: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für die Extremwerte der Temperatur. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	112
Abbildung 5.3: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für die Temperaturkenntage. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	113
Abbildung 5.4: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für Indikatoren für Dürre- und Hitzebewertung. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	114
Abbildung 5.5: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Niederschlagsmengen. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	115
Abbildung 5.6: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für Kenntagindikatoren zum Themenfeld Niederschlag. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	116
Abbildung 5.7: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Werte der KWB. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.	118
Abbildung 5.8: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Werte der potentiellen Verdunstung. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die	

Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.....	118
Abbildung 5.9: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Windgeschwindigkeiten. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.....	119
Abbildung 5.10: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Werte der Solarstrahlung. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.....	119
Abbildung 5.11: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die Mitteltemperatur. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	120
Abbildung 5.12: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die jährliche Niederschlagsmenge. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	122
Abbildung 5.13: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die winterliche Niederschlagsmenge. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	122
Abbildung 5.14: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die sommerliche Niederschlagsmenge. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	123
Abbildung 5.15: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die jährliche KWB. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	124
Abbildung 5.16: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die winterliche KWB. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	124
Abbildung 5.17: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die sommerliche KWB. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	125
Abbildung 5.18: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	126
Abbildung 5.19: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Windgeschwindigkeit im Sommer. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	126
Abbildung 5.20: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Solarstrahlung im Winter. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	127

Abbildung 5.21: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Solarstrahlung im Sommer. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.	128
Abbildung 6.1: Ergebnis des Ensemblevergleichs für verschiedene Änderungssignale von Temperaturkenngrößen. V.l.n.r: Jährliches T_{mit} , Anzahl Tage mit starker Hitzebelastung (NOAA-Hitzeindex > 39 °C, Anzahl an Tagen in Hitzeperioden mit mindestens 5 Hitzetagen sowie Heizgradtagen.	132
Abbildung 6.2: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von weiteren Temperaturkenngrößen, v. l. n. r: Durchschnittliches jährliches Maximum T_{max} , T_{min} und 99. Perzentil T_{max} , T_{min}	133
Abbildung 6.3: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von weiteren Temperaturkenngrößen, v.l.n.r: Durchschnittliches jährliches Minimum T_{max} , T_{min} und 1. Perzentil T_{max} , T_{min}	133
Abbildung 6.4: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen, v.l.n.r: Niederschlagssummen von Jahr, Winter und Sommer sowie durchschn. jährliche maximale 5-Tages Niederschlagssumme.	136
Abbildung 6.5: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen, v.l.n.r: KWB von Jahr, Winter und Sommer sowie Anzahl von Tagen mit $P > 10$ mm.	137
Abbildung 6.6: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen, v.l.n.r: Perioden mit mind. 6 Tagen $P \geq 1$ mm, mind. 10 Tagen $P < 1$ mm, Anzahl Tage mit $P < 1$ mm und Starke Niederschlagsmenge (RR95).	138
Abbildung 6.7: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale der Windgeschwindigkeit, v.l.n.r: Durchschnittliche 10m-Windgeschwindigkeiten von Jahr, Winter und Sommer.	140
Abbildung 6.8: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale der Solarstrahlung, v.l.n.r: Durchschnittliche Solarstrahlung von Jahr, Winter und Sommer.	140

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Auflistung der verwendeten GCM-RCM bzw. GCM-ESD Kombinationen für die verwendeten Klimaprojektionen. Die Läufe des Kernensembles sind für das RCP2.6 (RCP8.5) in blau (rot) gekennzeichnet.	25
Tabelle 2.2: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil Ia: Temperaturkenngrößen	27
Tabelle 2.3: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil Ib: Temperaturkenngrößen - Extremwerte	28
Tabelle 2.4: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil II: Niederschlagskenngrößen	28
Tabelle 2.5: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil III: Weitere Kenngrößen.	30
Tabelle 3.6: Ergebnisse der Regionalisierung für die Mitteltemperaturen. Es sind T_{max} in Rot, T_{mit} in schwarz und T_{min} in blau aufgeführt.	46

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Regionalisierung für thermische Kenntaggrößen. Es sind Eistage, Frosttage, Heizgradtage, Strengfrosttage und Tage in Kälteperioden aufgeführt. Berechnungsvorschriften können in Tabelle 2.3 nachgeschlagen werden.	48
Tabelle 3.8: Ergebnisse der Regionalisierung für thermische Kenntaggrößen. Es sind Sommertage, Hitzetage, Tage mit starker Hitzebelastung, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und Kühlgradtage aufgeführt. Berechnungsvorschriften können in Tabelle 2.3 nachgeschlagen werden.	49
Tabelle 3.9: Ergebnisse der Regionalisierung für Temperaturextreme. Berechnungsvorschriften können in Tabelle 2.4 nachgeschlagen werden.	52
Tabelle 3.10: Ergebnisse der Regionalisierung für die saisonale Auswertung der durchschnittlichen Niederschlagsmengen [mm] in der RP.	55
Tabelle 3.11: Ergebnisse der regionalen Auswertung der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an Niederschlagstagen in der RP.	57
Tabelle 3.12: Ergebnisse der Regionalisierung für die saisonale Auswertung der durchschnittlichen KWB nach Penman-Monteith [mm] in der RP.	59
Tabelle 3.13: Ergebnisse der regionalen Auswertung der Starkregenkenngößen [mm] in der RP.	62
Tabelle 6.14: Auflistung der Anteile in % robuster Änderungssignale im Referenzensemble (normale Schrift) und Kernensemble (kursive Schrift) für ausgewählte Indikatoren im Parameterumfeld Temperatur. Für alle Änderungssignale, bei denen Kern- und Referenzensemble nicht das gleiche Ergebnis der Robustheitsbetrachtung aufweisen, sind die Werte in roter Schrift gekennzeichnet.	131
Tabelle 6.15: Auflistung der Anteile in % robuster Änderungssignale im Referenzensemble (normale Schrift) und Kernensemble (kursive Schrift) für ausgewählte Indikatoren im Parameterumfeld Niederschlag. Für alle Änderungssignale, bei denen Kern- und Referenzensemble nicht das gleiche Ergebnis der Robustheitsbetrachtung aufweisen, sind die Werte in roter Schrift gekennzeichnet.	135

Glossar

BP	30 Jährige Klima-Basisperiode 1971-2000
DKRZ	Deutsches Klima-Rechenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage
ERA5	ECMWF Reanalyse Projekt, 5. Generation
ESD	Empirisch-Statistisches Regionalisierungsverfahren für Klimaprojektionen
fernZ	Ferne Zukunftsperiode, 2071-2100
GCM	Globale Zirkulationsmodelle, werden für globale Klimaprojektionen verwendet.
GIS	Geographische Informationssysteme
H_{spec}	Spezifische Luftfeuchtigkeit, Wasserdampfanteil an der Gesamtluft [g kg ⁻¹]
HYRAS	HYdrologische RASterdaten des Deutschen Wetterdienst, Niederschlag, Temperatur und Feuchte basierend auf interpolierten Stationsmesswerten.
IFS	Integrated Forecasting System, globales Wettermodell des ECMWF
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KS	Kolgomorov-Smirno-Signifikanztest
KWB	Klimatische Wasserbilanz aus Niederschlägen abzüglich der potenziellen Verdunstung. Berechnet nach Penman-Moneith Gleichung für Grasfläche.
LAU	Landesamt für Umweltschutz, Sachsen-Anhalt
nahZ	Nahe Zukunftsperiode, 2021-2050
P	Niederschlagsmenge [mm]
PS	Luftdruck an der Oberfläche [hPa]
R_{solar}	Am Boden auftreffende Solarstrahlung [Wm ⁻²], Wellenlängen etwa 200-1500 nm
R01	Abkürzung für die Bezeichnung der Region Wendland und Altmark
R02	Abkürzung für die Bezeichnung der Region Oberharz
R04	Abkürzung für die Bezeichnung der Region Magdeburger Börde
R05	Abkürzung für die Bezeichnung der Region Östliches Sachsen-Anhalt
R06	Abkürzung für die Bezeichnung der Region Südliches Sachsen-Anhalt
RCM	Regionale Klimamodelle, werden für regionale Klimaprojektionen verwendet.
rH	Relative Luftfeuchte in %, berechnet aus dem Verhältnis von tatsächlichem und Sättigungsdampfdruck

RP	30 Jährige Klima-Referenzperiode 1961-1990
SD	Sonnenscheindauer [h]
SLP	Auf Meereshöhe reduzierter Luftdruck [hPa]
SPI₉₀	Standardized Precipitation Index, verwendet eine Periode von 90 Tagen und berechnet die Abweichung der Niederschlagsmenge in Standardabweichungen
ST	Abkürzung für Sachsen-Anhalt
T_{diff}	Differenz von T _{max} und T _{min} [°C]
T_{max}	Tageshöchsttemperatur
T_{min}	Tagestiefsttemperatur
T_{mit}	Tagesmitteltemperatur
THG	Treibhausgase. Diese Gase halten durch Rückstrahlung Energie in der Atmosphäre zurück und erhöhen somit deren Temperatur
WMO	World Meteorological Organization

1 Einleitung

Der derzeit stattfindende Klimawandel wird durch den Ausstoß von Treibhausgasen verursacht, die wiederum aus menschlichen Aktivitäten stammen. Bisherige Ergebnisse von Untersuchungen zu den Auswirkungen dieses Klimawandels haben ergeben, dass eine drastische und rasante Temperaturerhöhung im Gange ist, welche sich auf den gesamten Globus auswirken wird. Auch in Sachsen-Anhalt hat der Klimawandel seine Spuren bereits hinterlassen und in Zukunft ist verstärkt mit weiteren klimawandelbedingten Veränderungen zu rechnen. Im Folgenden werden die fachlichen Grundlagen zum Klimawandel mit Bezug auf Sachsen-Anhalt erläutert.

1.1 Klimasystem

Wetter beschreibt den Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit, während der Begriff *Klima* den Erwartungswert des möglichen *Wetters* an einem Ort beschreibt, inklusive eines Schwankungsbereiches. Das Hauptaugenmerk liegt bei der Betrachtung von Klimakenngrößen wie der Temperatur und dem Niederschlag auf den Mittelwerten und den Werten am oberen und unteren Rand des erwartbaren Spektrums – den Extremwerten. Für Sachsen-Anhalt liegt in der Referenzperiode 1961 – 1990 (RP) der Höchstwert der Tageshöchsttemperatur (T_{\max}) bei etwa 34 bis 37 °C und der Rekord für die tiefste Tagestiefsttemperatur (T_{\min}) bei etwa -24 bis -27 °C in der Fläche (Abb. 1.1). Es ist zu beachten, dass die Datengrundlage für Abbildung 1.1 keine direkten Beobachtungsdaten von Wetterstationen sind, sondern aus einem auf solchen Daten basierendem *Reanalyseprodukt* (HYRAS, 'Hydrologische Rasterdaten') des Deutschen Wetterdienstes (DWD) stammen und auf ein Gitter von etwa 12 km Maschenweite interpoliert wurden. Daher ist Abbildung 1.1 nicht geeignet, einen ortsgenauen Abgleich der Rekordwerte vorzunehmen oder lokale klimatische Einflüsse sichtbar zu machen, im Gegenzug ist Abb. 1.1 hervorragend geeignet, regionale Klimazustände zu beschreiben.

Das Klima wird durch Faktoren wie geographische Breite, Entfernung vom Meer, Höhenlage, Ausrichtung von Topographie in Bezug auf vorherrschende Windrichtung und weitere bestimmt. So sind Klimate der mittleren Breiten an den Ostküsten von Kontinenten im Winter kälter als an den Westküsten auf gleicher geographischer Breite. Dies liegt an der Tatsache, dass die Westküsten bei vorherrschend westlichen Winden von erwärmter Meeresluft erreicht werden.

Die Natur und der Mensch haben sich an das seit etwa 10.000 Jahren herrschende Klima seit Ende der letzten Eiszeit angepasst. Natürliche Schwankungen des Klimas sind häufig der Antrieb für die Migration von Menschen und Tieren sowie das Aussterben vieler Tierarten gewesen. Klimaänderungen haben sich in der Regel über Zeiträume von mehreren Tausend Jahren erstreckt, insbesondere solche Änderungen, die ihre Ursache in Schwankungen der einfallenden Sonneneinstrahlung haben. Rasche und starke Änderungen, wie z. B. die Eem-Warmzeit vor rund 120.000 Jahren haben viele Lebewesen und Ökosysteme in ihrer Anpassungsfähigkeit überfordert und zu dramatischen Veränderungen geführt, wie der Versteppung von ehemals walddreichen Regionen (Brewer, Guiot, Sánchez-Goñi, & Klotz, 2008).

Temperaturrekorde für die RP 1961-1990

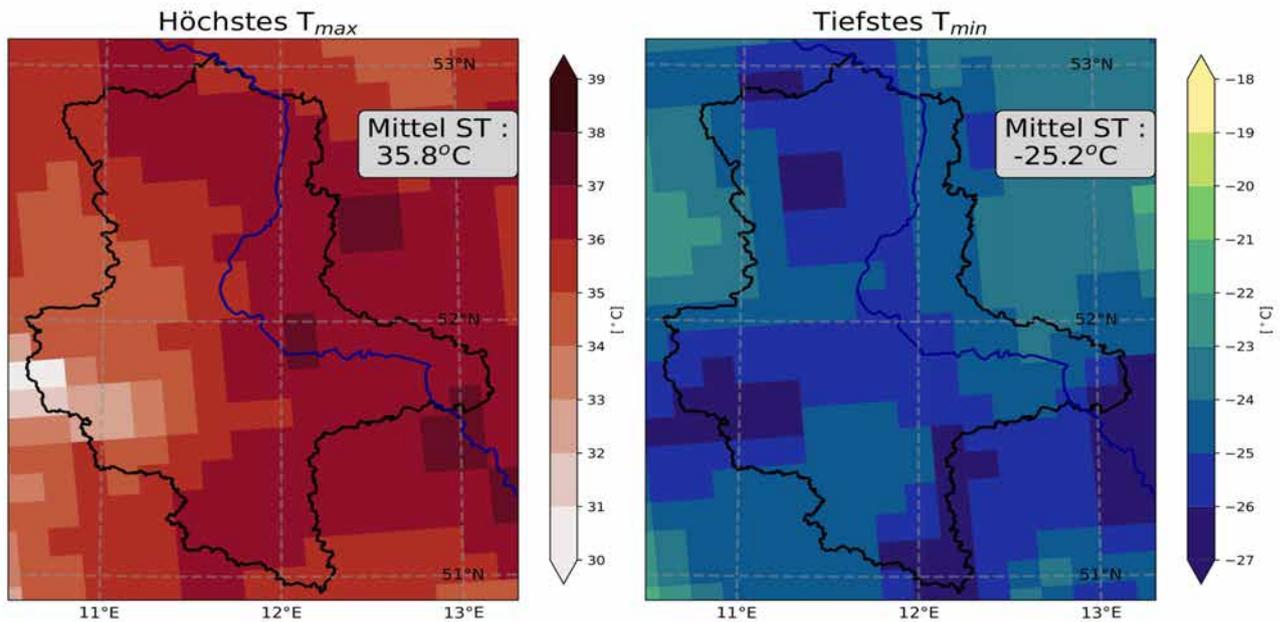


Abbildung 1.1: Temperaturrekorde für die RP, höchstes T_{max} (links) und tiefstes T_{min} (rechts) aus dem HYRAS-Datensatz des DWD. Die Flächenmittel sind numerisch dargestellt.

1.2 Klimawandel

Der derzeit stattfindende globale Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen der Menschheit der Gegenwart und Zukunft. Eindeutige Ursache für die globale Erwärmung sind laut dem 5. Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2014 (IPCC, et al., 2014) menschliche Aktivitäten. Die Emissionen von Treibhausgasen (THG) sind derzeit auf einem Niveau, wie es noch nie beobachtet wurde und der Anstieg der globalen Temperaturen übersteigt in seiner Geschwindigkeit vergangene Ereignisse bei Weitem. Von 1880 bis 2012 ist die globale Temperatur um 0,85 [0,65 bis 1,06 Unsicherheitsbereich] K angestiegen (IPCC, et al., 2014), wobei dieser Anstieg in den polaren Regionen deutlich stärker ausfällt. Auf der 21. UN-Klimakonferenz im Jahr 2015 in Paris wurde von einer Vielzahl von Staaten beschlossen, dass Maßnahmen getroffen werden müssen, um die globale Erwärmung auf unter 2 K, möglichst auf 1,5 K gegenüber der vorindustriellen Zeit zu beschränken (Rhodes, 2016). Das bedeutet, dass bereits 2012 ein gewichtiger Anteil dieses Schwellenwertes für den maximalen Anstieg der globalen Temperatur erreicht wurde. Seit 2012 stiegen die Temperaturen zudem weiter an und die Jahre seit 2015 sind global, aber auch in Sachsen-Anhalt, nochmals etwa 0,3 K wärmer im Vergleich zu 2012 (Unglaube. & Wollmert., 2020). In Sachsen-Anhalt beträgt der gesamte Temperaturanstieg seit 1880 bis 2020 etwa 1,5 K (Unglaube. & Wollmert., 2020). Auch in Sachsen-Anhalt sind der Klimawandel und seine Auswirkungen bereits spürbar. Eine Vorgängerstudie zum beobachteten Klimawandel von 1951-2014 (Spekat, Einfalt, & Jackisch, Klimaanalyse Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1951 2014 auf Basis von Beobachtungsdaten, 2016) belegt, dass die Temperatur in diesem Zeitraum um etwa 1,4 K gestiegen ist. Der Temperaturanstieg lässt sich an der sinkenden Anzahl an Frosttagen mit Minimumtemperaturen (T_{min}) < 0 °C, sowie Eistagen mit Maximumtemperaturen (T_{max}) unter 0 °C ablesen. Während gleichzeitig die Anzahl der Sommertage ($T_{max} \geq 25$ °C) und Hitzetage ($T_{max} \geq 30$ °C) zunahm (Spekat, Einfalt, & Jackisch, Klimaanalyse Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1951 2014 auf Basis von Beobachtungsdaten, 2016). Die Temperatur ist also global sowie regional in

Sachsen-Anhalt deutlich angestiegen, während die Beurteilung von Trends beim Parameter Niederschlag differenzierter ausfällt.

Im Winterhalbjahr zeigt die Vorstudie zum beobachteten Klimawandel einen Trend zur Zunahme und im Frühjahr und Sommer eine Abnahme von Niederschlagsmengen (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016). Die Häufigkeit von Starkniederschlägen hat sich in den tiefer gelegenen Regionen kaum verändert, während im Harz in den 2000er Jahren häufigere Starkniederschläge beobachtet wurden. Die Waldbrandgefahr stieg tendenziell an, verursacht durch höhere Temperaturen, geringere relative Luftfeuchtigkeit und längeren Trockenperioden (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016). Die Vegetationsperiode hat sich in den letzten Jahrzehnten zeitlich um etwa 10 Tage verlängert und der Beginn der Vegetationsperiode hat sich nach vorne verschoben (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016).

In der jüngeren Vergangenheit sind die extrem milden Winter seit 2013 sowie die sehr warmen und trockenen Sommer 2018, 2019 und 2020 mit starken Dürreperioden prominente Beispiele für die Veränderungen des Klimas in Mitteldeutschland. Starkniederschläge wie im Jahr 2010 und 2013, die zu sommerlichen Hochwassern führen, gehören ebenso zum Repertoire des Klimas der jüngsten Vergangenheit. Auf der anderen Seite treten Kälteperioden oder lang anhaltende Perioden mit Schneedecken in tiefen Lagen kaum noch auf (Unglaube. & Wollmert., 2020).

Mit der Zunahme der Temperatur gehen weitreichende Folgen für das Klimasystem einher, die über eine reine Erwärmung hinausgehen. Wie bereits angesprochen, sind vermehrte Waldbrände und Dürren mögliche Folgen des Klimawandels. Die letzten drei sehr trockenen und gleichzeitig warmen Sommer von 2018 bis 2020 haben für ein weiteres Absinken des Grundwasserspiegels gesorgt und die Vegetation besonders in Mitteldeutschland geschädigt (BUND, 2020). Das Absinken des Grundwasserspiegels ist problematisch, da die mitteldeutsche Vegetation und die Landwirtschaft auf ein regelmäßiges und ausreichendes Niederschlagsdargebot im Sommerhalbjahr angewiesen sind. In Anbetracht der großen Variabilität der Situation bezüglich Trockenheit, Waldbränden sowie Starkniederschlägen und Hochwassergefahr in der jüngsten Vergangenheit ist es wichtig, den zukünftigen Klimazustand abschätzen zu können, um die richtigen Anpassungsmaßnahmen ableiten und umsetzen zu können. Es ist auch wichtig, das derzeitige Klima von Sachsen-Anhalt auf geeignete Weise darzustellen, um möglicherweise kritische Parameter erkennen zu können.

Das derzeitige Klima in Sachsen-Anhalt ist von einem scharfen Gegensatz geprägt: Auf der einen Seite finden sich kühle und feuchte Lagen im Harz, wo aufgrund der Westexposition und der Höhenlage Temperaturen niedriger und Niederschläge ausgiebiger ausfallen (Unglaube. & Wollmert., 2020). Zum anderen ist das Klima im Großteil des Landes relativ mild und trocken (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016), besonders im Regenschatten des Harzes. Diese Region wird deshalb auch als *Mitteldeutsches Trockengebiet* bezeichnet. Die Mitteltemperatur (T_{mit}) im Winter liegt bei etwa 0 °C in den tiefen Lagen und die Niederschlagssummen betragen 450 bis 550 mm pro Jahr. Die klimatische Wasserbilanz (KWB) ist deutlich negativ, was bedeutet, dass mehr Wasser verdunstet, als durch Niederschlag fällt. Im Harz ist dies genau umgekehrt, die Wasserbilanz ist positiv und daher wird überschüssiges Wasser durch Fließgewässer abgeführt. Große Hitzebelastungen in Sachsen-Anhalt sind bei mittleren Sommertemperaturen von etwa 17 bis 18 °C in den tiefen Lagen und mittleren T_{max} von etwa 23 °C selten. Die Abwesenheit von großen, zusammenhängenden urbanen Regionen lässt in den Städten des Landes eine gute Frischluftversorgung zu. Jedoch hat die jüngste Vergangenheit mit Höchsttemperaturen von bis über 39 °C in 2018 und 2019 in Bernburg (Saale) (Unglaube. & Wollmert., 2020) gezeigt, dass die Hitzebelastung zunimmt.

1.3 Vorarbeiten zum Klimawandel in Sachsen-Anhalt

Im Jahr 2012 wurde eine Studie zu erwartbaren Klimawandelfolgen in Sachsen-Anhalt auf der Basis des Emissionsszenarios A1B aus dem IPCC-Sachstandbericht von 2000 durchgeführt. (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Die Szenarienfamilie A1 beschreibt ein starkes globales Wirtschaftswachstum, während im Szenario A1B eine ausgewogene Nutzung von fossilen und regenerativen Energiequellen angenommen wird (Nakicenovic, et al., 2000). In Bezug auf die absoluten THG-Emissionen nimmt das A1B-Szenario eine Position im Mittelfeld der Szenarien ein mit einem Maximum der THG-Emissionen um 2050, das etwa 2,5-mal größer ist als der Wert von 1990 (Nakicenovic, et al., 2000). Die Studie aus 2012 untersucht die Änderung des Klimas in Sachsen-Anhalt auf der Basis von zwei verschiedenen Regionalisierungsansätzen in der Klimamodellierung (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Die Vorgängerstudie kommt zum Ergebnis, dass die Temperaturen im gesamten Jahr im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen werden mit Änderungssignalen von bis zu +5 K im Winter (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Ebenso nimmt die Anzahl der Eistage ab und die Zahl der heißen Tage zu. (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Für den Niederschlag werden tendenziell abnehmende Mengen speziell im Sommer erwartet, für den eine Abnahme von 10 bis 20 % berechnet wurde (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Dies bewirkt eine Verringerung des Saldos der klimatischen Wasserbilanz (KWB). Die mittlere Windgeschwindigkeit soll im Winter zunehmen und im Sommer abnehmen (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Für die Änderungssignale von Extremniederschlägen finden sich uneindeutige Signale. Die Studie erläutert, dass die Ermittlung der Änderungssignale mittels der beiden verwendeten Methoden teilweise schwierig ist, da besonders die regionale Modellierung Schwierigkeiten hat, den derzeitigen Klimazustand hinreichend genau zu erfassen. (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012)

Die Universität Frankfurt hat im Jahr 2016 eine Studie zur Entwicklung des ‚Atmosphärischen Konvektionspotentials über Sachsen-Anhalt‘ durchgeführt (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017). Die zugrunde liegende Fragestellung dieser Studie war: Wie wird sich die Häufigkeit und Intensität von konvektiven Wetterlagen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts entwickeln? Konvektive Wetterlagen sind dabei solche, die Wettererscheinungen wie Gewitter, Starkregenschauer, Fallböen, Hagel und Tornados hervorrufen können und haben somit erhebliches Gefahrenpotenzial.

Der Ist-Zustand wurde in dieser Studie mit der Verwendung von Radar-, Wetter-, Modell- und Blitzdaten analysiert (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017). Die Simulation des zukünftigen Klimas wurde mit zwei globalen Zirkulationsmodellen (GCM) durchgeführt. Aufgrund der lokalen, kleinräumigen Ausdehnung konvektiver Wetterereignisse, wurde ein regionales Klimamodell (RCM) verwendet (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017). In dieser Studie wurden die neuen Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 (Representative Emission Pathways) zugrunde gelegt, die für den IPCC-Sachstandbericht aus 2014 festgelegt wurden (Moss, et al., 2010). Das RCP2.6 ist ein Szenario, das große und wirksame globale Anstrengungen zur Reduktion von THG-Emissionen annimmt, während im RCP8.5 von einer andauernden Erhöhung der THG-Emissionen ausgegangen wird (Moss, et al., 2010).

Im Ergebnis wurde zunächst festgestellt, dass derzeit Wetterlagen mit Südwestströmung zu 75 % der *konvektiven extremen* Tage beitragen. *Konvektiv extreme* Tage sind solche, die sich durch besonders hohe Zahlen und/oder Intensitäten von konvektiven Zellen auszeichnen. Außerdem wurde ermittelt, dass eine Zunahme der konvektiv aktiven Tage um bis zu 130 % zum Ende des 21. Jahrhunderts zu erwarten ist (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017). Es wird erwartet, dass Hagel- und Blitzschäden eher abnehmen, während das Schadenspotenzial durch Starkregen zunehmen soll (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017). Tornados und Fallböen wurden nicht untersucht, was aufgrund der Datengrundlage auch nur schwerlich

machbar wäre. Regional betrachtet fällt die Zunahme der konvektiven Ereignisse im Norden des Landes geringer aus als im Süden (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016)

1.4 Motivation

Es gibt zwar durch die Vorstudien Erkenntnisse zu Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt, aber die bislang geringe Datenbasis erschwert es, für Änderungssignale einzelner Klimakenngrößen einen Erwartungswert und einen Wertebereich anzugeben. Diese Information ist jedoch notwendig und wichtig, um zukünftige Vulnerabilitäten und Anpassungsbedarfe zu ermitteln und politische Entscheidungen zu unterstützen. Besonders hilfreich ist eine bessere Einschätzung der Variabilität und Unsicherheit zwischen verschiedenen Szenarien und auch innerhalb der Szenarien zwischen einzelnen Klimaprojektionen, um eine robuste Entscheidungsgrundlage zu erzeugen.

Im Anschluss an den Sachstandbericht des IPCC von 2014 (IPCC, et al., 2014) ist neben der Einführung der bereits erwähnten und weiteren RCP-Szenarien auch eine fünfte Phase der Evaluation von Klimamodellen (CMIP5) durchgeführt worden (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012). Die Evaluationen haben ergeben, dass sowohl die Leistungsfähigkeit der GCM als auch die der RCM seit dem vorherigen Sachstandbericht verbessert worden ist. Durch die Arbeiten der Projekte von CMIP5 steht eine Vielzahl von qualitätsgeprüften Modellläufen zur Verfügung, sodass die Datenbasis wesentlich breiter und robuster ist als zuvor (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012).

In einem auf Deutschland bezogenen Evaluationsprojekt für regionalisierte Klimasimulationen (ReKliEs-De) wurden rund 37 Modellläufe ausgewählt und für das Gebiet der Bundesrepublik regionalisiert (Hübener, et al., 2017). Das EURO-CORDEX Projekt (*Europe within the World Climate Research Program Coordinated Regional Downscaling Experiment*) (Jacob, et al., 2014) steuert ebenfalls ein große Anzahl an Klimaprojektionen zum Datenpool für die Analyse des zukünftigen Klimazustandes bei.

Für Mitteldeutschland besteht das Regionale Klimainformationssystem (ReKIS), welches Klimadaten für die Öffentlichkeit und Entscheidungsträger anschaulich aufbereitet und für die Bundesländer Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt abbildet. Für Sachsen-Anhalt sind dort bisher Informationen zu vergangenen und gegenwärtigen Klimadaten zu finden (Struve, et al., 2020).

Der ReKIS-Verbund hat für die zum Stichtag 21. Juni 2019 vorliegenden Projektionen aufgrund objektiver Qualitätskriterien wie z. B. die Abbildung des vergangenen und gegenwärtigen Klimazustandes, ein Mitteldeutsches Referenzensemble ausgewählt, welches für das RCP2.6-Szenario aus 17 und das RCP8.5-Szenario aus 25 Projektionen besteht (Struve, et al., 2020). Der Verbund hat unter anderem auch Simulationen mit dem REMO2009-Regionalisierungsmodell aus dem Referenzensemble ausgeschlossen, welches noch 2012 für die Auswertung zur Anwendung gekommen ist (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012). Mithilfe einer vom DWD entwickelten Methode wurde das Referenzensemble zu einem Kernensemble von jeweils 7 Läufen reduziert (Dalelane, Früh, Steger, & Walter, 2018). Die Reduktionsmethode zielt darauf ab, die Bandbreite des Referenzensembles im Kernensemble zu erhalten und möglichst stark unterschiedliche Projektionen in das Kernensemble aufzunehmen (Dalelane, Früh, Steger, & Walter, 2018).

Diese so vorhandene, breitere Datenbasis zusammen mit der Erkenntnis, dass das in der Vorstudie verwendete RCM REMO2009 nicht geeignet erscheint, zukünftige Klimazustände in Mitteldeutschland abzubilden, gab daher den Anlass und die Notwendigkeit, die Klimaänderungssignale für Sachsen-Anhalt erneut detailliert zu untersuchen und den

potentiellen Anwendern und Entscheidungsträgern als Datengrundlage zur Verfügung zu stellen. Mit dem hier durchgeführten Projekt werden die Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt zusammen mit ihrer Bandbreite dargestellt. Der Vergleich des mindestens auftretenden Klimawandels im Szenario RCP2.6 – auch ‚Klimaszenario mit konsequentem globalen Klimaschutz‘ genannt – mit dem RCP8.5 – auch ‚Klimaszenario ohne globalen Klimaschutz‘ genannt – mit den größten anzunehmenden Klimafolgen, ist Gegenstand dieser Untersuchung. Der vorliegende Bericht informiert Entscheidungsträger über die mögliche Bandbreite des zukünftigen Klimazustandes in Sachsen-Anhalt. Er soll weiterhin als mögliche Grundlage verstanden werden, um stärkere Anstrengungen zum Klimaschutz zu unternehmen, da ein Ausbleiben von Klimaschutzanstrengungen in der Gegenwart zu größeren Anpassungsdrücken in der Zukunft und damit höheren materiellen und immateriellen Kosten führen wird.

1.5 Berichtsstruktur

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert: Im Kapitel 2 wird die Datengrundlage und angewandte Methodik beschrieben. Im daran anschließenden Kapitel 3 wird das Klima der Referenzperiode 1961 - 1990 (RP) in Sachsen-Anhalt charakterisiert. Im vierten Kapitel werden die Klimaänderungssignale für das RCP2.6 und RCP8.5 jeweils für die nahe Zukunft (nahZ, 2021 – 2050) und die ferne Zukunft (fernZ, 2071 – 2100) beschrieben. Grundlage dieser Auswertung ist das gesamte Mitteldeutsche Referenzensemble. Im anschließenden Kapitel wird eine Signifikanzanalyse und Plausibilitätsüberprüfung durchgeführt, ebenfalls auf Basis des Referenzensembles. In Kapitel 5 werden die Klimaänderungssignale von Referenz- und Kernensemble miteinander verglichen. Daran anschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, diskutiert und interpretiert.

Die Änderungssignale aller Klimakenngrößen werden jeweils mit Bezug zur RP 1961 – 1990 als auch der Basisperiode (BP) 1971 – 2000 ausgewertet. Aufgrund der Ähnlichkeit der Klimas der beiden 30-jährigen Zeiträume, wird in diesem Bericht grundsätzlich der Bezug zur RP betrachtet. Die Ergebnisse relativ zur BP befinden sich in separaten, diesem Endbericht beigelegten Dateianhängen. Neben jährlichen Auswertungen der Klimakenngrößen werden auch die Werte für die meteorologischen Jahreszeiten, die Vegetationsperioden I (April – Juni) und II (Juli – September) sowie das Sommerhalbjahr (April bis September) und Winterhalbjahr (Oktober – März) berechnet. Die saisonale Auswertung der Klimakenngrößen ist größtenteils auch Bestandteil dieses Berichtes, jedoch nicht für alle Kenngrößen. Für Kenngrößen, die auf saisonalen Zeitskalen ausgewertet wurden, aber nicht im Bericht diskutiert werden, befinden sich die Ergebnisse ebenfalls in separaten Dateianhängen.

2 Daten und Methodik

In diesem Kapitel werden die für dieses Projekt eingesetzten Datensätze und die angewandte Methodik beschrieben. Bei den Datensätzen handelt es sich um Reanalysedaten zur Charakterisierung des gegenwärtigen Klimazustandes und Daten der Klimaprojektionen zur Ableitung der Änderungssignale. Die Methodik beinhaltet die Berechnung der Änderungssignale, die Überprüfung statistischer Signifikanz, Robustheit sowie den Vergleich der Referenz- und Kernensembles.

2.1 HYRAS–Datensatz

Der Hydrologische Rasterdatensatz des DWD (HYRAS) umfasst die Parameter T_{\max} , T_{\min} , T_{mit} , relative Feuchte (rH), sowie den Niederschlag. Der Datensatz hat eine maximale horizontale Auflösung von 1 mal 1 km und liegt in täglichen Zeitschritten vor (Rauhe, Steiner, Riediger, Mazurkiewicz, & Gratzki, 2013). HYRAS wurde auf Basis von Beobachtungsdaten von Messstationen erstellt und ist neben der 1 mal 1 km auch in 5 mal 5 km und auf dem EUR11-Gitter (12.5 mal 12.5 km) der europäischen Regionalisierungsprojekte verfügbar (Jacob, et al., 2014), (Rauhe, Steiner, Riediger, Mazurkiewicz, & Gratzki, 2013). Die HYRAS-Daten sind durch die Erzeugung eines mittleren Hintergrundfeldes sowie der regionalen Interpolation durch Gewichtung mit inverser Entfernung gewonnen worden. Für diese Interpolation werden Geländehöhe, Küstenentfernung und urbane Wärmeinseleffekte mit berücksichtigt (Frick, et al., 2014). Letztere sind zum Beispiel klar an einer Häufung von Tropennächten ($T_{\min} > 20 \text{ °C}$) im Bereich Berlin (nicht gezeigt) erkennbar.

2.2 ERA5–Datensatz

Um die klimatische Wasserbilanz (KWB) berechnen zu können, sind Daten zu Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung von erheblicher Bedeutung. Da HYRAS diese Daten nicht enthält und keine reinen Beobachtungsdatensätze von Solarstrahlung und Windgeschwindigkeit existieren, die die Periode 1961 – 2000 abdecken, ist der Reanalysedatensatz ERA5–Land aus dem Projekt ERA5 (ECMWF Reanalyse, 5. Generation) für diese Parameter ausgewählt worden (Hersbach, Dee, & J., 2016). Era5 liegt in stündlicher Auflösung und 9 mal 9 km horizontaler Auflösung vor. Der Datensatz wird auf das dem HYRAS-Datensatz und dem Referenzensemble der Klimaprojektionen zugrunde liegende EUR11-Gitter interpoliert. Für die Erzeugung des Datensatzes wird die bestmögliche verfügbare Datenbasis von vertrauenswürdigen und qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten als Grundlage verwendet. Die numerische Simulation wird mit dem globalen Wettermodell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) durchgeführt, dem Integrated Forecasting System (IFS). Das IFS ist bekannt als das heutige Modell mit den höchsten Werten auf Bewertungsskalen bezüglich der Vorhersagegenauigkeit (Haiden, et al., 2018). Der ERA5-Datensatz wird in vielen Projekten zur Analyse von klimatischen und meteorologischen Gegebenheiten verwendet und wird auch am Deutschen Klima-Rechenzentrum (DKRZ) zur Verfügung gestellt. Die Bedeutung von Reanalyseprodukten als wichtige Werkzeuge zur Ableitung von Klimakenngrößen der Vergangenheit und Gegenwart ist auch auf der 11. Deutschen Klimatagung im Jahr 2018 in Frankfurt herausgestellt worden.

2.2.1 Bemerkung

Die Verwendung von Reanalysedaten wird als gangbar und förderlich eingestuft, da diese Datensätze Beobachtungsdaten verschiedener Quellen verknüpfen und mittels meteorologischen Modellen ein Feld simulieren, das der Realität so nahe wie möglich kommt. Reanalysedatensätze wie der ERA5 werden grundsätzlich ausgiebig geprüft. Unsicherheiten und Fehler lassen sich nicht vermeiden, was im Übrigen auch für reine Beobachtungsdatensätze gilt, die ebenfalls mit mathematischen, in der Regel statistischen, Methoden interpoliert werden (Rauthe, Steiner, Riediger, Mazurkiewicz, & Gratzki, 2013), (Frick, et al., 2014). Die trifft auch auf den HYRAS–Datensatz zu, der auf der Basis von Annahmen und mathematischen Methoden Datenlücken füllt, während ein meteorologisches Modell solche Lücken in der Regel mit physikalisch abgeleiteten Gleichungen berechnet.

2.3 Mitteldeutsches Referenzensemble

Das Referenzensemble umfasst einen Datensatz von 25 Klimaprojektionen für das RCP8.5 und 17 Projektionen für das RCP2.6, die jeweils von einem GCM angetrieben werden und dann für das EUR11-Gitter mit etwa 12.5 km horizontaler Auflösung über Europa mittels eines RCM oder einer empirisch-statistischen Regionalisierung (ESD) regionalisiert werden. Die verwendeten Projektionen basieren auf sieben GCMs, für die Regionalisierung werden zwei verschiedene RCMs und zwei unterschiedlichen ESDs verwendet (Struve, et al., 2020). Das Kernensemble besteht aus jeweils 7 Projektionen je Klimaszenario. Die Projektionen des Kernensembles sind dabei nicht übereinstimmend für das RCP2.6 und das RCP8.5, es werden jeweils fünf verschiedene GCMs und alle vier Regionalisierungsverfahren berücksichtigt.

Die Parameter aller Modellläufe stehen im EUR11 Gitterformat in täglichen Zeitschritten auf etwa 12,5 mal 12,5 km horizontaler Auflösung zur Verfügung. Dabei sind von Modellen die Parameter T_{mit} , T_{max} , T_{min} , Niederschlagsmenge (P), entweder Sonnenscheindauer (SD) oder Solarstrahlung (R_{solar}) sowie entweder relative Luftfeuchte (rH) oder spezifische Feuchte (H_{spec}) verfügbar. Ebenso ist entweder der Bodendruck PS oder der auf Meereshöhe reduzierte Luftdruck SLP verfügbar. Vor der Bearbeitung in diesem Projekt, werden alle Modelldaten auf einen Deutschland umfassenden Ausschnitt zugeschnitten, um die Datenmenge zu reduzieren.

Die GCMs sind ausschließlich gekoppelte Erdsystemmodelle, welche die atmosphärischen Prozesse mit ökologischen, hydrologischen und chemischen Systemen wie den Böden, Ozeanen, Eisschilden, Meeren und Meeresoberflächen sowie Aerosolen koppeln. Die Unterschiede der Modelle bestehen hauptsächlich in der vierdimensionalen Konfiguration, also dem Zeitschritt und der horizontalen und vertikalen Auflösung. Dazu werden in den koppelnden Modellen und innerhalb der physikalischen Umsetzung der Prozesse, welche auf kleineren Raumskalen als die der Modelle stattfinden, zwischen den GCMs unterschiedliche Annahmen getroffen, z. B. über die Effizienz von Niederschlagsbildung oder die Stärke von konvektiven Ereignissen. Dies kann zu erheblichen Unterschieden zwischen den Projektionen führen und berücksichtigt nicht die Auswirkungen der spezifischen Modellkonfiguration, weshalb hier auf den Dateianhang A4 verwiesen wird, in dem einige allgemeine und spezifische, auf die in den ausgewerteten Klimaprojektionen angewandten Modellkonfigurationen gerichtete Bemerkungen gemacht werden und auf die zugehörigen Publikationen verwiesen wird, während im Folgenden auf die Regionalisierungsmethoden eingegangen werden soll.

Tabelle 2.1: Auflistung der verwendeten GCM-RCM bzw. GCM-ESD Kombinationen für die verwendeten Klimaprojektionen. Die Läufe des Kernensembles sind für das RCP2.6 (RCP8.5) in blau (rot) gekennzeichnet.

GCM	RCM/ESD	RCP2.6	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E		x
CHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)		x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CEC-WettReg2018 (v1r1)		x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)		x
CCCma-CanESM2 (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)		x
MIROC-MIROC5 (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)		x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CEC-WettReg2018 (v1r1)	x	x
CCCma-CanESM2 (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x
CCCma-CanESM2 (r2)	DWD-EPIISODES2018	x	x
CCCma-CanESM2 (r3)	DWD-EPIISODES2018	x	x
CCCma-CanESM2 (r4)	DWD-EPIISODES2018	x	x
CCCma-CanESM2 (r5)	DWD-EPIISODES2018	x	x
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	DWD-EPIISODES2018	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r2)	DWD-EPIISODES2018		x
ICHEC-EC-EARTH (r9)	DWD-EPIISODES2018		x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	DWD-EPIISODES2018	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r3)	DWD-EPIISODES2018	x	x
NCC-NorESM1-M (r1)	DWD-EPIISODES2018	x	x
		17 (7)	25 (7)

2.3.1 Empirisch–Statistische Regionalisierungsmethoden

Das WettReg-Verfahren der CEC Potsdam GmbH ist ein ESD, welches die großräumigen Muster der Wetterlage wie Geopotential, Luftdruck, Temperatur und Feuchte des GCM einem Wetterlagentyp zuordnet (Spekat, Enke, & Kreienkamp, 2007). Mit diesem so gewonnenen Wetterlagentypen werden statistische Zusammenhängen abgeleitet, die dann wiederum die für den jeweiligen Wetterlagentyp des GCM typischen Klimakenngrößen berechnet. Diese Parameter sind dabei statistisch für die jeweiligen Wetterlagentypen stratifizierte Beobachtungsdaten (Spekat, Enke, & Kreienkamp, 2007). Für dieses Verfahren wird die

Annahme getroffen, dass sich die regionalen Eigenschaften der zukünftigen Wetterlagentypen im Laufe der Zeit nicht wesentlich ändert (Spekat, Enke, & Kreienkamp, 2007).

Auch das EPISODES-Verfahren des DWD ist eine ESD-Methodik. Das EPISODES-Verfahren ordnet die Ausgaben des GCM einem Wetterlagentyp zu, der jedoch durch Anomalien bestimmter Parameter, wie z. B. der Temperatur in der 850 hPa Schicht in etwa 1500 m Höhe, bestimmt wird (Kreienkamp, Paxian, Früh, Lorenz, & Matulla, 2019). Für die Klassifizierung der Wetterlage werden die 35 ähnlichsten Tage der historischen Zeitreihe bestimmt und im Anschluss wird für alle Parameter (außer dem Niederschlag) eine lineare Regression durchgeführt (Kreienkamp, Paxian, Früh, Lorenz, & Matulla, 2019). Für den Niederschlag wird im Falle von mindestens 12 trockenen Tagen in den 35 Referenztagen ($P < 0.5 \text{ mm}$) der Prognosewert ,0‘ angegeben, während andernfalls nur die Tage mit Niederschlag für die Regression genutzt werden. Für jeden Gitterpunkt werden dann das langjährige Klimamittel, der durch das GCM ermittelte Fortschritt des Klimawandels und die berechnete Anomalie addiert und so das Ausgabesignal berechnet (Kreienkamp, Paxian, Früh, Lorenz, & Matulla, 2019).

2.3.2 Regionale Klimamodelle

RCMs stellen eine Fortsetzung der auf physikalischen Beziehungen beruhenden GCMs dar und benutzen deren Ausgabefelder als Eingangsdaten. Der entscheidende Unterschied liegt in einer größeren horizontalen Auflösung. Eine feinere horizontale Auflösung ermöglicht die Erfassung von regionalen klimatologischen Besonderheiten, wie z. B. die Neigung zu Stauniederschlägen bei bestimmten Wetterlagen. Das RACMO ist ein regionales Klimamodell des Niederländischen Wetterdienstes (KNMI) und basiert im Grunde auf dem bereits erwähnten IFS des ECMWF, wird aber ebenso wie die GCMs mit Komponentenmodellen für Ozeane, Eisflächen und weitere Prozess-Interaktionsflächen gekoppelt (van Meijgaard, et al., 2008). RACMO ist ein auf Eisoberflächen spezialisiertes Modell und wird im Referenzensemble mit rund 12,5 km horizontaler Auflösung gerechnet (van Meijgaard, et al., 2008). Das RCM CCLM4-8-17 beruht auf dem Wettermodell COSMO, welches aus Modellierungsentwicklungen des DWD hervorgegangen ist (Rockel, Will, & Hense, 2008). Diese beiden RCMs sind die einzigen, die im Mitteldeutschen Referenz- und Kernensemble enthalten sind.

2.4 Berechnung Klimakenngrößen und Änderungssignale

2.4.1 Berechnung Klimakenngrößen

Die grundlegende Herangehensweise ist, die in den Tabellen 2.2-2.5 aufgelisteten Klimakenngrößen für jeden Modelllauf sowie den Reanalyse- und Beobachtungsdatensatz für den jeweiligen Betrachtungszeitraum zu berechnen. Dabei ist zwischen Parametern mit und ohne Schwellwertanpassung zu unterscheiden. Die gitterpunktgenaue Schwellwertanpassung wird für Parameter eingesetzt, die aufgrund von fixen Schwellwerten berechnet werden, wie z. B. heiße Tage. Die Berechnung der Parameter erfolgt dabei nach den Prinzipien illustriert in Gleichung (2.1).

Tabelle 2.2: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil Ia: Temperaturkenngrößen

Parameter	Zeiträume	Berechnung	Schwellwert-anpassung
Temperaturkenngrößen			
T_{max} [°C]	jährlich und saisonal	Tägliches Maximum	nein
T_{min} [°C]	jährlich und saisonal	Tägliches Minimum	nein
T_{mit} [°C]	jährlich und saisonal	Tägliches Mittel	nein
T_{diff} [°C]	jährlich und saisonal	$T_{max} - T_{min}$	nein
Eistage [Tage/Jahr]	jährlich	Anzahl der Tage/Jahr mit $T_{max} < 0^{\circ}C$	ja
Frosttage [Tage/Jahr]	jährlich	Anzahl der Tage/Jahr mit $T_{min} < 0^{\circ}C$	ja
Sommertage [Tage/Jahr]	jährlich	Anzahl der Tage/Jahr mit $T_{max} \geq 25^{\circ}C$	ja
Hitzetage [Tage/Jahr]	jährlich	Anzahl der Tage/Jahr mit $T_{max} \geq 30^{\circ}C$	ja
Tropische Nächte [Tage/Jahr]	jährlich	Anzahl der Tage/Jahr mit $T_{min} \geq 20^{\circ}C$	ja
Tage mit starker Hitzebelastung [Tage/Jahr]	jährlich	Anzahl der Tage/Jahr mit NOAA-Hitzeindex (Gl. 2.3) > 39°C	ja
Heizgradtage [K]	jährlich	Jährliche Summe von $17^{\circ}C - T_{mit}$ an Tagen mit $T_{mit} < 17^{\circ}C$	ja
Kühlgradtage [K]	jährlich	Jährliche Summe von $T_{mit} - 23^{\circ}C$ an Tagen mit $T_{mit} > 23^{\circ}C$	ja
Sommertagperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage in Perioden mit 2-3, 4-5, 6-7, ... > 12 Sommertagen	ja
Hitzetagperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage in Perioden mit 2-3, 4-5, 6-7, ... > 12 Hitzetagen	ja
Eistagperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage in Perioden mit 2-3, 4-5, 6-7, ... > 12 Eistagen	ja
Frosttagperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage in Perioden mit 2-3, 4-5, 6-7, ... > 12 Frosttagen	ja
Anteil kalter Tage pro Jahr [%]	jährlich	Anteil der Tage mit $T_{max} < 10$. Perz. der T_{max}^*	nein
Anteil warmer Tage pro Jahr [%]	jährlich	Anteil der Tage mit $T_{max} > 90$. Perz. der T_{max}^*	nein
Andauer von Kälteperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{min} < 10$. Perz. der T_{min}^* an mindestens 6 Tagen in Folge	nein

Parameter	Zeiträume	Berechnung	Schwellwert-anpassung
Andauer von Wärmeperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage mit $T_{max} > 90$. Perz. der T_{max}^* an mindestens 6 Tagen in Folge	nein
Länge der Vegetationsperiode [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage zwischen erster Periode mit mind. 6 Tagen $T_{mit} > 5^{\circ}C$ erster Periode nach 01.06. mit mind. 6 Tagen $T_{mit} < 5^{\circ}C$	ja
		*Die Perzentile werden für jeden Kalendertag eines Jahres aus den jeweils 5 umliegenden Kalendertagen der 30-jährigen Referenzperiode berechnet	

Tabelle 2.3: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil Ib: Temperaturkenngrößen - Extremwerte

Parameter	Zeiträume	Berechnung	Schwellwert-anpassung.
Temperaturkenngrößen			
$T_{min,Min}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des Minimums des T_{min}	nein
$T_{mit,Min}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des Minimums des T_{mit}	nein
$T_{max,Min}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des Minimums des T_{max}	nein
$T_{min,P01}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des 1. Perzentil des T_{min}	nein
$T_{mit,P01}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des 1. Perzentil des T_{mit}	nein
$T_{max,P01}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des 1. Perzentil des T_{max}	nein
$T_{min,P99}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des 99. Perzentil des T_{min}	nein
$T_{mit,P99}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des 99. Perzentil des T_{mit}	nein
$T_{max,P99}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des 99. Perzentil des T_{max}	nein
$T_{min,Max}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des Maximums des T_{min}	nein
$T_{mit,Max}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des Maximums des T_{mit}	nein
$T_{max,Max}$ [°C]	jährlich	Jährliches Mittel des Maximums des T_{max}	nein

Tabelle 2.4: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil II: Niederschlagskenngrößen

Parameter	Zeiträume	Berechnung	Schwellwert-anpassung.
Niederschlagskenngrößen			
P [mm]	jährlich und saisonal	Gesamtsumme über Betrachtungszeitraum	nein
Trockentage [Tage]	jährlich und saisonal	Anzahl der Tage mit $P < 1$ mm	ja
Regentage [Tage]	jährlich und saisonal	Anzahl der Tage mit $P \geq 1$ mm	ja
Regentage mit mehr als 10 mm [Tage]	jährlich und saisonal	Anzahl der Tage mit $P > 10$ mm	ja

Parameter	Zeiträume	Berechnung	Schwellwert-anpassung.
Regentage mit mehr als 20 mm [Tage]	jährlich und saisonal	Anzahl der Tage mit $P > 20$ mm	ja
Starke Niederschlagsmenge, RR95 [mm]	jährlich	Summe der Niederschläge an Tagen mit $P > 95.$ Perz. von P an Tagen mit $P > 0$ mm	nein
Extreme Niederschlagsmenge, RR99 [mm]	jährlich	Summe der Niederschläge an Tagen mit $P > 99.$ Perz. von P an Tagen mit $P > 0$ mm	nein
Maximaler Tagesniederschlag [mm]	jährlich	Jährliches Mittel des Maximums des Tagesniederschlages	nein
Maximaler 5-Tagesniederschlag [mm]	jährlich	Jährliches Mittel des Maximums der 5-tägigen Niederschlagssumme	nein
99. Perz. des 5-Tagesniederschlags [mm]	jährlich	Jährliches Mittel des 99. Perz. der 5-tägigen Niederschlagssumme	nein
95. Perz. des 5-Tagesniederschlags [mm]	jährlich	Jährliches Mittel des 95. Perz. der 5-tägigen Niederschlagssumme	nein
Anzahl von Trockenperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage in Perioden mit Trockentagen für Klassen von 4-5, 6-7, ... ≥ 14 Tagen	ja
Anzahl von Regenperioden [Tage]	jährlich	Anzahl der Tage in Perioden mit Regentagen für Klassen von 4-5, 6-7, ... ≥ 14 Tagen	ja
Standardized Precipitation Index (SPI ₉₀)	jährlich	Normalisierte Abweichung der 90-Tagessumme des Niederschlags vom Wert der RP	nein
Andauer von moderaten Dürreperioden [Tage]	jährlich	Jährliches Mittel der Anzahl an Tagen mit $-1,5 \leq \text{SPI}_{90} < -1$	nein
Andauer von starken Dürreperioden [Tage]	jährlich	Jährliches Mittel der Anzahl an Tagen mit $\text{SPI}_{90} < -1,5$	nein
Andauer von moderaten Nässeperioden [Tage]	jährlich	Jährliches Mittel der Anzahl an Tagen mit $1 < \text{SPI}_{90} \leq 1,5$	nein
Andauer von starken Nässeperioden [Tage]	jährlich	Jährliches Mittel der Anzahl an Tagen mit $\text{SPI}_{90} > 1,5$	nein

Tabelle 2.5: Auflistung der betrachteten Klimaindikatoren und deren Berechnungsvorschrift. Teil III: Weitere Kenngrößen

Parameter	Zeiträume	Berechnung	Schwellwertanpassung.
Weitere Klimakenngrößen			
Windgeschwindigkeit [ms^{-1}]	jährlich und saisonal	Täglicher Mittelwert	nein
Solarstrahlung [Wm^{-2}]	jährlich und saisonal	Täglicher Mittelwert	nein
Relative Luftfeuchtigkeit [%]	jährlich und saisonal	Täglicher Mittelwert	nein
Absolute Luftfeuchtigkeit [gkg^{-1}]	jährlich und saisonal	Täglicher Mittelwert	nein

$$Y = F[x(t), S_x(t)] \quad (2.1)$$

Dabei ist Y der zu berechnende Klimaindikator in Gleichung (2.1), während F() die Berechnungsfunktion darstellt und x(t) die Zeitserie der abhängigen Variable. $S_x(t)$ ist gegebenenfalls ein durch die lokale Zeitreihe definierter Schwellwert, wie z. B. das 10. Perzentil der T_{max} für ein 5-Tages Fenster für die Bestimmung des Anteils der kalten Tage. $S_x(t)$ kann auch ein adjustierter Schwellwert sein. Die Methodik der Schwellwertanpassung ist in Abschnitt 2.4.2 beschrieben.

Die Beschreibungen der Berechnungsfunktion F() für die in diesem Projekt betrachteten Klimakenngrößen finden sich in Tab. 2.2 - 2.5. Einige Klimakenngrößen werden dabei für die gesamte Periode als jährlicher Mittelwert berechnet, wie z. B. die Anzahl der Kenntage wie etwa Eistage. Parameter, die als Summe oder Durchschnittswert angegeben werden, wie etwa Niederschlagssumme oder Temperatur, werden für verschiedene saisonale Auswertungszeiträume berechnet:

- Jahr: alle 12 Monate des Kalenderjahres
- Winter (DJF): Dezember, Januar, Februar
- Frühling (MAM): März, April, Mai
- Sommer (JJA): Juni, Juli, August
- Herbst (SON): September, Oktober, November
- Vegetationsperiode I (AMJ): April, Mai, Juni
- Vegetationsperiode II (JAS): Juli, August, September
- Winterhalbjahr (ONDJFM): Oktober, November, Dezember, Januar, Februar, März
- Sommerhalbjahr (AMJJAS): April, Mai, Juni, Juli, August, September

2.4.2 Schwellwertanpassung

Die Schwellwertanpassung wird schrittweise durchgeführt. Zunächst wird für jeden Datensatz die entsprechende Klimakenngröße nach Gl. (2.1) berechnet unter der Verwendung des fixen Schwellwertes. An dieser Stelle soll das Beispiel der Eistage illustriert werden, also der Anzahl an Tagen mit $T_{max} \geq 0 \text{ °C}$. Der Schwellwert von 0 °C wird dabei für jede Klimaprojektion derart verändert, dass die Anzahl der Eistage (oder anderer Kenntage) im Projektionszeitraum der RP der Klimaprojektion genau der Anzahl der Eistage (oder anderer Kenntage) in der RP im HYRAS-Datensatz entspricht.

$$S(i, j) = x_m(i, j) \wedge \sum_{t=1}^{nt} 1 \forall x_m(t, i, j) >, \geq, <, \leq x_m(i, j) = \sum_{t=1}^{nt} 1 \forall x_{ref}(t, i, j) >, \geq, <, \leq S_{ref} \quad (2.2)$$

Der mathematische Ausdruck für die Schwellwertanpassung ist in Gleichung (2.2) beschrieben. Dabei ist $S(i, j)$ der zu definierende lokale Schwellwert am Gitterpunkt (i, j) und $x_m(i, j)$ ein Wert der Zeitreihe der lokalen abhängigen Variable, welcher die Bedingung erfüllt, dass die zu Grunde liegende Relation, z. B. '<' im Falle der Eistage, in Bezug auf diesen Wert genauso oft erfüllt ist, wie dieselbe Relation für die abhängige Variable im Referenzdatensatz x_{ref} in Bezug auf den fixen Schwellwert S_{ref} .

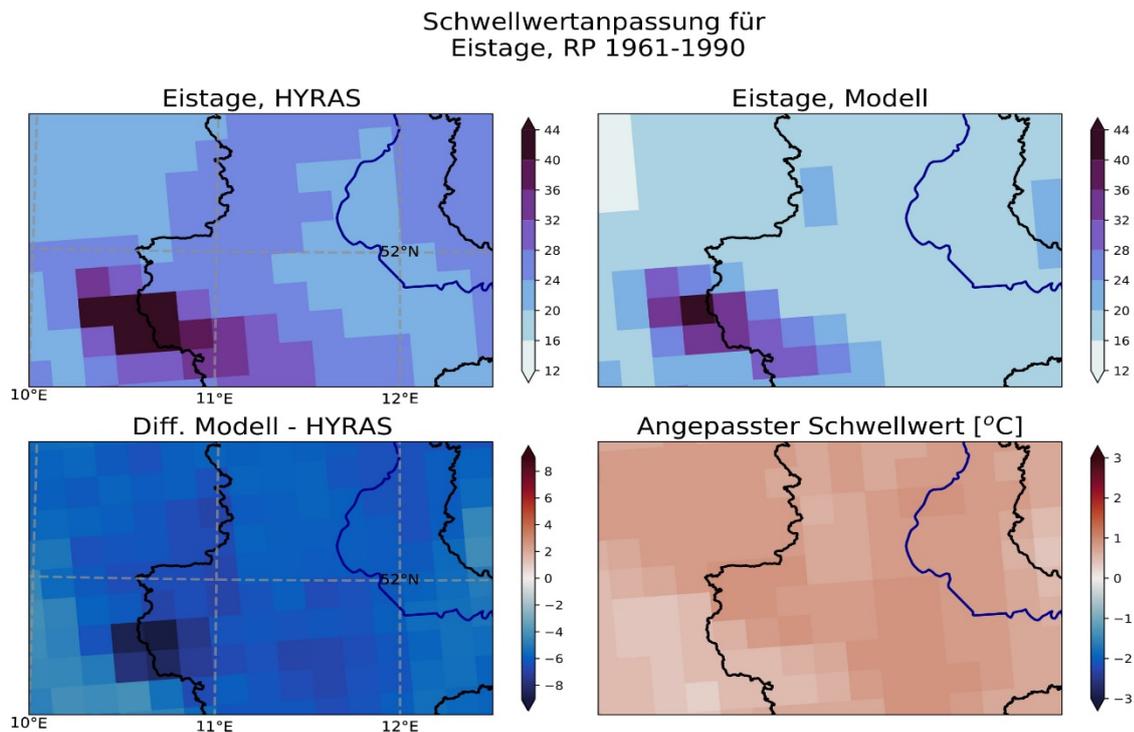


Abbildung 2.1.: Illustration der Schwellwertanpassung am Beispiel der Eistage.

So ist z. B. für einen Gitterpunkt an dem 30 Eistage in der RP im HYRAS-Datensatz ermittelt werden der Schwellwert für eine bestimmte Klimaprojektion auf 1 °C zu erhöhen, wenn diese T_{max} im Zeitraum der RP in dieser Klimaprojektion ebenfalls 30-mal unterschritten wird. Die Berechnung der Eistage (und der anderen Kenntage) erfolgt dann erneut für jeden Modelllauf, wobei jetzt jedoch der neue, angepasste Schwellwert verwendet wird. Diese Methodik wird angewandt, da angenommen wird, dass die den Kenntage zu Grunde liegenden Parameter in der jeweiligen Projektion gleich verteilt sind und an jedem Gitterpunkt ein individueller systematischer Fehler, also ein sogenannter Bias, vorliegt. Die schrittweise Vorgehensweise bei der Schwellwertanpassung ist in Abbildung 2.1 für die Eistage und eine gewählte Klimaprojektion (CCCma-CanESM2 (r5) DWD-EPISODES2018) exemplarisch dargestellt.

2.4.3 Weitere Klimakenngrößen

Zuzüglich zu den in den Tabellen 2.2-2.5 genannten, üblicherweise untersuchten Klimakenngrößen, werden weitere explizite Parameter berechnet, um die zukünftige Veränderung der Hitzebelastung und von hydrologischen Bedingungen darstellen zu können:

- Der NOAA-Hitzeindex wird aus der T_{max} sowie der relativen Luftfeuchte berechnet (Steadman, 1979). Dabei wird in diesem Projekt ein Schwellwert von 39 °C als ‚starke Hitzebelastung‘ definiert und die Anzahl der Überschreitungen gezählt. Dieser Parameter wird ebenfalls einer gitterpunktgenauen Schwellwertanpassung unterzogen. Die Berechnung erfolgt für jeden Tag nach der empirischen (Gl. 2.3), wobei die Temperatur zunächst in Grad Fahrenheit umgerechnet wird und das Ergebnis dann wiederum in Grad Celsius umgerechnet werden muss:

$$\begin{aligned}
 H_i = & -42,379 + 2,04901523 T_{max} + 10,14333127 rH - 0,224755 rH - \\
 & 0,00683783 T_{max}^2 - 0,05481717 rH^2 + 0,00122874 T_{max}^2 + \\
 & 0,00085282 T_{max} rH^2 - 0,00000199 T_{max}^2 rH^2
 \end{aligned}
 \quad (2.3)$$

- Die Klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung berechnet nach einer modifizierten Variante der Penman-Monteith-Gleichung (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). Dieser Algorithmus bezieht Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit, Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei der Berechnung der potentiellen Verdunstung mit ein (Gl 2.4. Die Nettostrahlung R_n wurde dabei aus R_{solar} , der langwelligen Ausstrahlung R_l und dem Bodenwärmestrom G berechnet. Die langwellige Ausstrahlung errechnet sich aus der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit, der Bodenwärmestrom aus der Veränderung der Temperatur zum Vortag und einer angenommenen Wirtiefe von 15 cm. Die bodennahe Windgeschwindigkeit wurde aus der 10 m – Windgeschwindigkeit berechnet und beträgt etwa 75 % dieses Wertes. Das Sättigungsdefizit des Wasserdampfdruckes $e_s - e_a$ kann mit Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit berechnet werden.

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mit}[K]} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2.4a)$$

$$\gamma = \frac{c_p P S}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P S \quad (2.4b)$$

$$e_s = 0.6108 e^{\left\{ \frac{17.27 T_{mit}}{T_{mit} + 237.3} \right\}} \quad (2.4c)$$

$$e_a = r H e_s \quad (2.4d)$$

$$\Delta = \frac{de_s}{dT_{mit}} = \frac{4098 e_s}{(T_{mit} + 237.3)^2} \quad (2.4e)$$

$$G = c_s (1.80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ für Gras}) \frac{T_{mit}(t) - T_{mit}(t-1)}{86400 \text{ s}} \Delta z (0.15 \text{ m für tägl. Werte}) \quad (2.4f)$$

- In bestimmten Vorarbeiten zum Klimawandel in Sachsen-Anhalt wurde die potentielle Verdunstung lediglich auf Basis von Temperaturen und ggf. Strahlung berechnet, was für dieses Projekt aber nicht geeignet erscheint. Diese Entscheidung wurde deshalb getroffen, da naturgemäß bei Wind eine größere Luftmenge an Austausch mit der verdunstenden Oberfläche kommt und bei geringer (hoher) relativer Luftfeuchtigkeit mehr (weniger) Wasser verdunsten kann. Somit ist mit der verwendeten Näherung gewährleistet, dass die physikalischen Prozesse berücksichtigt werden, die am Verdunstungsprozess beteiligt sind. Dies führt letztlich zu einer realitätsnäheren Einschätzung unter den auftretenden Bedingungen (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).
- Der Standardisierte Niederschlags-Index (SPI) wird als Kriterium für die Bewertung des Niederschlagsdargebotes herangezogen. Dabei wird der SPI nach Gleichung 2.5 berechnet. Hierbei ist der Zeitraum 90 Tage gewählt worden, was ein üblicher Zeitraum in Bezug auf hydrologische Untersuchungen ist. Die Niederschlagssumme der letzten 90 Tage wird dabei durch die Standardabweichung des Referenzwertes geteilt. SPI Werte unterhalb (oberhalb) von -1.5 (1.5) werden dabei als sehr trocken (nass) gewertet und deren Anzahl ausgegeben (Zink, et al., 2016).

$$\blacksquare \text{SPI}_{90}(t_0, i, j) = \frac{\sum_{t_0-90d}^{t=t_0} P(t, i, j)}{\sigma_{ref}\{\sum_{t_0-90d}^{t=t_0} P_{ref}(t, i, j)\}} \quad (2.5)$$

- Die extremen Perzentile des Tagesniederschlags und der Temperaturen werden ebenfalls zusätzlich berechnet und deren Änderungssignale analysiert. Dabei geben die extremen Perzentile (1., 5., 95. und 99.) Aufschluss über die Veränderung von Extremwerten wie sie in Hitzewellen, Kältewellen und an Starkregentagen auftreten.

2.4.4 Regionalisierung

Zusätzlich zur Auswertung des Gebietsmittelwertes wird eine regionale Auswertung der Klimakenngrößen durchgeführt. Die regionalen Mittelwerte eines Parameters X werden mittels der Gleichung 2.6 berechnet. Hierbei sind $w_{i,j}$ die lokalen Wichtungsfaktoren, ausgedrückt als Flächenanteil der entsprechenden Gitterzelle innerhalb der betrachteten Region. Für alle nicht in der Region liegenden Gitterpunkte nimmt $w_{i,j}$ den Wert 0 an und für vollständig innerhalb einer Region liegende GP gilt $w_{i,j} = 1$.

$$X_{reg} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{i=nx, j=ny} x_{i,j} w_{i,j}}{\sum_{i=1, j=1}^{i=nx, j=ny} w_{i,j}} \quad (2.6)$$

Die Regionaleinteilung ist modifiziert nach Meynen und Schmithüsen (Rathjens, 1963) und (Schröder, 1997) übernommen worden. Neben dem gesamten Bundesland Sachsen-Anhalt ergeben sich sechs Regionen, die sich in klimatischen und naturräumlichen Gegebenheiten voneinander unterscheiden (Schröder, 1997). Die Regionen sind mit ihren Grenzen und den Flächenanteilen des EUR11 Gitters in Abb. 2.2 dargestellt. Es ist erkennbar, dass Sachsen-Anhalt weitestgehend aus tief liegenden Regionen zwischen 50 und 150 m ü. NN besteht und Ober- und Unterharz sich als jeweils höher gelegene, stark gegliederte Regionen mit kleinem Gesamtanteil am Bundesland deutlich von den anderen Regionen unterscheiden (Abb. 2.2).

Die genauen Bezeichnungen, ggf. Kurzbezeichnungen und Abkürzungen der Regionen lauten wie folgt:

- Sachsen-Anhalt → ST
- Wendland und Altmark → R01
- Oberharz → R02
- Unterharz → R03
- Magdeburger Börde → Börde → R04
- Östliches Sachsen-Anhalt → Östliches ST → R05
- Südliches Sachsen-Anhalt → Südliches ST → R06

In der Regel werden in diesem Bericht die Namen der Regionen ausgeschrieben, auf graphischen und in tabellarischen Darstellungen von Gebietsmittelwerten wird jedoch in der Regel auf die abgekürzten Bezeichnungen zurückgegriffen. Aufgrund der topographischen Ähnlichkeit der Regionen außerhalb von Ober- und Unterharz, werden diese häufig als 'Tieflandregionen' zusammengefasst. Die Ähnlichkeit dieser Regionen resultiert in einer relativ geringen räumlichen Variation von vielen Klimakenngrößen innerhalb dieser Regionen. Die Regionen Unterharz und Oberharz werden im Bericht oftmals als 'Mittelgebirgsregionen' von Sachsen-Anhalt zusammengefasst, wenn der Zweck der Unterscheidung ist, den Unterschied von Klimakenngrößen zwischen diesen Regionen und dem Rest des Landes zu beschreiben. Abbildung 2.2 stellt die Regionalisierung graphisch dar. In jeder Teilabbildung ist eine Darstellung der Grenzen des Landes Sachsen-Anhalt und der Grenze der jeweils betrachteten Region abgebildet. In farbiger Schattierung ist der Flächenanteil jedes Gitterpunktes $w_{i,j}$ an der jeweils betrachteten Region dargestellt und in der Überschrift jeder Teilabbildung ist der Anteil der Region am Flächeninhalt des Landes Sachsen-Anhalt aufgeführt.

Regionalisierung

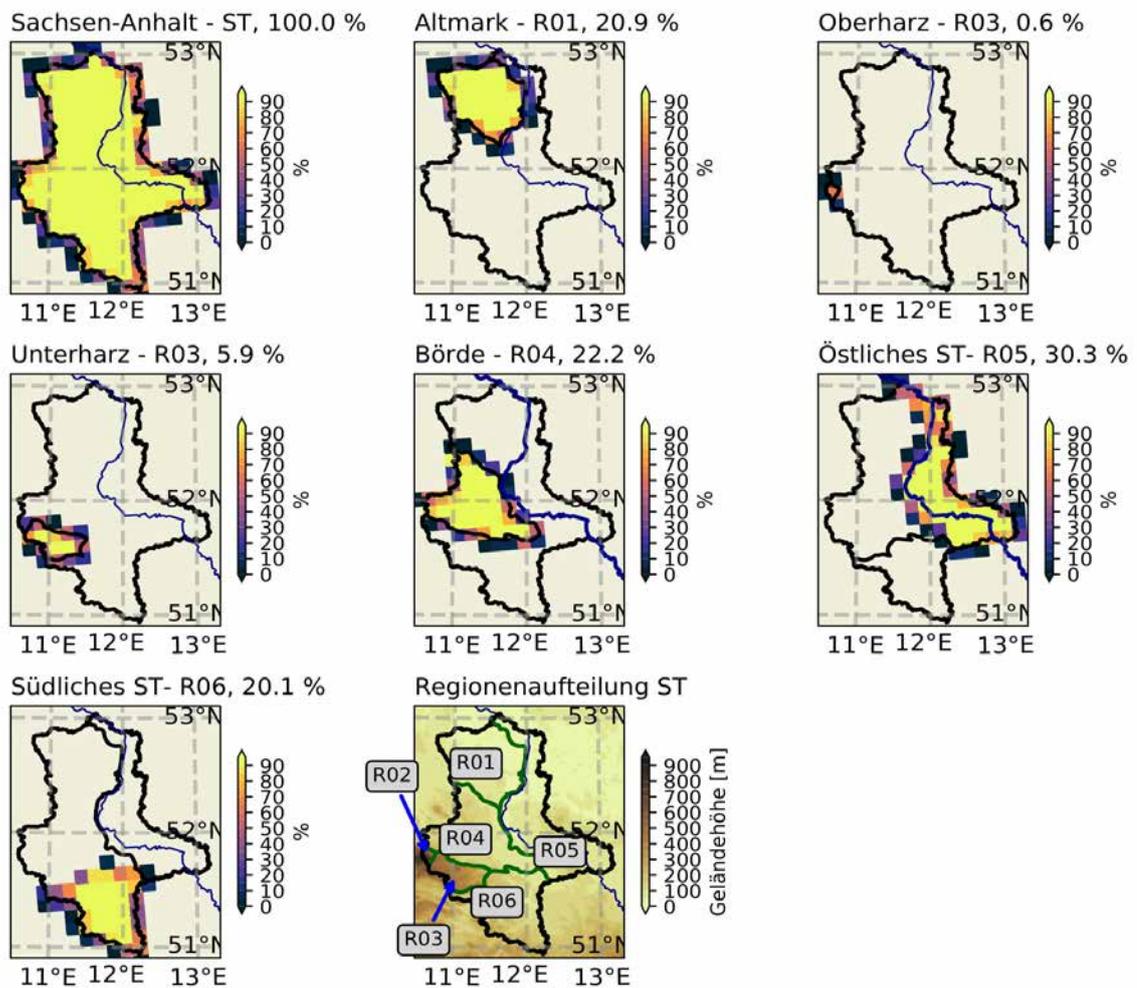


Abbildung 2.2: Illustration der Regionalisierungsmethode. Dargestellt sind Grenzen des Landes Sachsen-Anhalt, der jeweiligen Region und farbig der Flächenanteil jedes Gitterpunktes innerhalb der jeweiligen Region. Zusätzlich sind die Flächenanteile der Regionen an der Gesamtfläche von Sachsen-Anhalt in der jeweiligen Überschrift aufgeführt.

In Abb. 2.2 ist klar zu erkennen, dass die Tieflandregionen mit 93,5 % des Flächeninhaltes des Landes die dominierenden naturräumlichen und klimatischen Einheiten bilden. Deshalb ist es wenig verwunderlich, dass die Gebietsmittel der Klimakenngößen der Tieflandregionen und des gesamten Landes kaum voneinander abweichen, obwohl Ober- und Unterharz signifikant kühler und feuchter sind. Das östliche ST nimmt mit etwa 30 % den größten Teil des Landes ein, während Wendland und Altmark sowie Börde und südliches ST jeweils etwa 20 bis 22 % der Landesfläche einnehmen.

2.4.5 Klimaänderungssignale

Die Änderungssignale der Klimakenngößen werden als Differenz der Klimakenngößen der Zukunftsperioden und der RP bzw. der BP berechnet (Gl. 2.7).

$$\delta X_{Zukunft-ref} = X_{Zukunft} - X_{ref} \quad (2.7)$$

Die Darstellung kann dabei in der Einheit der Kenngröße erfolgen, im Falle von Temperaturen wird die Einheit Kelvin [K] verwendet. Außerdem kann es sinnvoll sein, die Änderung von

Niederschlagsmengen als Prozentsatz auszudrücken, um regionale Vergleichbarkeit zu vereinfachen. Für das Referenzensemble wird der Mittelwert des Änderungssignals als Karte dargestellt. Die Spannweite möglicher Änderungssignale wird als Boxdiagramm dargestellt, so wie in Abbildung 2.3. Dabei stellt der leicht farbige Bereich die gesamte Bandbreite der Änderungssignale der Projektionen des Referenzensembles dar. Der dunkler gefärbte Bereich schließt die 'wahrscheinliche' Änderungsbreite ein, die nach der Definition des IPCC 66% der Änderungssignale um den Median einschließt. Der Median selbst ist durch eine dickere schwarze Linie und der Mittelwert durch eine hellgraue Linie dargestellt. Dünnere dunkelgraue Linien werden zur Darstellung des 'schwachen' und 'starken' Wandels verwendet, welche durch das 15. und 85. Perzentil definiert werden (Hennemuth, et al., 2013).

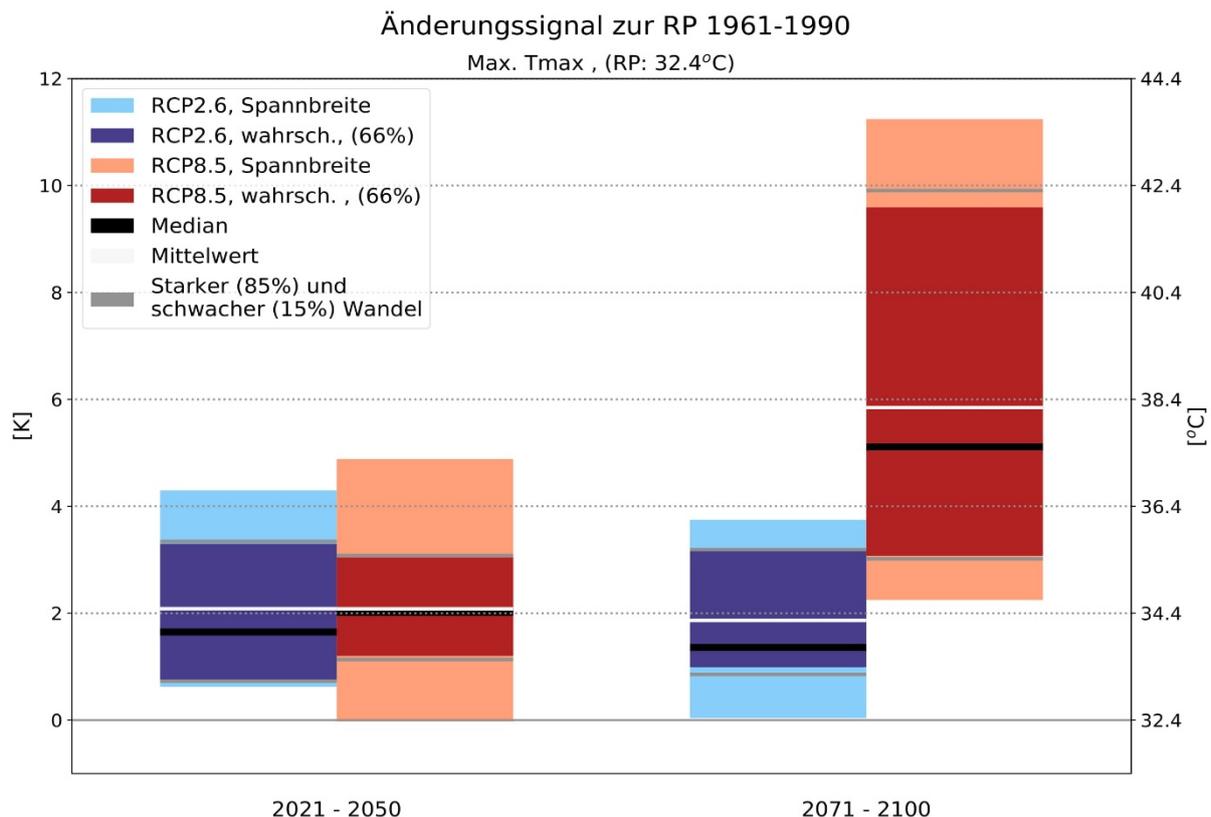


Abbildung 2.3: Illustration der Auswertung und Darstellung der Klimaänderungssignale am Beispiel der durchschnittlichen jährlichen höchsten T_{max} .

2.5 Signifikanzbetrachtung

Die Klimaänderungssignale müssen bezüglich ihrer Signifikanz bewertet werden, um eine Interpretation zu ermöglichen. Bei der Bewertung der statistischen Signifikanz ist jedoch die Höhe der Änderung nicht das alleinige Kriterium, es wird vielmehr die Wahrscheinlichkeit bewertet, mit der das Änderungssignal auch unter gleichbleibenden Klimabedingungen beobachtet werden könnte. Vereinfacht ausgedrückt, wird die Wahrscheinlichkeit untersucht, mit der natürliche, 'zufällige' und damit nicht systematische, Schwankungen das beobachtete Änderungssignal erzeugen können. In dieser Studie wird ein Signal dann als statistisch signifikant bewertet, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine natürliche Ursache des Änderungssignals bei unter 1 % liegt. Für Klimagrößen mit einer großen relativen natürlichen Schwankungsbreite wie der Niederschlagsmenge muss also eine relativ größere Veränderung auftreten als z. B. bei der Anzahl der Eistage, um eine statistische Signifikanz zu bestätigen.

Für die Bewertung der statistischen Signifikanz werden die Änderungssignale zwei verschiedenen Signifikanztests unterzogen und anschließend auf Robustheit untersucht, ein Konzept, das zusätzlich zu statistischer Signifikanz für die Bewertung der Wahrscheinlichkeit und Plausibilität von Änderungssignalen eingesetzt wird.

Die im Folgenden näher beschriebenen Testmethoden sind in der Auswertung von Klimadaten und deren Änderungssignale üblich und eine zusammenfassende Beschreibung dieser Testformate kann auch in einem Report zur Übersicht statistischer Methoden in der Klimadatenanalyse erstellt durch das Climate Service Center des Helmholtz-Zentrums in Geesthacht (Hennemuth, et al., 2013) nachgelesen werden. Die Signifikanz wird für die Zeitreihe jeder Variable an jedem Gitterpunkt berechnet, für Kenntagsvariablen wie etwa Sommertage, bei denen das Ergebnis keine Zeitreihe sondern ein Feld darstellt, werden diese Felder in der Gesamtheit als Grundlage der Berechnung verwendet.

2.5.1 T-Test adaptiert nach Welch

Der adaptierte T-Test nach Welch untersucht, ob sich aus zwei Stichproben erhobene Mittelwerte \bar{X} mit zwei unterschiedlichen Standardabweichungen $\sigma(X)$ aus derselben Grundgesamtheit speisen (H_0) oder nicht (H_1). Die Teststatistik T wird nach Gleichung 2.8 berechnet.

$$T_{ref,klim} = \frac{\bar{X}_{ref} - \bar{X}_{klim}}{\sqrt{\frac{\sigma_{X_{ref}}^2}{N_{ref}} + \frac{\sigma_{X_{klim}}^2}{N_{klim}}}} \quad (2.8)$$

Liegt der Wert von $T_{ref,klim}$ über einem tabellarischen Wert von $T_{krit,\alpha}$, so wird dies als statistisch signifikanter Unterschied der beiden Mittelwerte interpretiert. Der adaptierte T-Test ist in der im Projekt verwendeten Software (python-3.8) implementiert.

2.5.2 Kolmogorov-Smirnoff Test

In diesem Projekt ist die Auswahl auf den Kolmogorov-Smirnoff Test als Signifikanztest gefallen. Diese Wahl wurde getroffen, da der KS Test ohne Annahme einer zugrunde liegenden statistischen Verteilung der jeweils betrachteten Variablen arbeitet. Während der T-Test auf die Signifikanz der Änderung des Mittelwertes einer Kenngröße fokussiert ist, lässt sich das Ergebnis des KS Tests als die Signifikanz der Veränderung der gesamten Verteilung interpretieren. So ist bei potentiell gleichbleibendem Mittelwert eine signifikante Veränderung zu intensiveren Starkniederschlägen und häufigeren Dürreperioden durch den KS Test besser detektierbar, als durch den T-Test. T-Test und KS Test müssen im Rahmen dieses Projektes also gemeinsam betrachtet und interpretiert werden.

Das Ergebnis des KS Test wird als Wahrscheinlichkeit für die Tatsache angegeben, dass sowohl die Referenzperiode als auch die untersuchte Zukunftsperiode aus dem gleichen Klimazustand mit der gleichen Verteilung der betrachteten Variable stammen. Es wird die kumulierte Auftretenshäufigkeit $F(x)$ der Variable x an jedem Gitterpunkt untersucht für die beiden unterschiedlichen Perioden. Die oberste Grenze (Supremum) der Differenz dieser Häufigkeitsverteilung wie in Gleichung 2.9 dargestellt, stellt die Eingangsgröße für den KS Test dar.

$$D_{ref,klim} = \sup_x \vee F_{ref}(x) - F_{klim}(x) \vee \quad (2.9a)$$

$$S_{krit,\alpha} = \sqrt{\frac{\ln(\frac{2}{\alpha})}{2}} \quad (2.9b)$$

$$H_{1,\alpha}: \sqrt{\frac{N_{ref}N_{klim}}{N_{ref}+N_{klim}}} D_{ref,klim} > S_{krit,\alpha} \quad (2.9c)$$

Die kritische Differenz $S_{krit,\alpha}$ wird für das betrachtete Level an statistischer Signifikanz von $\alpha = 1\%$ berechnet. Die Verteilungen werden dann als signifikant unterschiedlich angesehen, wenn die in Gleichung 2.9 (c) genannte Bedingung erfüllt ist, dies wird auch als Annahme der Gegenhypothese $H_{1,\alpha}$ bezeichnet. Der ks Test ist ebenfalls in der im Projekt verwendeten Software (python-3.8) implementiert.

2.5.3 Robustheitsbetrachtung

Die Robustheitsbewertung wird für die Bewertung der Plausibilität und Eintrittswahrscheinlichkeit eines Änderungssignals durchgeführt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um eine Sensitivitätsuntersuchung, bei der die Sensitivität der Änderungssignale bezüglich der Auswahl der Klimaprojektion und der Referenz- bzw. Zukunftsperiode untersucht wird. Die Robustheitsüberprüfung findet in drei Prüfschritten statt, deren Kriterien alle erfüllt werden müssen, um ein Signal als robust bewerten zu können:

- 1 Mindestens 66% der Änderungssignale des Referenzensembles müssen in die gleiche Richtung weisen.
- 2 Mindestens 66% der Änderungssignale des Referenzensembles müssen statistisch signifikant auf dem 1% Level sein für sowohl den T-Test als den ks Test.
- 3 Für eine vor- und rückwärtige Verschiebung der Referenz- und Zukunftsperiode von bis zu drei Jahren in Abständen von einem Jahr darf die maximale Änderung des Änderungssignales maximal 25 % betragen bezogen auf das nicht zeitlich verschobenen Signal. Im vorliegenden Projekt wurde dieses Kriterium abgewandelt:
- 3* Das Änderungssignal darf sich um maximal 25 % verändern, wenn die jeweils zwei extremsten voneinander abweichenden Jahre aus der Zeitreihe der Referenz- und Zukunftsperiode ausgeschlossen werden. Für eine Zukunftsperiode mit höheren Temperaturen bedeutet dies, dass die zwei wärmsten (kältesten) Jahre aus der Zukunftsperiode (Referenzperiode) ausgeschlossen werden.

Für Änderungssignale, die die Bedingungen (1) und (2) erfüllen, wird der Schritt (3) durchgeführt und die Varianz der Signale berechnet. Die Auswertung der Robustheit stellt in diesem Projekt eine Maßnahme zur Plausibilitätsprüfung dar. Änderungssignale, die nicht robust sind, zeigen Unsicherheiten in den regionalisierten Auswirkungen des Klimawandels auf bzw. weisen darauf hin, dass die jeweils betrachtete Kenngröße sich ggf. nicht ändert. Die beobachtete Sensitivität, sei es die Übereinstimmung innerhalb der Projektionen oder die Abhängigkeit von der gewählten Zeitperiode wird ebenfalls dokumentiert.

2.6 Ensemblevergleich

Das Kernensemble wurde auf der Basis einer durch (Dalelane, Früh, Steger, & Walter, 2018) entwickelten Methodik derart aus dem Referenzensemble ausgewählt, dass die Bandbreite der Änderungssignale möglichst gut durch eine geringe Anzahl an Projektionsläufen wiedergegeben wird. Der Vergleich des Kern- und Referenzensembles wird durchgeführt, um die Unterschiede der verwendeten Ensembles nicht nur qualitativ beschreiben, sondern auch

quantitativ erfassen zu können. Da die Durchführung von Klimaanalysen mittels Klimaprojektionen aufgrund der hohen rechentechnischen Anforderung einen hohen Zeit- und Kostenaufwand darstellt, wird in vielen Anwendungsbereichen – insbesondere der Wirkmodellierung – auf eine vollumfängliche Untersuchung des Referenzensembles verzichtet werden müssen. Der Ensemblevergleich soll dazu beitragen, den notwendigen Umfang der zu untersuchenden Projektionen entsprechend der Aufgabenstellung besser abschätzen zu können. Der Vergleich der beiden Ensembles stellt dabei auf den Vergleich von Median und Mittelwert sowie der erfassten Spannweite der Änderungssignale ab. Objektive Kriterien für eine Empfehlung bezüglich der Verwendung eines der beiden Ensembles bestehen nicht, jedoch sind die folgenden Indikatoren in diesem Projekt als notwendige Voraussetzungen dafür erkannt worden, dass die Verwendung des Kernensembles gegenüber dem Referenzensemble zu rechtfertigen ist:

1. Robuste Änderungssignale nach Definition aus Abschnitt 2.5.3 des Referenzensembles müssen diese Definition auch im Kernensemble erfüllen
2. Falls Änderungssignale des Referenzensembles die Definition der Robustheit nicht erfüllen, dürfen die Änderungssignale des Kernensembles ebenfalls nicht robust sein.
3. Median und Mittelwert des Kernensembles müssen innerhalb der nach den Kriterien in Abschn. 2.5 definierten wahrscheinlichen Bandbreite liegen.
4. Die Bandbreite der Änderungssignale im Kernensemble muss sowohl den schwachen als auch den starken Wandel nach Definition aus Abschn. 2.5 mit einschließen.

Als Bemerkung ist hierzu anzuführen, dass selbst bei einer positiven Bewertung der Reduktion des Ensembles, grundsätzlich eine größere Datenbasis für zukünftige Untersuchungen vorzuziehen ist, wo möglich. Diese eindeutige Empfehlung zielt insbesondere darauf ab, dass einige Änderungssignale maßgeblich von der Änderung der Zirkulationsmuster abhängen, die in diesem Projekt jedoch nicht ausgewertet werden. Dies ist beispielsweise für Klimabestandteile wie konvektive Wettererscheinungen, Starkregenperioden, Dürreperioden oder Schneeschmelze wichtig. Gerade diese Wettererscheinungen sind verantwortlich für große Schäden und erhebliche Änderungen dieser Phänomene können einen erheblichen Anpassungsbedarf begründen, der möglicherweise durch die Nichtberücksichtigung von Klimaprojektionen nicht erkannt werden könnte.

Als illustratives Beispiel könnte hier die Anzahl der Hagelunwetter genannt werden. Solche Unwetter entstehen aus bestimmten Wetterlagen mit sehr labiler Schichtung und einer trockenen Schicht in mittlerer Höhe. Aufgrund der konvektiven Natur solcher Unwetter und der damit verbundenen geringen räumlichen Ausdehnung, kann auch ein RCM mit einer Auflösung von 10 km solche Ereignisse nicht explizit erfassen. Deshalb wird in einer Untersuchung zur Änderung des Potenzials von schadensträchtigen Hagelereignissen eine Analyse der Zirkulationsmuster durchgeführt (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016), weshalb mindestens dieses Kriterium in die obige Liste mit aufzunehmen ist, um eine repräsentative Abdeckung der möglichen Spannweite der Klimaänderungen durch ein Kernensemble darstellen zu können. Dieses Beispiel illustriert, dass die Reduktionsmethode über die Betrachtung der Änderungssignale von Temperatur und Niederschlag hinaus weiterentwickelt werden muss, um zu garantieren, dass bei der Reduktion nicht wertvolle Informationen zum möglichen Spektrum an Klimaänderungen verloren geht.

2.7 Datenübergabe

Die in diesem Projekt verwendeten Eingangsdaten liegen als netCDF Dateien vor. NetCDF ist ein Dateiformat, das für Rasterdaten für meteorologische, klimatologische und ozeanographische Anwendungen häufig Verwendung findet. Jedoch sind für Darstellungen in GIS-Anwendungen wie ReKIS und auch für Anschlussverwendungen von Klimadaten wie die Modellierung von Wasserhaushalten, GIS-lesbare Textdateien das Format der Wahl. Deshalb wurden für den Abschluss dieses Projektes die für das Gebiet Sachsen-Anhalts erzeugten Klimagrößen zunächst als netCDF Dateien erstellt. Es wurde eine python-3.8 basierte Software zur Übersetzung der netCDF Dateien in das Koordinatensystem ETS:89-32N entwickelt. Die netCDF Datensätze sowie die Software werden an das LAU übergeben.

2.8 Interpretation der Ergebnisse

Die Interpretation der Ergebnisse soll in diesem Projekt qualitativ anhand der erwartbaren Änderungssignale erfolgen. An den Sommern der letzten Jahre ist vielfach die große Vulnerabilität in Sachsen-Anhalt bezüglich starker Dürreperioden sichtbar geworden, die in den allgemein bereits geringen Niederschlägen bzw. der in weiten Landesteilen deutlich negativen jährlichen KWB begründet liegen. Die negative KWB bedeutet, dass Sachsen-Anhalt auf die Zufuhr von Wasser durch Fließbewegungen aus Regionen mit Überschüssen der KWB angewiesen ist. Falls diese aufgrund trockener Witterung ausbleiben, ergibt sich ein großes Defizit an nutzbaren Wassermengen. Außerdem sind Rekordhitzewellen und besonders lang anhaltende Perioden sehr warmer Temperaturen in den letzten Jahren aufgetreten, welche überregional zu einer verringerten KWB und damit Verfügbarkeit von Wasserressourcen beigetragen haben. Für die Interpretation der Ergebnisse werden mehrere Schritte durchgeführt:

1. Der Vergleich der Änderungssignale für den schwachen und starken Wandel des RCP2.6 und RCP8.5 mit Kennzahlen aus heutigen Klimaten in anderen Regionen der Welt und den möglicherweise damit verbundenen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und Hitzebelastungen.
2. Der Vergleich der Rekord- bzw. Extremwerte des zukünftigen Klimas mit den bis heute aufgetretenen Extremwerten. Dies wird insbesondere deshalb durchgeführt, um zu beurteilen, ob möglicherweise die Klimaprojektionen bereits den Klimawandel bis in die Gegenwart unterschätzen. Dazu werden auch die Ergebnisse der Vorarbeiten mit einbezogen.
3. Eine Ableitung des nötigen Forschungsbedarfes. Für weitere, präzisere Ergebnisse bezüglich Anpassungsbedarf und Gefahrenpotential bedarf es weiterer Arbeiten zu den Auswirkungen des Klimawandels. Dabei sind Schritte zur Erfassung der erarbeiteten Klimaänderungen auf ausgewählte Systeme wie Wasserhaushalt oder Landwirtschaft wünschenswert, aber auch weitere Arbeiten zur Beurteilung von potentiellen Gefährdungen durch Extremereignisse wie konvektive Unwetter und Hitzewellen denkbar, die über den Rahmen dieses Projektes hinausgehen.

Die Interpretation soll dabei auch die Klimaanpassungsstrategie des Landes Sachsen-Anhalt aufgreifen und besonders wichtige Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels herausstellen und die Beziehung dieser Maßnahmen zum Klimawandel erläutern (Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie, 2019).

3 Das Klima der Referenzperiode 1961 – 1990

Im Folgenden wird das Klima Sachsen-Anhalt in der RP eingehend charakterisiert. Nach der gängigen Klimaklassifikation von Köppen und Geiger aus 1936 (Köppen, 1936), liegt Sachsen-Anhalt im Übergangsbereich von einem warm-gemäßigten ‚C‘ Klimatyp im Westen zu einem feuchten Kontinentalklima im Osten vom Typ ‚D‘. Diese Einordnung wird durch die Arbeiten von (Rubel & Kottek, 2010) auf der Basis von Reanalysen und Klimaprojektionen bestätigt. Das T_{mit} des kältesten Monats liegt bei solchen Klimaten bei knapp über $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (C) bzw. knapp unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (D). Die Niederschlagsmenge liegt im Jahresmittel über der Definition eines Steppenklimas (Zusatz ‚f‘ für feucht) und die T_{mit} des wärmsten Monats liegt unter $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, während mindestens vier Monate ein T_{mit} von mindestens 10 aufweisen (Zusatz ‚b‘) (Köppen, 1936). Die Bezeichnung des Klimas von Sachsen-Anhalt ist daher ‚Cfb‘ für den Westen des Bundeslandes und ‚Dfb‘ für den Süden und Osten.

Die Charakterisierung des Klimas der RP wird in dieser Untersuchung aufgrund der Kompatibilität des horizontalen Gitters unter Verwendung des HYRAS-Datensatzes des DWD sowie des ERA5-Datensatzes des ECMWF durchgeführt. HYRAS und ERA5 sind gerasterte Reanalysedatensätze mit horizontaler Auflösung von $12,5$ bzw. 9 km . Der HYRAS-Datensatz wurde vom DWD auf der Basis von statistisch interpolierten Beobachtungsdaten erstellt, während der ERA5-Datensatz durch eine numerische Datenassimilation erstellt wurde. Beide Datensätze werden auf das EUR11-Gitter interpoliert. Aufgrund der Tatsache, dass die Untersuchung des Referenzklimas mittels Reanalysedatensätze durchgeführt wird, ist ein direkter Vergleich von Klimakenngrößen besonders an exponierten Wetterstationen wie dem Brocken mit den Ergebnissen dieser Studie nicht angebracht, während die Abweichungen für den Großteil der Messorte im Tiefland Sachsen-Anhalts nur unbedeutend sein dürften. Das Ziel dieser Untersuchung ist es nicht, den Klimazustand so exakt wie möglich zu beschreiben, sondern die erwartbaren Änderungen regional und zeitlich differenziert auszuwerten. Deshalb ist ein Vergleichsdatensatz mit ähnlicher horizontaler Auflösung wie die regionalen Klimaprojektionen besser für diese Aufgabenstellung geeignet, als reine Stationsdaten.

3.1 Mitteltemperaturen

In Abbildung 3.1 ist die Jahresmitteltemperatur dargestellt sowie das Jahresmittel des T_{max} und des T_{min} , wobei auffällt, dass Sachsen-Anhalt eine außerhalb des Harzes sehr einheitliche Temperaturverteilung aufweist und im Harz die Temperatur mit der Höhe abnimmt. Die Mitteltemperatur in Sachsen-Anhalt beträgt $8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ und schwankt zwischen $8,5$ und $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit etwas höheren Werten in den südöstlichen Regionen.

Im Harz beträgt das Jahresmittel $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Oberharz und $7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Unterharz (Abb. 3.1). Das mittlere T_{max} liegt bei etwa $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, im Oberharz bei $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, während das T_{min} im Mittel bei $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt und im Harz bei etwa $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die regionalen bzw. durch die Höhenlage bedingten Unterschiede sind beim T_{max} mit etwa 3 K größer als beim T_{min} mit etwa 2 K . Dies ist dadurch bedingt, dass nächtliche Auskühlung durch Ausstrahlung zu einer Ansammlung von Kaltluft in tiefer gelegenen Regionen bzw. in Bodennähe führt, weshalb das T_{min} weniger stark an die Höhenlage gekoppelt ist.

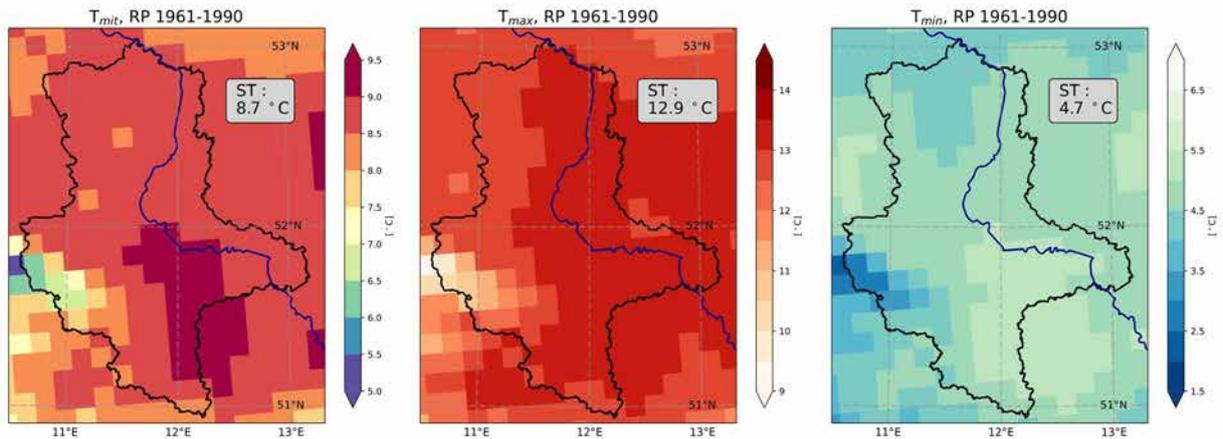


Abbildung 3.1: Jahresmittel von T_{mit} , T_{max} und T_{min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben rechts angegeben.

Die Darstellung in Abb. 3.1 illustriert sehr gut, dass HYRAS in der EUR11 Auflösung nicht geeignet ist, lokale klimatische Gegebenheiten in klimatisch und topographisch stark gegliederten Räumen wie dem Harz darzustellen, sondern eher ein gutes Maß zur Beschreibung des regionalen Makroklimas ist. So beträgt z.B. das mittlere T_{max} in der den Brocken enthaltenden Gitterzelle etwa 8,5 °C, während der dortige Messwert für das mittlere T_{max} bei etwa 5,6 °C liegt (Kinkeldey, Nöth, & Adler, 2015). HYRAS eignet sich jedoch sehr gut, das im Grunde sehr einheitliche Klima der tief gelegenen Regionen Sachsen-Anhalts zu beschreiben. So liegen das Jahresmittel der Temperatur an der HYRAS Gitterzelle über Halle (Saale) bei etwa 9,2 °C und der Referenzwert der dortigen Messstation bei 9,1 °C. Die Abweichungen sind also marginal. Die Variabilität der Mitteltemperatur wird in Sachsen-Anhalt hauptsächlich durch die Höhenlage des Harzes beeinflusst, während die Felder für die Jahresmittel in den übrigen Regionen sehr einheitlich sind.

Ein stärker gegliedertes Bild ergibt sich für die mittleren Temperaturen im Winter von Dezember bis Februar für die RP (Abb. 3.2). Das T_{mit} liegt bei -0,5 bis 0,5 °C und ist an der Grenze zu Niedersachsen und im südöstlichen Teil von Sachsen-Anhalt etwas milder als in den anderen Regionen. Das Mittel für das gesamte Bundesland liegt bei 0,4 °C, während im Harz mit zunehmender Höhe leicht negative T_{mit} registriert werden von bis zu -2 °C. Das mittlere T_{max} liegt bei etwa 3 °C und das mittlere T_{min} bei -2,3 °C. Die regional höheren T_{mit} an der Grenze zu Niedersachsen werden durch die Nähe zur Nordsee bedingt, die bei entsprechender Windrichtung Wärme an die herangeführten Luftmassen abgeben kann (Abb. 3.2). Gleichzeitig, wird auf der Ostseite des Harzes oftmals durch Überströmen ein föhnartiger Effekt mit Wolkenauflockerung und milderem T_{max} beobachtet, der sich auch in den Mittelwerten wiederfindet.

Im Frühling steigen die Temperaturen an auf Werte von 8 °C im Landesmittel (Abb. 3.3). Die Temperaturverteilung zeigt neben kühlem Harz auch, dass das T_{mit} im Nordwesten des Landes, etwas kühler ist als im Südosten. Dies trifft auch auf T_{min} und T_{max} zu, welche im Landesmittel 3,6 °C bzw. 12,8 °C betragen (Abb. 3.3).

Wintermittel (DJF) der Temperatur für die RP 1961-1990

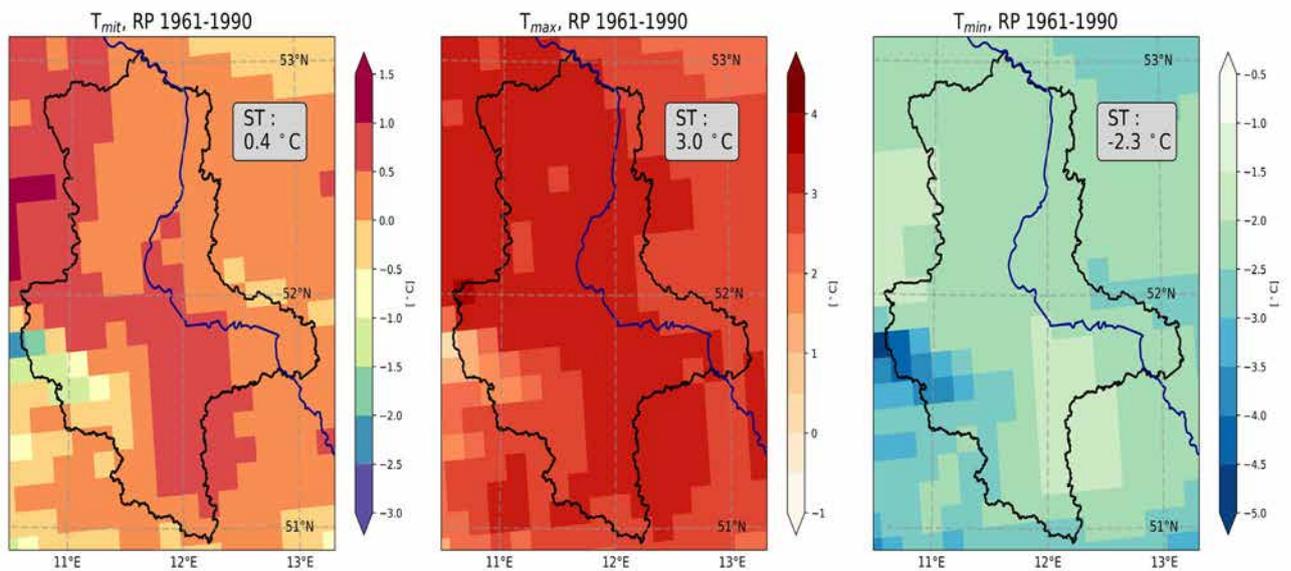


Abbildung 3.2: Mittelwerte des Winters (Dezember, Januar, Februar) von T_{mit} , T_{max} und T_{min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben rechts angegeben.

Frühlingsmittel (MAM) der Temperatur für die RP 1961-1990

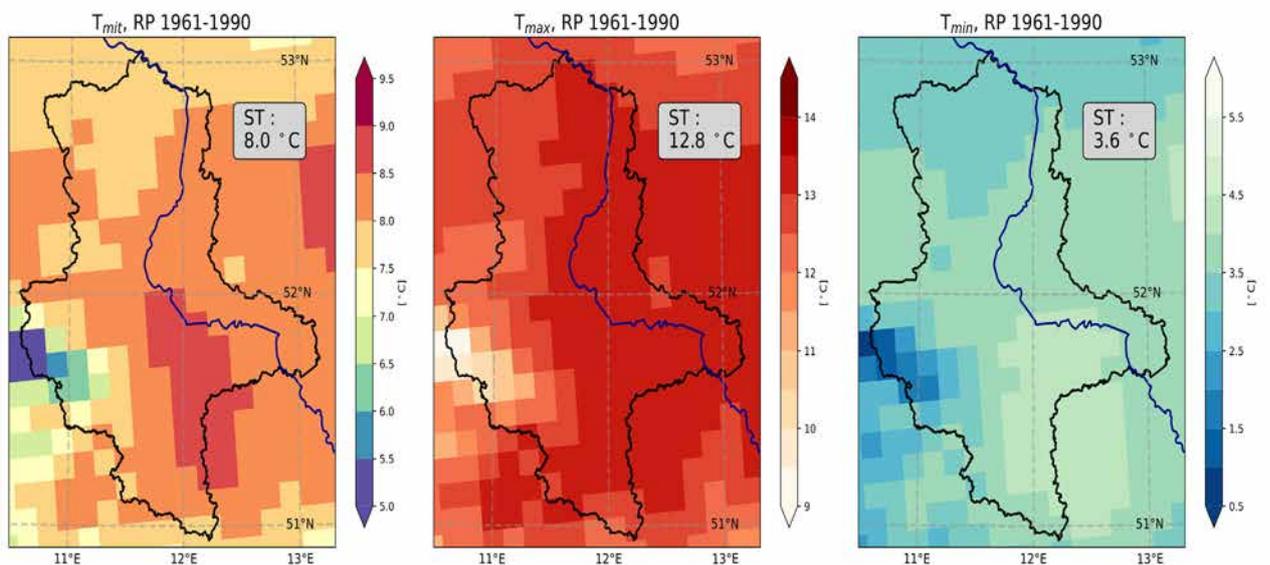


Abbildung 3.3: Mittelwerte des Frühlings (März, April, Mai) von T_{mit} , T_{max} und T_{min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben rechts angegeben.

Das T_{max} liegt in der Osthälfte des Bundeslandes im Mittel bereits über 13 °C. Im Gegensatz zum Ost-West-Gradienten des T_{max} weist das T_{min} einen Nord-Süd-Gradienten auf, mit Werten von 3,4 °C in der Region Altmark-Wendland R01 und 3,8 °C bzw. 3,9 °C im südlichen (R06) und östlichen Sachsen-Anhalt (R05, Abb. 3.3). Die kühleren T_{min} im Norden des Landes werden

durch die Nähe zu den kalten Wassern von Nord- und Ostsee begünstigt, welche herangeführten Luftmassen noch viel Wärme entziehen können. In gewissem Maße weist die Altmark einen leicht maritim gedämpften Jahresgang auf.

Sommermittel (JJA) der Temperatur für die RP 1961-1990

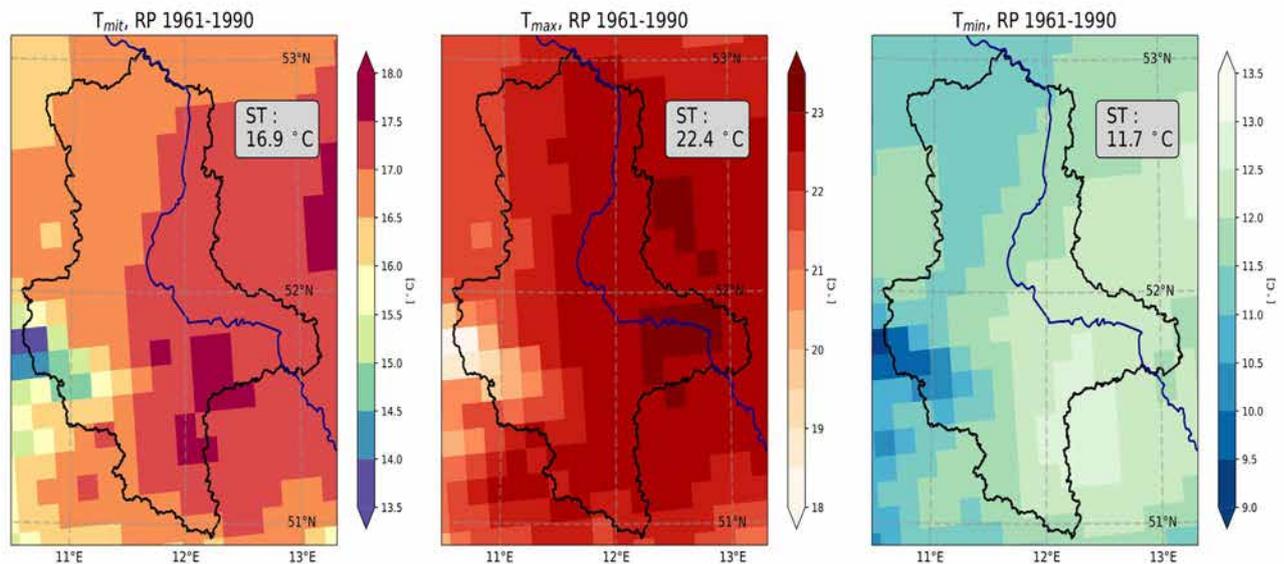


Abbildung 3.4: Mittelwerte des Sommers (Juni, Juli, August) von T_{mit} , T_{max} und T_{min} für die RP 1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben rechts angegeben.

Abbildung 3.4 zeigt für den Sommer einen Gradienten von kühleren Werten im Nordwesten von Sachsen-Anhalt im Wendland und der Altmark (R01) und der Magdeburger Börde (R04) zu höheren Temperaturen im südlichen und östlichen Sachsen-Anhalt (in R06 und R05). Das T_{mit} nimmt von 16,8 °C im Wendland und der Altmark (R01) und der Magdeburger Börde (R04) auf 17,3 °C im östlichen Sachsen-Anhalt (R05) zu, während lokal bis zu 17,8 °C erreicht werden (Abb. 3.4). Beim T_{max} ist der Gradient noch deutlicher und beträgt 0,7 K zwischen der Magdeburger Börde (R04, 22,2 °C) und dem östlichen Sachsen-Anhalt (R05, 22,9 °C). Lokal werden im Fläming mittlere T_{max} von bis zu 23,2 °C erreicht. Beim T_{min} ergibt sich ein ähnliches Bild mit einem Wert von 11,3 °C im Wendland und der Altmark (R01) und 12,1 °C im südlichen Sachsen-Anhalt R06. Die mildesten T_{min} werden mit 12,6 °C im Bereich der Landesgrenze zu Sachsen nahe Halle (Saale) erreicht. Es ist auffällig, dass die die Gebiete mit der höchsten T_{max} und T_{min} nicht in derselben Region liegen, wenn auch der Unterschied in der Differenz zwischen T_{min} und T_{max} gering ist.

Herbstmittel (SON) der Temperatur für die RP 1961-1990

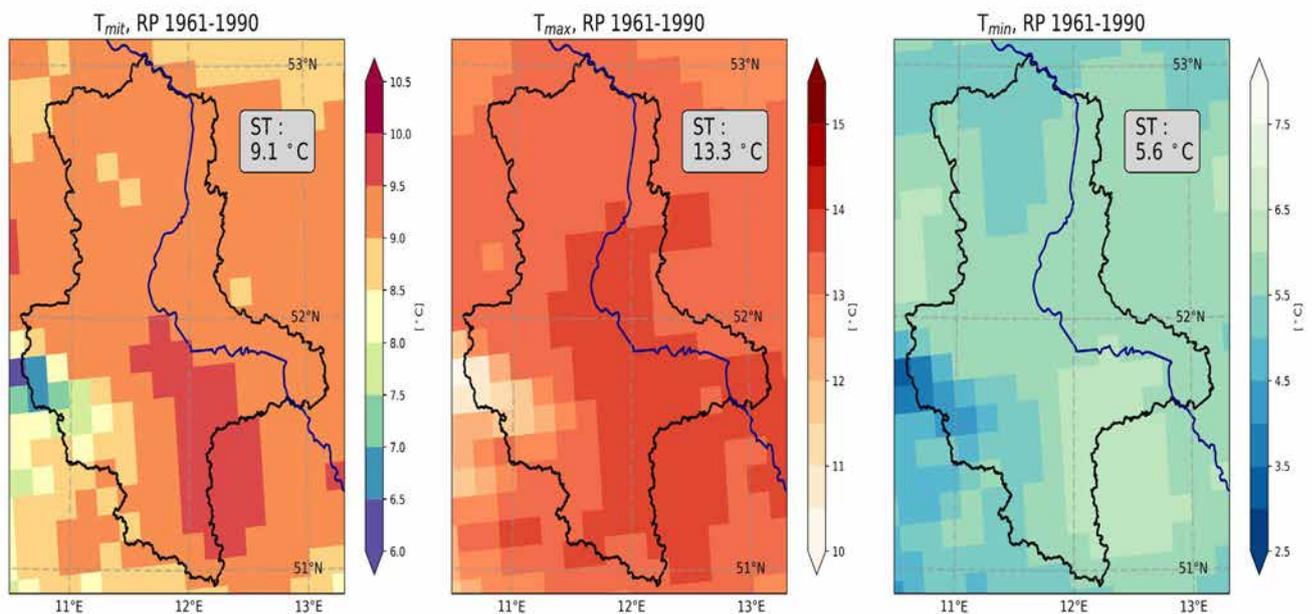


Abbildung 3.5: Mittelwerte des Herbstes (September, Oktober, November) von T_{mit} , T_{max} und T_{min} für die RP1961-1990 von links nach rechts. Die Gebietsmittel für das Land Sachsen-Anhalt sind jeweils oben recht angegeben.

Die Mitteltemperatur des Herbstes beträgt $9,1\text{ °C}$, das mittlere T_{max} liegt bei $13,3\text{ °C}$ und das mittlere T_{min} bei $5,6\text{ °C}$ (Abb. 3.5). Die flächige Verteilung der Temperatur in den tief liegenden Regionen ist sehr einheitlich und die Flächenmittel der einzelnen Regionen weichen nur marginal voneinander ab. Für alle Mitteltemperaturen beträgt die Spanne zwischen der kühlgsten und mildesten Region außerhalb des Harzes nur $0,3\text{ K}$.

In Tabelle 3.6 sind die Ergebnisse der Regionalisierung für die mittleren Temperaturen für alle Regionen und saisonalen Auswertungszeiträume aufgelistet. In dieser Übersicht wird erneut deutlich, dass die Variabilität der Temperatur innerhalb der tief liegenden Regionen Sachsen-Anhalts verhältnismäßig gering ist. Die Temperaturdifferenz zwischen der kühlgsten und mildesten Region - ohne Harzregionen - beträgt maximal $0,5\text{ K}$ im Sommer und minimal $0,1\text{ K}$ im Winter. Der Temperaturunterschied zwischen Oberharz und dem Landesmittel bedingt durch den Höhenunterschied beträgt im Sommer 3 K für T_{mit} und 4 K für T_{max} und ist damit im Jahresgang am größten. Geringere Bewölkung und höhere Labilität sorgen für einen größeren vertikalen Temperaturgradienten, zumal auch die relative Luftfeuchtigkeit im Sommer tiefer liegt als im Winter, und damit der vertikale Temperaturgradient größer ist. Im Winter liegt der Temperaturunterschied zwischen Oberharz und Landesmittel bei $1,9\text{ K}$ für sowohl das T_{max} und das T_{mit} und ist am kleinsten im Jahresverlauf. Dies wird neben dem geringeren vertikalen Temperaturgradienten durch höhere Luftfeuchtigkeit auch durch eine Häufung von Inversionswetterlagen verursacht, bei der in extrem stabiler Schichtung milde Luft oberhalb von bodennaher kalter Luft liegt.

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Regionalisierung für die Mitteltemperaturen. Es sind T_{\max} in Rot, T_{mit} in schwarz und T_{\min} in blau aufgeführt.

Zeitraum	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Jahr	12,9	13,0	9,9	11,4	12,9	13,2	13,0
	8,7	8,6	6,2	7,3	8,7	8,9	8,8
	4,7	4,5	2,8	3,5	4,7	4,9	4,9
Winterhalbjahr	6,3	6,4	4,1	5,2	6,5	6,5	6,4
	3,1	3,2	1,1	2,0	3,3	3,2	3,2
	0,1	0,2	-1,6	-0,9	0,2	0,3	0,2
Sommerhalbjahr	19,5	19,6	15,7	17,6	19,4	20,0	19,6
	14,2	14,1	11,2	12,6	14,2	14,5	14,4
	9,2	8,9	7,1	8,0	9,2	9,5	9,5
Winter	3,0	3,1	1,1	2,0	3,2	3,0	3,1
	0,4	0,5	-1,5	-0,7	0,5	0,4	0,4
	-2,3	-2,2	-4,0	-3,4	-2,2	-2,3	-2,2
Frühling	12,8	12,9	9,2	11,0	12,7	12,9	13,2
	8,0	8,0	5,1	6,5	8,1	8,2	8,3
	3,6	3,4	1,4	2,3	3,6	3,9	3,8
Sommer	22,4	22,4	18,4	20,4	22,2	22,9	22,5
	16,9	16,8	13,9	15,3	16,8	17,3	17,1
	11,7	11,3	9,6	10,5	11,7	12,0	12,1
Herbst	13,3	13,3	10,6	12,0	13,4	13,6	13,5
	9,1	9,1	6,9	7,9	9,3	9,3	9,3
	5,6	5,5	3,9	4,6	5,7	5,8	5,7
Vegetations-Periode I	17,4	17,5	13,6	15,4	17,2	17,9	17,4
	12,2	12,1	9,1	10,6	12,2	12,5	12,4
	7,1	6,8	4,9	5,9	7,1	7,4	7,5
Vegetations-Periode II	21,6	21,6	17,8	19,7	21,5	22,0	21,8
	16,1	16,0	13,3	14,6	16,1	16,4	16,4
	11,2	10,9	9,3	10,0	11,2	11,5	11,6

Der Tagesgang der Temperatur ist im Sommer am größten und im Winter am niedrigsten mit 10,7 K im Sommer und 5,3 K im Winter für das Landesmittel. Der Betrag des Tagesganges nimmt in den höheren Lagen etwas ab und ist im Frühling größer als im Herbst bedingt durch häufigere Ausbrüche noch kalter Luftmassen aus nördlichen Breiten im Frühling.

Der Jahrgang der Temperatur nimmt von Westen nach Osten zu und damit bestätigt die Auswertung von HYRAS die kontinentalere (maritimere) Neigung des Klimas im Osten (Westen) der Region. In der Magdeburger Börde sowie dem Wendland und der Altmark schwankt das T_{mit} zwischen Winter und Sommer um 16,3 K, während diese Schwankung im Östlichen Sachsen-Anhalt auf 16,9 K zunimmt.

Im Vergleich zu Orten auf ähnlicher geographischer Breite, weist Sachsen-Anhalt ein verhältnismäßig mildes Winterklima und gemäßigttes Sommerklima auf. Orte auf ähnlicher geographischer Breite können im Winter besonders im inneren Bereich Asiens (Sibirien) Wintertemperaturen von -15 °C aufweisen, wie z.B. Irkutsk. Auch die Ostküsten der Kontinente weisen auf gleicher Breite deutlich kältere Winter auf mit z.B. -6 °C in Petropawlowsk in Kamtschatka. Lediglich die unmittelbaren Westküstenklimate sind noch milder mit 3 bis 4 °C etwa in St. Rupert, Kanada oder in Den Haag, Niederlande in den Wintermonaten.

3.2 Temperaturkenntage

Der Klimazustand bezüglich der Temperatur kann auch anhand einer Zahl von meteorologischen Kenntagen beschrieben werden, insbesondere Hitze- und Kältebelastungen, also die extremen Temperaturbereiche werden mit solchen Kenntagen beschrieben. Für land-, bauwirtschaftliche sowie Fragen der Arbeitsbelastung und thermischer Gesundheitsbelastung können solche Kenntage herangezogen werden. Die Anzahl der Eistage, das sind Tage mit $T_{max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, liegt im landesweiten Durchschnitt der RP bei 25,5 (Abb. 3.6). Die Anzahl der Eistage im HYRAS-Datensatz ist in den tiefen Lagen von Sachsen-Anhalt gleichmäßig verteilt, während sie mit der Höhe zunimmt und bei über 33 im Unterharz und über 43 im Oberharz liegt (Tab. 3.7). Es ist festzustellen, dass die Eistage sehr mit der Höhenlage im Zusammenhang stehen, was in den südlichen Hügellagen, dem hohen Fläming, der Dübener Heide und den Höhenzügen der Börde zu lokalen Maxima der Eistage führt.

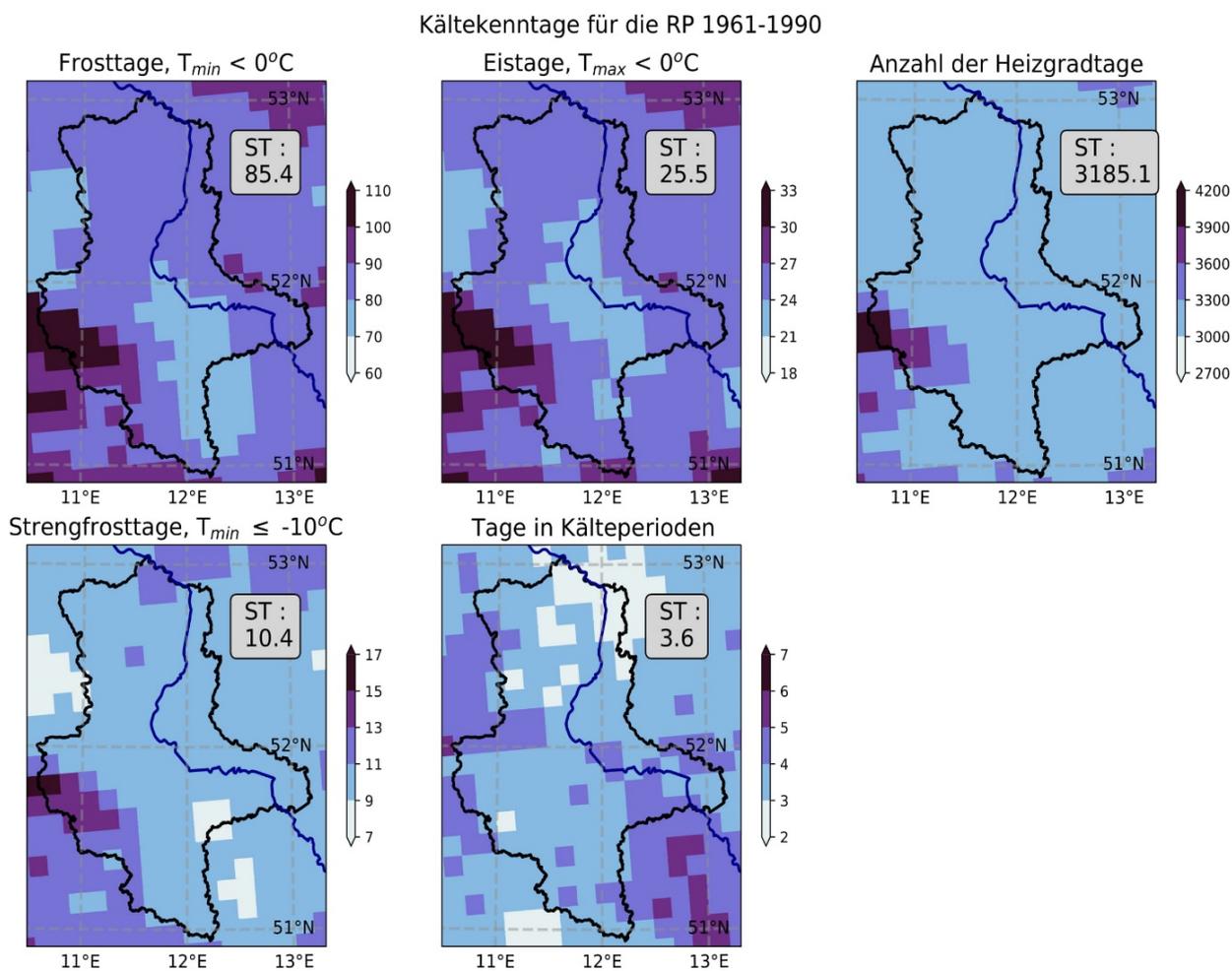


Abbildung 3.6: Anzahl von thermischen Kenntaggrößen. Dargestellt sind von oben links: Eistage, Frosttage, Heizgradtage, Strengfrosttage und die jährliche Anzahl von Tagen in Kälteperioden. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Die Anzahl der Frosttage ist ebenfalls ähnlich verteilt, mit etwas geringeren Werten in der Leipziger Tieflandbucht und der westlichen Altmark (Abb. 3.6). Das Landesmittel liegt bei etwa 85 Frosttagen und die Variabilität innerhalb der einzelnen Regionen außerhalb des Harzes ist gering, mit 82 Frosttagen in R04 und 86 in R01. Im Harz treten mehr als 100 Frosttage auf, im Unterharz im Mittel 107 und im Oberharz 123 Frosttage pro Jahr (Tab. 3.7). Der Anteil der Eistage am Gesamtjahr beträgt rund 7 % und bei den Frosttagen sind es 23 %, im Oberharz

sind es jeweils 12 % bzw. 34 %. In Abbildung 3.6 sind die durchschnittlichen jährlichen Heizgradtage dargestellt, welche eine Maßeinheit für aufzuwendende Heizenergie sind. Der Landesdurchschnitt liegt bei 3185 und variiert zwischen 3128 in R06 und 4003 in R02 (Abb. 3.6). Damit wird im Harz etwa ein Drittel mehr Heizenergie benötigt als in den tiefen Lagen von Sachsen-Anhalt. Die geringsten Heizenergiebedarfe bestehen in der Umgebung der Leipziger Tieflandbucht. Die Heizgradtage können verwendet werden, um Heizenergiebedarf und Heizkosten zu berechnen. Für diesen Parameter hat die Analyse des Klimawandels in der Vergangenheit bereits einen starken negativen Trend seit der RP identifiziert, was ein Signal für relativ mildere Winter seit Ende der RP ist (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016). Ebenfalls in Abbildung 3.6 dargestellt ist die Anzahl der Strengfrosttage mit einem $T_{\min} < -10\text{ °C}$, welche im Flächenmittel rund 10 pro Jahr beträgt und in den tief liegenden Regionen in der Leipziger Tieflandbucht mit rund 8 Tagen am niedrigsten und im nördlichen Wendland sowie am Südrand des Unterharzes mit bis zu 12 Strengfrosttagen am höchsten ausfällt. Im Oberharz werden bis zu 15 Strengfrosttage verzeichnet. Die Anzahl der Tage in Kälteperioden beträgt 3,6 im Landesmittel und liegt landesweit zwischen 3 und 5 (Abb. 3.6).

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Regionalisierung für thermische Kenntaggrößen. Es sind Eistage, Frosttage, Heizgradtage, Strengfrosttage und Tage in Kälteperioden aufgeführt. Berechnungsvorschriften können in Tabelle 2.3 nachgeschlagen werden.

Kenntaggröße	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Eistage	25,5	24,4	43,9	33,6	24,9	24,4	25,6
Frosttage	85,4	85,6	123,0	107,0	82,3	83,1	83,9
Heizgradtage	3185,1	3181,7	4003,0	3609,3	3156,9	3128,0	3149,1
Strengfrosttage	10,4	10,3	15,1	13,6	10,1	10,0	10,3
Kälteperioden	3,6	3,2	4,3	3,5	3,7	3,6	3,7

Die regionale Auswertung der Heizgradtage macht deutlich, dass die Aufwendungen für Heizenergie in den tief liegenden Regionen sehr ähnlich sind mit Werten zwischen 3100 und 3200 K pro Jahr, während diese Werte im Unterharz um etwa 14 % und im Oberharz um etwa 30 % höher sind als das Landesmittel (Tab. 3.7). Auch hier zeigt die regionale Auswertung erneut, dass in den tief liegenden Regionen des Landes die thermischen Klimakenngrößen für tiefe Temperaturkennwerte sehr ähnlich sind und die Höhenlage der bestimmende Faktor der Variabilität ist.

Die Auswertung der Kenntaggrößen im warmen bzw. heißen Spektrum der Temperaturbandbreite ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Bei der Auswertung von Sommertagen, Hitzetagen und den Tagen mit starker Hitzebelastung ist zu erkennen, dass deren Anzahl von Westen nach Osten zunimmt und naturgemäß im Harz am niedrigsten ist. Im Landesmittel werden etwa 32 Sommertage registriert, 5,6 Hitzetage und etwa 1 Tag mit starker Hitzebelastung (Abb. 3.7). Tropennächte sind in der RP so gut wie nie verzeichnet worden, das Landesmittel liegt bei 0,1 Tropennacht. Die Anzahl der Tage in Wärmeperioden liegt bei 5,5 Tagen, dabei nimmt deren Anzahl von Westen nach Osten ab. Die Zunahme der Indikatoren für Hitzebelastung von Westen nach Osten und die Abnahme der Anzahl von Tagen in Wärmeperioden von Westen nach Osten lässt darauf schließen, dass Wärmeperioden im Westen des Landes zwar länger andauern, aber im Osten des Landes häufiger hohe Temperaturen durch Advektion besonders warmer Luftmassen auftreten. Dass Hitzeperioden sich in der RP hauptsächlich auf den Osten und Südosten des Landes ausgewirkt haben, ist an der Anzahl der Kühlgradtage in Abb. 3.7 erkennbar: Im östlichen Sachsen-Anhalt beträgt diese bis zu 8 K, während sie in der Altmark bei etwa 5 K liegt und damit um 40 % geringer ist.

Insgesamt zeigt die geringe Höhe der Kühlgradtage, dass in Sachsen-Anhalt große Hitzebelastungen nicht üblicherweise Bestandteil des Klimas der Referenzperiode sind.

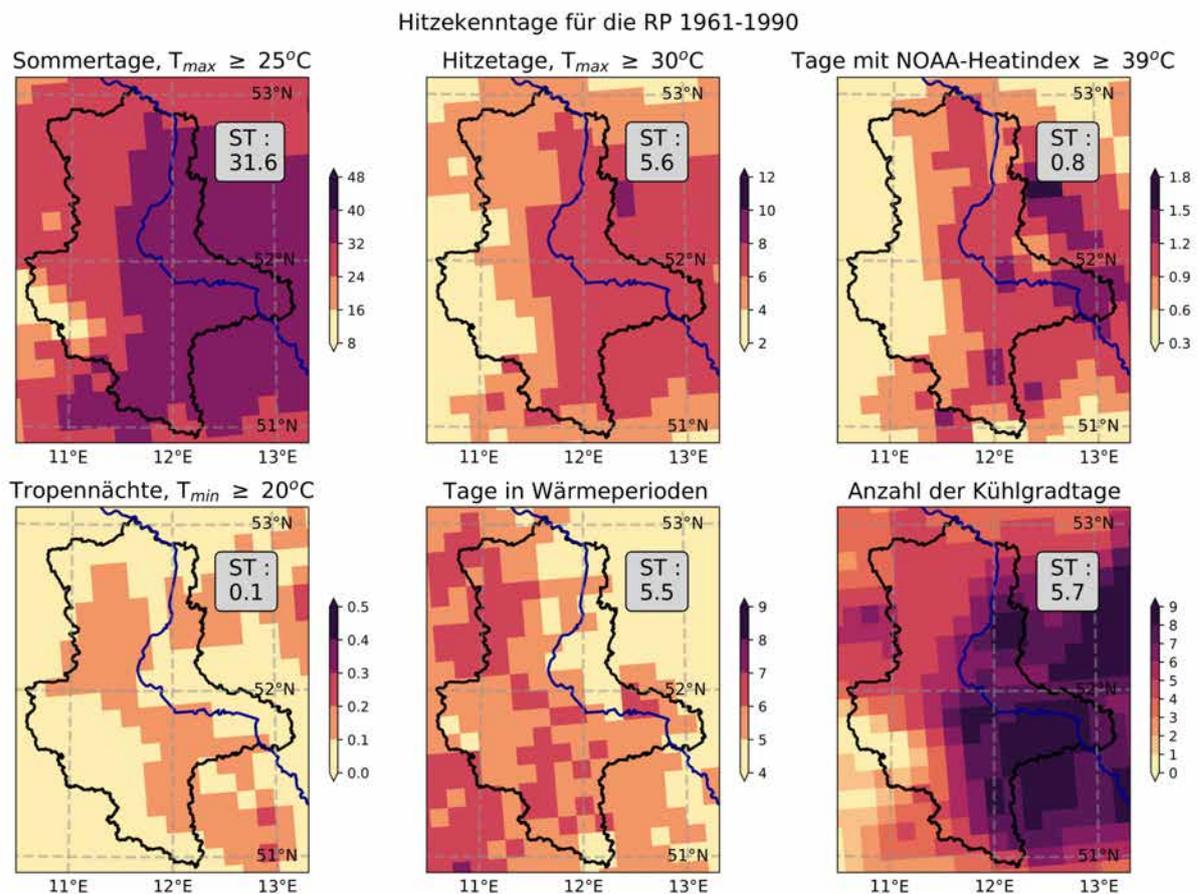


Abbildung 3.7: Anzahl von thermischen Kenntaggrößen. Dargestellt sind von oben links: Sommertage, Hitzetage, Tage mit NOAA-Heatindex > 39 °C, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und Kühlgradtage. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Regionalisierung für thermische Kenntaggrößen. Es sind Sommertage, Hitzetage, Tage mit starker Hitzebelastung, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und Kühlgradtage aufgeführt. Berechnungsvorschriften können in Tabelle 2.3 nachgeschlagen werden.

Kenntaggröße	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Sommertage	31,6	30,6	8,5	17,7	30,0	35,7	33,3
Hitzetage	5,6	5,5	0,2	1,6	4,9	7,0	5,8
Starke Hitzebelastung	0,8	0,8	0,0	0,2	0,6	1,1	0,9
Tropennächte	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Wärmeperioden	5,5	5,6	5,0	5,6	5,8	5,1	5,8
Kühlgradtage	5,7	4,8	0,3	1,2	4,8	7,6	5,9

Im Gegensatz zur regionalen Verteilung der kalten Kenntage sind die Kenntage auf der warmen Seite des Spektrums regional eindeutig differenziert auch in den tiefer liegenden Regionen des Landes (Tabelle 3.8). Dabei liegt die Anzahl der Sommertage in R05 um etwa 13 %, die der Hitzetage um etwa 25 % und die Anzahl der Tage mit starker Hitzebelastung um etwa 35 % höher als im Landesmittel (Tab. 3.8). Die regionale Auswertung zeigt auch, dass große Hitzebelastungen im Klima der RP sehr selten sind und in den Mittelgebirgsregionen extrem selten auftreten. Die Verteilung der Sommer-, Hitze- und Tagen mit starker Hitzebelastung ist räumlich sehr ähnlich zur Verteilung der mittleren Temperaturen im Sommer (Abb. 3.7).

Die geringe Hitzebelastung des Klimas der RP und auch historisch in Sachsen-Anhalt hat dazu geführt, dass eine Infrastruktur zur Kühlung von Gebäuden und Räumen so gut wie nicht vorhanden ist. Angesichts von bis zu 30 Hitzetagen im Landesmittel im Jahr 2018, das ist mehr als 5-mal so viel wie im Mittel der RP, führt die längere Andauer von Hitzeperioden zu höheren Innenraumtemperaturen und erhöhter Hitzebelastung, was gesundheitlich problematisch werden kann und zur Verfehlung von Richtlinien zum Arbeitsschutz führt. Die Vorstudie aus dem Jahr 2016 kommt bereits zu dem Ergebnis, dass die Hitzebelastung seit den Jahren der RP deutlich angestiegen ist (Spekat, Einfalt, & Jackisch, 2016), sodass das Klima der RP als untere Grenze des Möglichen in Bezug auf die Hitzebelastung angesehen werden kann. Besonders in urbanen Bereichen Sachsen-Anhalts – das sind hauptsächlich die Stadt Magdeburg und die sich zu einer Metropolregion entwickelnde Region Halle-Leipzig, mit Halle an der Saale in Sachsen-Anhalt – in denen die Dichte der Messstationen mit WMO konformen Bedingungen gering ist, ist die Anzahl der Tropennächte gerade in den letzten Jahren stark gestiegen. So erlebte etwa die Messstation Wittenberg im Stadtzentrum in den Jahren von 2018 bis 2020 zwischen 2 und 10 Tropennächten. Berlin Marzahn als Beispiel für eine außerhalb von Sachsen-Anhalt, aber repräsentativ für innerstädtische Lagen liegende Station, erfasste zwischen 8 und 10 Tropennächten in diesem Zeitraum. Eine Erfassung solcher Kenngrößen zur Hitzebelastung an Standorten mit klimatologischer Relevanz wie z. B. den Innenstädten ist daher notwendig, um die Auswirkungen des Klimawandels besser verstehen zu können.

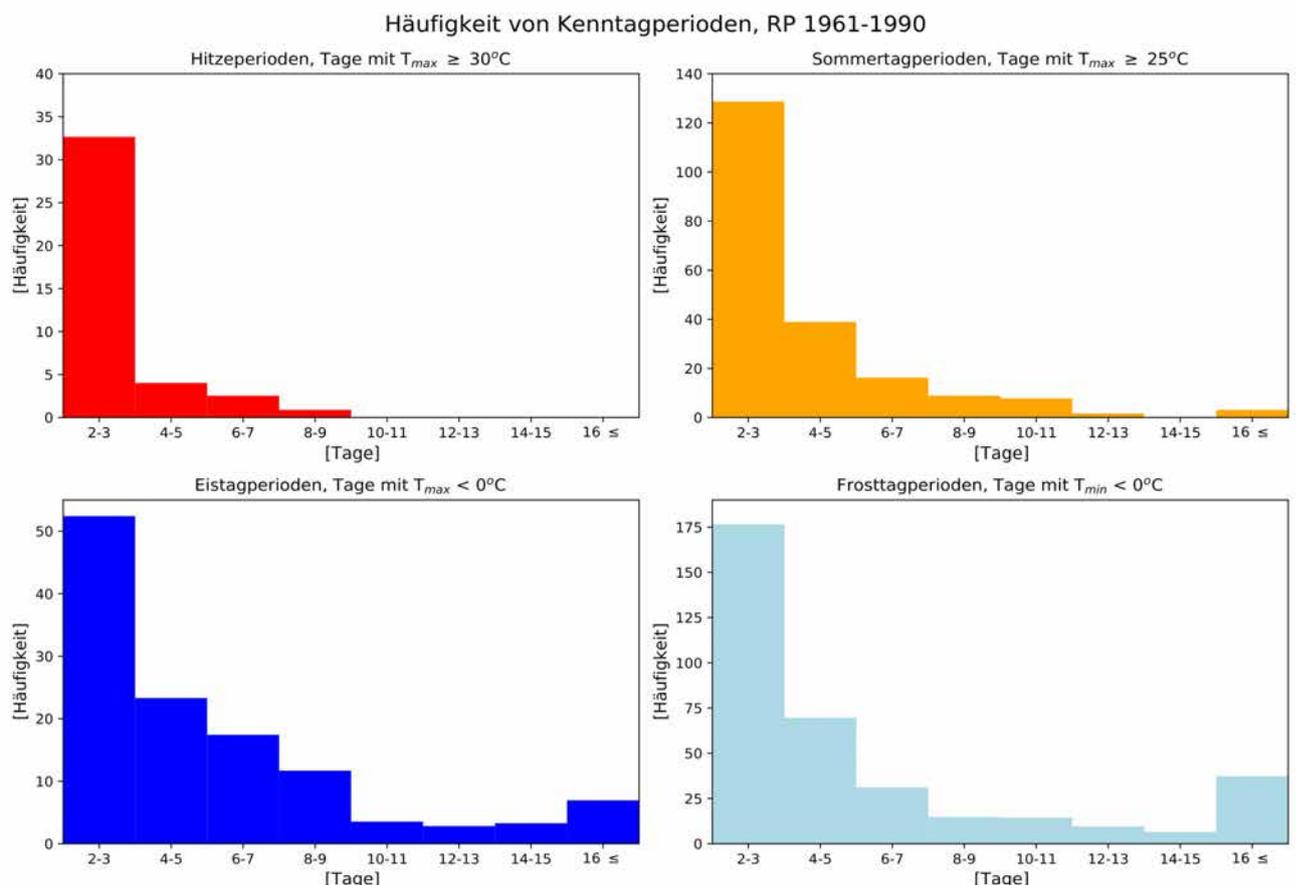


Abbildung 3.8: Anzahl von Perioden mit Kenntagen in der RP.

Dass die Zahlen für Hitzebelastung aus der RP bereits für die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas obsolet sind, kann auch an der in Abbildung 3.8 dargestellten Häufigkeit der Andauer von Kenntagperioden abgeleitet werden. Perioden mit Hitzetagen sind in Sachsen-Anhalt in der Regel sehr kurz und schon Hitzewellen mit mehr als 4 Hitzetagen in Folge sind in der RP nur

etwa 8-mal registriert worden. Hitzeperioden mit mehr als 10 Hitzetagen in Folge gab es nicht in der RP. Ähnlich sieht der Verlauf für die Perioden mit Sommertagen aus, wenn auch vereinzelte Perioden mit mehr als 16 Sommertagen in der RP aufgetreten sind (Abb. 3.8). Jedoch sind schon Wärmeperioden mit mehr als 6 Sommertagen insgesamt weniger als 40-mal aufgetreten. Lang-anhaltende Perioden mit Eistagen und Frosttagen sind in der RP verhältnismäßig häufig aufgetreten. Mehr als 10 Eistage in Folge sind etwa 15-mal festgestellt worden, während mehr als 10 Frosttage in Folge etwa 60-mal festgestellt wurden, davon allein mehr als 30 Perioden mit mindestens 16 Frosttagen in Folge.

3.3 Extremtemperaturen

Die Auswertung der Extremtemperaturen umfasst das 1. Perzentil und das mittlere jährliche Minimum für das untere Ende des Temperaturspektrums der RP und das 99. Perzentil sowie das mittlere jährliche Maximum für das obere Ende des Spektrums. Das 1. Perzentil fasst die etwa vier kältesten und das 99. Perzentil die vier wärmsten Tage eines Jahres zusammen. In Abbildung 3.9 ist das untere Ende des Spektrums dargestellt. Das 1. Perzentil des T_{max} liegt bei $-6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, des T_{mit} bei $-9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und des T_{min} bei $-14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Werte des mittleren jährlichen Minimums sind jeweils noch etwa $1,5\text{ K}$ tiefer.

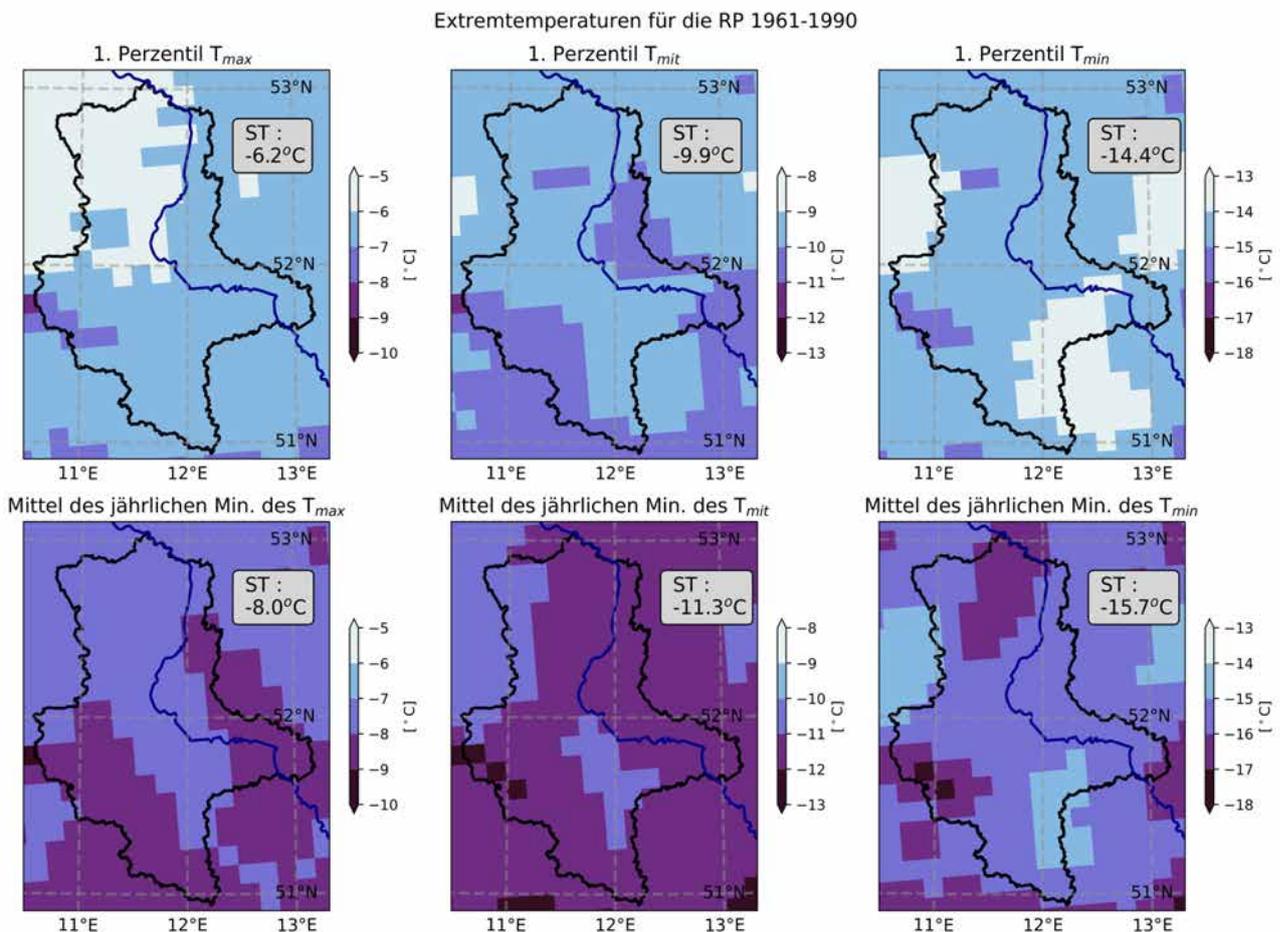


Abbildung 3.9: Darstellung des 1. Perzentils (obere Reihe) und des mittleren jährlichen Minimums (untere Reihe) für, von links nach rechts: T_{max} , T_{mit} und T_{min} . Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Die geografische Verteilung der Werte ist relativ einheitlich und auch der Einfluss der Höhenlage des Harzes ist geringer als bei den mittleren Temperaturen. Dies dürfte daran liegen, dass extrem kalte Wetterlagen zur Bildung einer Inversion neigen mit der kältesten Luft in Bodennähe. Die Differenz der extrem tiefen Temperaturwerte zwischen Oberharz und

Landesmittel liegt bei jeweils etwa 1 K und die Differenz zwischen der kältesten und am wenigsten kalten Tieflandregion liegt mit 0,3 bis 0,7 K nur etwas darunter (Tabelle 3.10).

Tabelle 3.9: Ergebnisse der Regionalisierung für Temperaturextreme. Berechnungsvorschriften können in Tabelle 2.4 nachgeschlagen werden.

Kenntaggröße	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Kalte Extremtemperaturen							
1. Perzentil T_{max}	-6,2	-5,9	-7,4	-7,0	-6,1	-6,2	-6,6
1. Perzentil T_{mit}	-9,9	-9,8	-10,7	-10,5	-9,7	-10,0	-10,0
1. Perzentil T_{min}	-14,4	-14,5	-15,0	-15,1	-14,3	-14,4	-14,0
Mittl. Jährl. Min. T_{max}	-8,0	-7,6	-8,6	-8,4	-7,9	-8,0	-8,1
Mittl. Jährl. Min. T_{mit}	-11,3	-11,1	-12,1	-11,9	-11,1	-11,3	-11,3
Mittl. Jährl. Min. T_{min}	-15,7	-16,0	-16,6	-16,6	-15,5	-15,7	-15,3
Warme Extremtemperaturen							
99. Perzentil T_{max}	30,7	30,7	26,6	28,4	30,5	31,2	30,8
99. Perzentil T_{mit}	23,3	23,1	20,8	21,6	23,3	23,8	23,4
99. Perzentil T_{min}	16,7	16,4	14,8	15,5	16,6	17,1	17,1
Mittl. Jährl. Max. T_{max}	32,4	32,4	28,3	30,2	32,2	33,1	32,7
Mittl. Jährl. Max. T_{mit}	24,8	24,6	22,2	23,2	24,7	25,3	25,0
Mittl. Jährl. Max. T_{min}	18,2	17,9	16,2	16,9	18,1	18,5	18,4

Die in Abbildung 3.10 dargestellte Verteilung der 99. Perzentile und Maxima der Temperaturen folgt der Verteilung der mittleren Temperaturen im Sommer mit höheren Werten im Osten des Landes und tieferen im Westen des Landes.

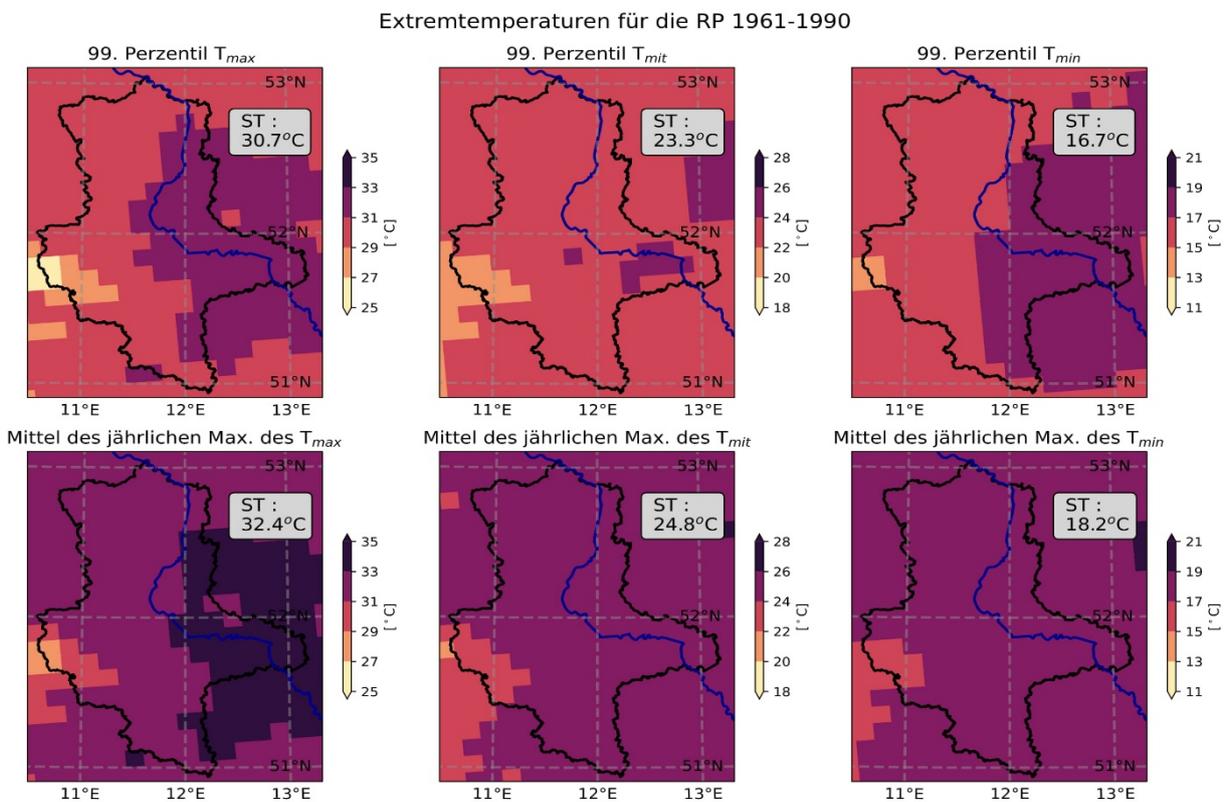


Abbildung 3.10: Darstellung des 99. Perzentils (obere Reihe) und des mittleren jährlichen Maximums (untere Reihe) für, von links nach rechts: T_{max} , T_{mit} und T_{min} . Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Das durchschnittliche jährliche Maximum des T_{\min} liegt mit etwa 18 °C etwa 2 K unter einer Tropennacht. Die höhenbedingten Unterschiede der oberen Extremtemperaturen zwischen Oberharz und Landesmittel liegen bei etwa 4 K für T_{\max} , 2,5 K für T_{mit} und 2 K für T_{\min} (Tab. 3.9). Dies liegt etwas unter den Unterschieden der Mitteltemperaturen und deutet darauf hin, dass extrem hohe Temperaturen im Oberharz an Tagen mit stabiler Luftschichtung und einem geringeren vertikalen Temperaturgradienten erreicht werden. Innerhalb der tiefer liegenden Regionen liegen die Unterschiede zwischen der kühlgsten und wärmsten Region bei etwa 0,5 bis 1 K zwischen Magdeburger Börde oder Wendland und Altmark auf der kühlen Seite und dem östlichen Sachsen-Anhalt als der wärmsten Region (Tab. 3.9).

Deutlich wird angesichts der Temperaturextreme auch, dass im südlichen und östlichen Sachsen-Anhalt die Kontinentalität, also der jahreszeitliche Gegensatz, etwas stärker ausgeprägt ist als im Nordwesten des Bundeslandes. Die Differenz zwischen dem P99 des T_{\max} und dem P01 des T_{\min} beträgt rund 45,6 K in R05 und 44,8 K in R04. Die Schwankungsbreite des winterlichen Temperaturniveaus ist auch deutlich größer als im Sommer, was die Differenz zwischen dem P99 des T_{\max} und der mittleren T_{\max} im Sommer von 8,3 K zeigt, während die Differenz zwischen dem mittleren T_{\min} des Winters und dem P01 des T_{\min} rund 12,1 K beträgt, also 50 % größer ist. Die Winter sind in Sachsen-Anhalt häufig von der Zufuhr milder Meeresluft geprägt und weisen daher verhältnismäßig milde Mitteltemperaturen auf, während die Zufuhr kontinentaler oder arktischer Luftmassen, die Temperatur sehr stark absinken lassen kann.

3.4 Thermische Vegetationsperiode

Die Länge der Vegetationsperiode und deren Beginn als Kalendertag ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass die Vegetationsperiode in der Leipziger Tieflandbucht und entlang des Elbtals etwa 5 bis 10 Tage länger ist als in den anderen Tieflandregionen. Die durchschnittliche Länge beträgt rund 246 Tage, was etwa zwei Drittel des Gesamtjahres ausmacht, in den Hochlagen des Harzes sind es unter 200 Tagen und damit nur knapp die Hälfte des Jahres.

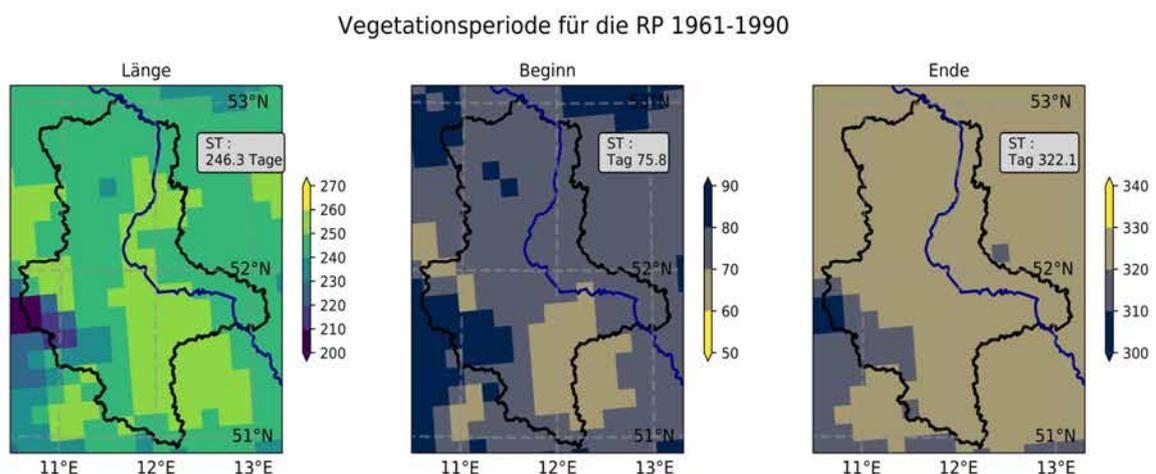


Abbildung 3.11: Darstellung der thermischen Vegetationsperiode in der RP. Von links nach rechts: Länge, Beginn und Ende der thermischen Vegetationsperiode. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Der Beginn der Vegetationsperiode liegt im Landesdurchschnitt am 76. Kalendertag, was in der Regel um den 18. März liegt, wobei die Vegetationsperiode von Süden her kommend nach Norden voranschreitet. Dies ist konsistent mit der zögerlichen Erwärmung der Meere Ostsee und Nordsee, die am nächsten zu den nördlichen Regionen des Landes liegen und am

weitesten von den südlichen Regionen entfernt sind. Die im Frühjahr verzögerte Erwärmung dieser Meere dämpft die Oberflächentemperaturen in angrenzenden und nahe liegenden Landmassen. Im Oberharz beginnt die Vegetationsperiode erst nach 100 oder mehr Kalendertagen, also im Verlauf des Aprils (Abb. 3.11). Es dauert etwa 10 Tage für den Beginn der Vegetationsperiode, von der Leipziger Tieflandbucht nach Norden auszugreifen. Die Vegetationsperiode endet etwa am Kalendertag 322, was dem 18. November entspricht. Das Ende der Vegetationsperiode findet landesweit relativ einheitlich statt, in den höheren Lagen des Harzes tritt es erwartungsgemäß etwa 10 bis 20 Tage früher ein (Abb. 3.11). Im Spätherbst auftretende Kaltlufteinbrüche finden oft verbreitet im gesamten Land statt und treten plötzlich ein, im Gegensatz zur eher zögerlichen und schrittweisen Erwärmung im Frühling.

3.5 Niederschlagsmengen

Mit rund 545 mm durchschnittlichem Jahresniederschlag in der RP ist Sachsen-Anhalt das trockenste Bundesland in ganz Deutschland, obwohl der Oberharz als einer der nassesten Regionen heraussticht (Abb. 3.12). Im Regenschatten des Harzes fallen etwa 470 bis 500 mm Niederschlag, während die Jahresmenge in den anderen Regionen 500 bis 550 mm beträgt. Folglich sind R04 und R06 die trockensten Regionen, während in R01 etwa 5 % mehr Niederschlag fällt. Der Unterharz erhält 670 mm und der Oberharz 1022 mm, die nasseste Gitterzelle wird mit 1350 mm Niederschlag versorgt. Dies ist deutlich weniger als auf dem Brocken durchschnittlich in der RP gefallen ist (1814 mm). Diese Tatsache macht erneut deutlich, dass der HYRAS-Datensatz auf dem EUR11 Gitter für eine Beschreibung des regionalen Klimas gut geeignet ist, jedoch weniger für einen Vergleich von exakten Stationsdaten, was auch nicht der Schwerpunkt dieses Projektes ist.

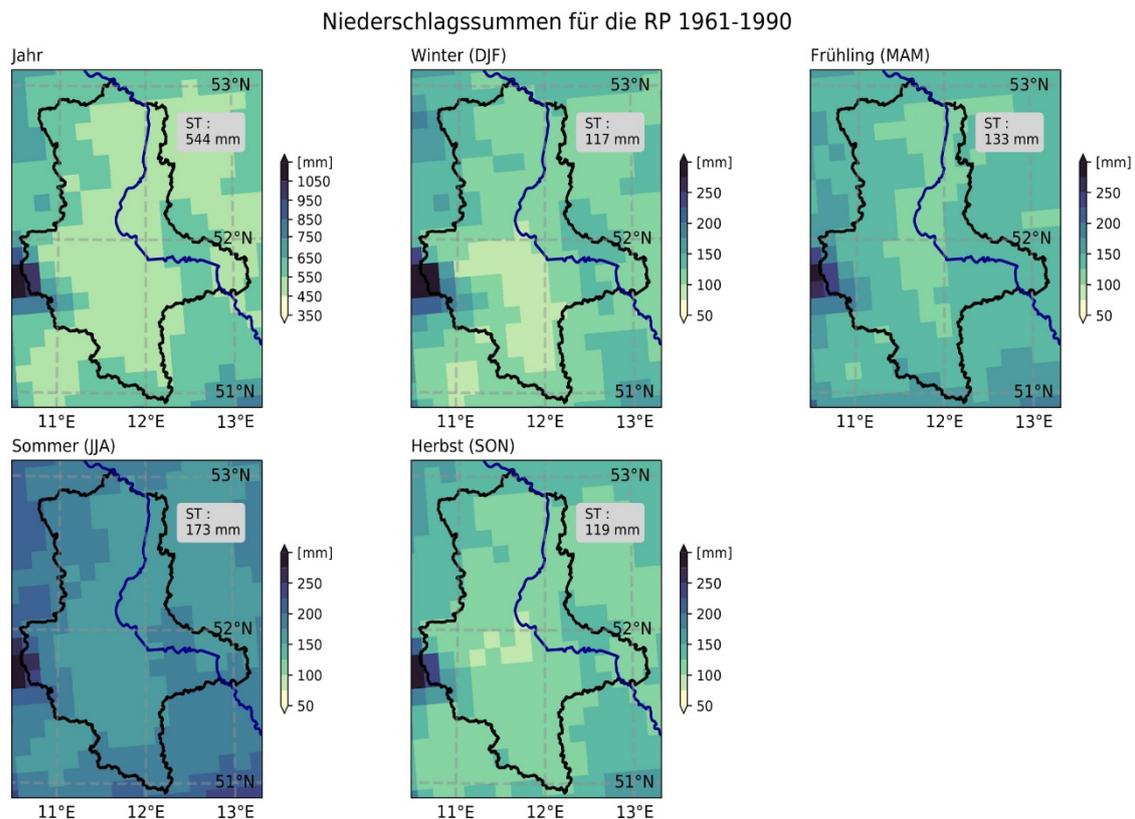


Abbildung 3.12: Durchschnittliche Niederschlagsmengen in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Mit den ermittelten Werten der Niederschlagssumme erhält Sachsen-Anhalt im Vergleich zu anderen Klimaten der temperierten Mittelbreiten wenig Niederschlag. Abgesehen von extrem feuchten Westküstenklimaten wie in Norwegen und Kanada oder auch Neuseeland, erhalten die meisten Mittelbreiten zwischen 500 und 1500 mm Niederschlag pro Jahr.

Bereits auf Abbildung 3.12 ist zu erkennen, dass die umliegenden Bundesländer, besonders südlich und westlich angrenzend, deutlich mehr Niederschlag erhalten. Die geringe Niederschlagsmenge stellt einen kritischen Parameter für Forst- und Landwirtschaft dar, da bereits geringere Änderung große Auswirkungen haben könnten.

Der Niederschlag in Sachsen-Anhalt weist einen deutlichen Jahresgang auf. Dabei treten die geringsten Niederschläge im Winter und Herbst mit jeweils etwa 120 mm im Landesmittel auf (Abb. 3.12). Besonders im Winter, aber auch im Herbst werden regional im Windschatten auf der Ostseite des Harzes weniger als 100 mm Niederschlag registriert, während rund 50 km weiter westlich in den Hochlagen des Harzes mehr als 250 mm Niederschlag fallen. In den Tieflandregionen sind Winter und Herbst die trockensten Jahreszeiten. Im Frühling werden rund 134 mm und im Sommer rund 174 mm Niederschlag registriert (Abb. 3.12).

Die Regionen R01 und R05 außerhalb des direkten Regenschattens des Harzes erhalten etwa 10 % mehr Niederschlag im Herbst und Winter. Im Harz selbst kehrt sich der Jahresgang der Niederschläge mit der Höhenlage um. Während im Unterharz, der Sommer nasser ist als Winter und Frühling und der Herbst mit 148 mm am trockensten (Abb. 3.12), ist der Winter im Oberharz mit 283 mm (Tab. 3.10) nasser als alle anderen Jahreszeiten. Dieser Unterschied in der jährlichen Niederschlagsmenge ist durch die starke Neigung zu dynamischen Westwindwetterlagen im Winter zu erklären. Niederschlagsverstärkung durch Gebirgsstau verstärkt diese Niederschläge erheblich, während die Neigung zu solchen Wetterlagen im Sommerhalbjahr deutlich geringer ist und konvektive Niederschläge einen größeren Anteil am Niederschlagsgeschehen haben. Konvektive Niederschläge können auf der Lee-Seite von Gebirgen durch gegensätzliche Grundwind- und Talwindrichtungen sogar verstärkt werden.

Tabelle 3.10: Ergebnisse der Regionalisierung für die saisonale Auswertung der durchschnittlichen Niederschlagsmengen [mm] in der RP.

Zeitraum	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Jahr	545	549	1022	670	521	536	523
Winterhalbjahr	235	241	544	324	218	234	210
Sommerhalbjahr	310	308	478	346	303	303	312
Winter	118	122	283	166	108	118	102
Frühling	134	128	246	168	132	128	135
Sommer	174	175	255	188	171	171	173
Herbst	120	123	238	148	110	120	113
Vegetations-Periode I	157	151	253	183	157	152	161
Vegetations-Periode II	152	157	225	162	145	151	151

Die regionale Verteilung des Niederschlags ist im Herbst und Winter geprägt vom Regenschatten und des Harzes mit rascher Abnahme der Niederschlagssummen von West nach Ost, während westlich des Harzes generell hohe Niederschlagssummen fallen. Im Frühling und mehr noch im Sommer, wenn die Niederschläge weniger durch turbulente Westwinde herangeführt, sondern durch konvektives Geschehen verursacht werden, ist die räumliche Verteilung einheitlicher mit geringeren Unterschieden. So ist der Oberharz im Sommer rund 45 % feuchter als der Landesdurchschnitt, während diese Differenz im Winter

140 % beträgt, der Harz also mehr als doppelt so viel Niederschlag erhält wie der Rest des Landes (Tab. 3.10).

Die Unterschiede in den für tiefe und höher gelegene Regionen relevanten Niederschlagsprozessen kann sehr gut anhand der in Tabelle 3.10 dargestellten Mengen für das Winter- und Sommerhalbjahr nachvollzogen werden. In allen tief gelegenen Regionen ist das Sommerhalbjahr um etwa 25 % nasser als das Winterhalbjahr, während im Unterharz der Unterschied nur etwa 7 % beträgt und im Oberharz das Sommerhalbjahr 12 % trockener ist als das Winterhalbjahr.

3.6 Niederschlagstage

Der Harz wirkt sich nicht nur auf die Niederschlagsmengen, sondern auch die Häufigkeit von Niederschlägen aus, wie die Anzahl der Regentage mit mehr als 1 mm Niederschlag zeigt (Abb. 3.13). Sind es im Oberharz pro Jahr bis zu 170 Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag, so sind es östlich davon teilweise nur 95 bis 100 und 100 bis 115 im Rest des Landes. Der Landesdurchschnitt liegt bei 108 Regentagen, wobei im Oberharz Niederschlag an etwa 50 % mehr Tagen fällt verglichen zu den anderen Regionen.

Die regionale Auswertung der Tage mit mehr als 10 bzw. 20 mm Tagesniederschlag zeigt, dass solche Tage im Oberharz und auch im Unterharz generell häufiger sind als in den tief liegenden Regionen (Tab. 3.11). Sie sind im Oberharz etwa dreimal häufiger und im Unterharz etwa 50 % häufiger als im Landesmittel. Die regionale Verteilung dieser Tage ist in den tiefen Regionen des Landes einheitlich im Gegensatz zu den Tagen mit mindestens 1 mm Niederschlag.

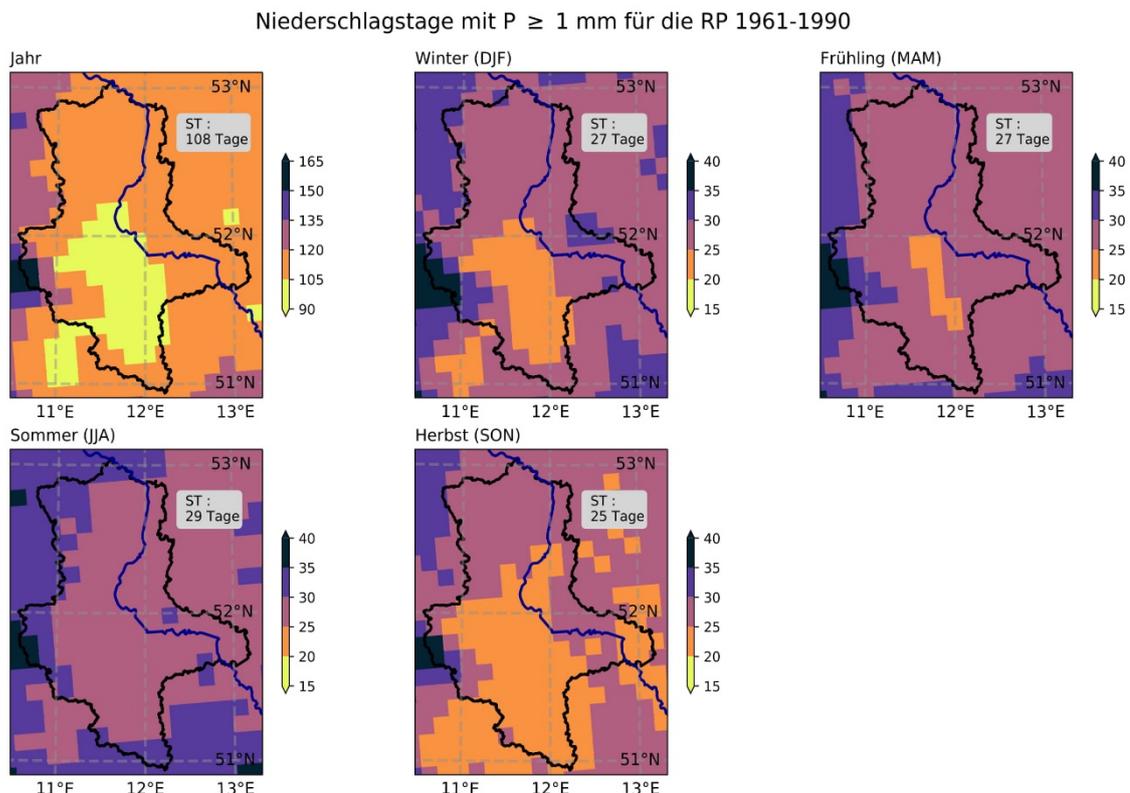


Abbildung 3.13: Durchschnittliche Anzahl an Niederschlagstagen mit $P \geq 1$ mm in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Tabelle 3.11: Ergebnisse der regionalen Auswertung der durchschnittlichen jährlichen Anzahl an Niederschlagstagen in der RP.

Kenngröße	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Tage mit $P \geq 1 \text{ mm}$	108	112	157	124	105	109	103
Tage mit $P > 10 \text{ mm}$	11	10	28	15	10	10	10
Tage mit $P > 20 \text{ mm}$	2	7	3	2	2	2	2
Tage mit $P < 1 \text{ mm}$	257	253	208	241	260	256	262

Die jahreszeitliche Auswertung dieser Niederschlagstage in den Abbildungen 3.14 und 3.15 zeigt, dass im Oberharz solche Niederschlagstage relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt sind, während in den Tieflandregionen ein Maximum an solchen Tagen im Sommer und ein Minimum im Winter verzeichnet wird. Trotz der geringeren Differenz zwischen Harz und Tiefland, stellt der Harz auch im Sommer einen Schwerpunkt der Niederschlagsaktivität dar. Als prominentes, freistehendes Mittelgebirge bietet der Harz durch den Effekt als erhöhte Wärmeinsel häufig gute Bedingungen für lokale Konvergenzen des bodennahen Windfeldes, sodass Konvektion zu Luftmassengewittern bzw. -schauern führt, während im Umland weniger Niederschläge auftreten.

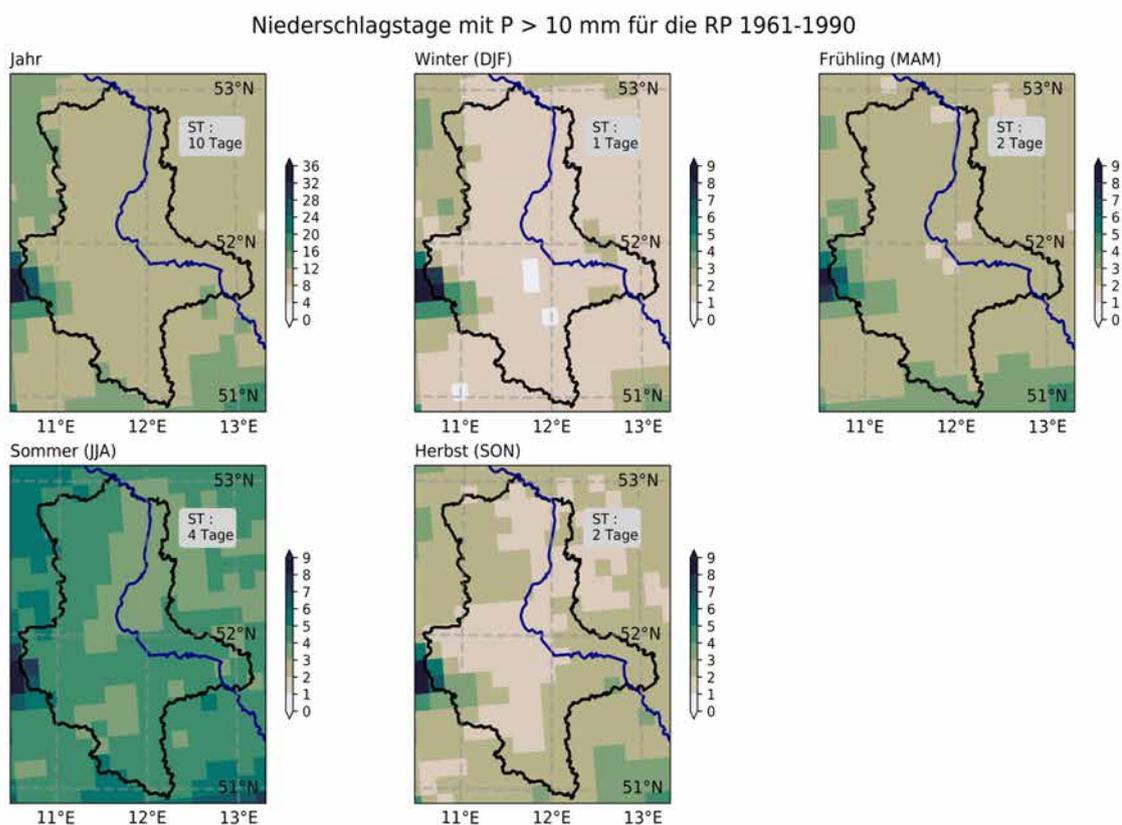


Abbildung 3.14: Durchschnittliche Anzahl an Niederschlagstagen mit $P > 10 \text{ mm}$ in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Die hohe Neigung zu starken Niederschlägen im Harz lässt darauf schließen, dass das Potenzial für lokale Überflutungen und lokale Hochwasser entlang der Flüsse und Bäche durch Starkregen in dieser Region am größten ist. Jedoch bilden sich Hochwasserwellen an den Hauptflüssen des Landes (Elbe, Mulde, Aller, Bode, und Saale) durch Niederschläge in deren gesamten flussaufwärts liegenden Einzugsgebieten, weshalb eine hohe Neigung zu starken

Niederschlägen im Harzumfeld auch zu einer hohen Hochwasserneigung in den Gewässern führt, die sich aus dem Harz als Einzugsgebiet speisen, was z.B. Bode und Saale betrifft.

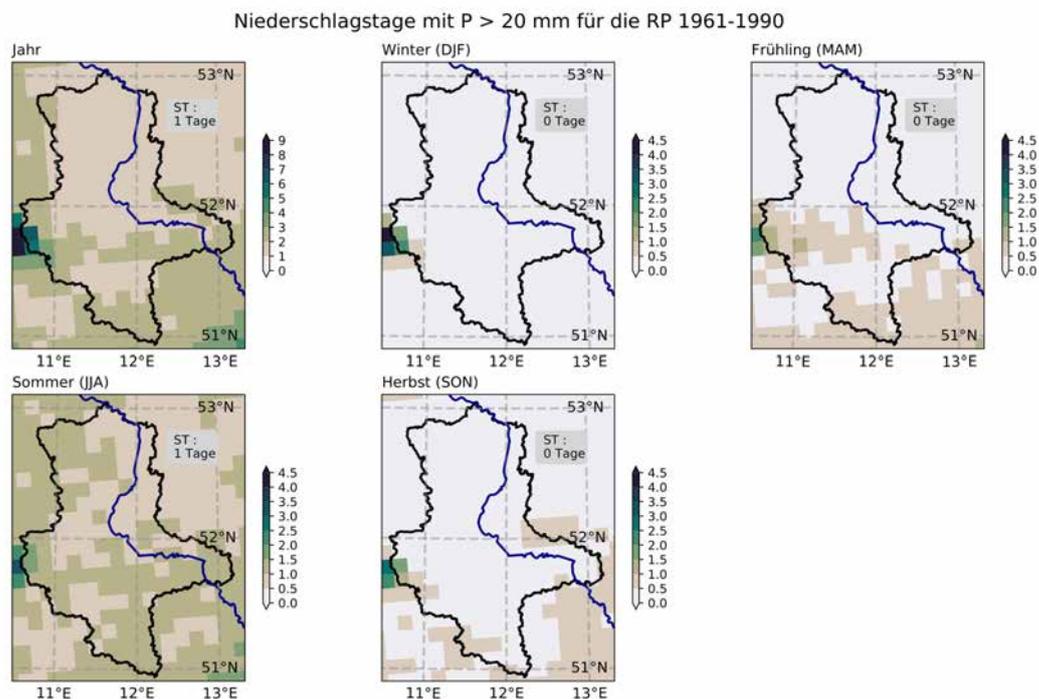


Abbildung 3.15: Durchschnittliche Anzahl an Niederschlagstagen mit $P > 20$ mm in der RP für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

3.7 Klimatische Wasserbilanz

Die KWB ist eine wichtige Klimakenngröße für wasser- und landwirtschaftliche Zwecke und beschreibt die Verfügbarkeit von Niederschlagswasser sowie die Kapazität für die Neubildung von Grundwasser. Die KWB wird bilanziert aus der Niederschlagsmenge abzüglich der potentiellen Verdunstung. Die Verdunstung wird dabei für eine Grasfläche berechnet. Die in diesem Projekt verwendete Berechnungsmethode bezieht neben der Temperatur auch Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und solare Einstrahlung mit ein. Eine negative KWB ist Folge überwiegender Verdunstung und eine positive KWB wird durch ein Überwiegen der Niederschläge verursacht. Generell steigt das Risiko von Dürreschäden an der Vegetation bei einer negativen KWB deutlich an. In Sachsen-Anhalt ist die KWB im Jahresmittel mit -82 mm deutlich negativ (Abb. 3.16). Besonders in einer Zone von der östlichen Magdeburger Börde bis hin zum südlichen Teil des Landes liegt die KWB bei unter -100 mm pro Jahr. Positiv ist die KWB im Harz und teilweise im Wendland und der nördlichen Altmark.

Tabelle 3.12: Ergebnisse der Regionalisierung für die saisonale Auswertung der durchschnittlichen KWB nach Penman-Monteith [mm] in der RP.

Zeitraum	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
Jahr	-83	-64	496	93	-109	-101	-118
Winterhalbjahr	90	100	430	195	72	86	63
Sommerhalbjahr	-173	-165	66	-102	-182	-187	-181
Winter	46	52	210	99	38	43	32
Frühling	-99	-106	35	-52	-99	-111	-96
Sommer	-96	-86	14	-68	-103	-103	-104
Herbst	67	74	237	115	55	70	50
Veg. Periode I	-133	-132	-5	-133	-91	-145	-133
Veg. Periode II	-40	-34	70	-11	-49	-42	-48

Klimatische Wasserbilanz nach Penman, FAO56 für die RP 1961-1990

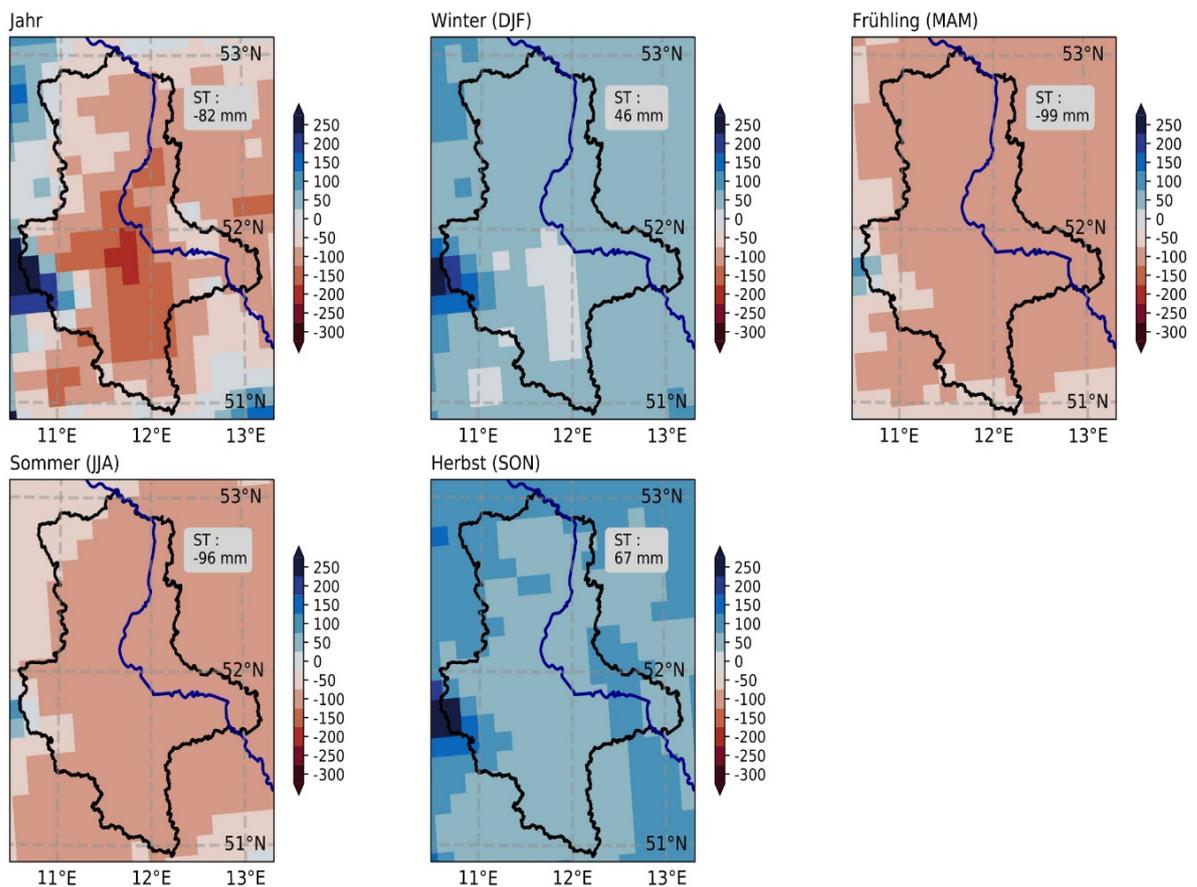


Abbildung 3.16: Durchschnittliche KWB nach Penman-Monteith FAO56 für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Abbildung 3.16 zeigt, dass im Oberharz die KWB ganzjährig positiv ist mit Ausnahme der Vegetationsperiode I (Tab. 3.12), während sie in allen anderen Landesteilen im Frühling und Sommer negativ ist. Im Winter und Herbst liefern überwiegende Niederschläge im Landesmittel mit 46 und 67 mm ähnlich große positive Beiträge zur KWB, während die überwiegende Verdunstung im Frühling und Sommer zu negativen Beiträgen zur KWB von jeweils -99 bzw. -96 mm führt, obwohl in diesen Jahreszeiten auch die Niederschläge in den tief liegenden Regionen zunehmen. Dabei nimmt der Betrag der negativen Beiträge zur KWB von Norden nach Süden etwas zu.

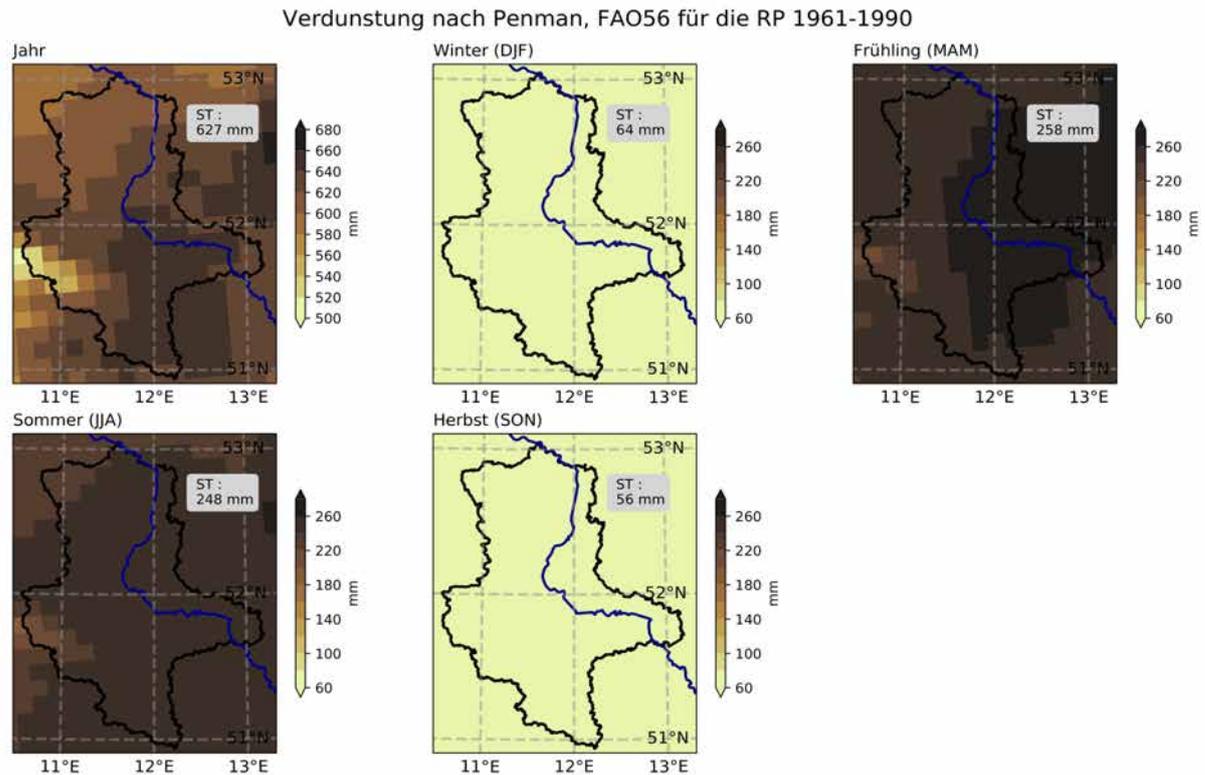


Abbildung 3.17: Durchschnittliche Verdunstung über Gras nach Penman-Monteith FAO56 für verschiedene Auswertungszeiträume, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Die Ergebnisse der Regionalisierung in Tabelle 3.12 zeigen, dass der Oberharz (R02) die einzige Region mit positiver KWB in allen Jahreszeiten ist. Auch die Abnahme der KWB von Norden nach Süden ist gut dokumentiert mit einer Differenz von 54 mm im Jahr zwischen R01 und r06, die sich etwa gleichmäßig auf alle Jahreszeiten verteilt.

In Abbildung 3.17 ist die saisonale Verdunstungsmenge dargestellt. Es ist erkennbar, dass im Jahresverlauf im Süden des Landes höhere potenzielle Verdunstungsmengen entstehen als im Norden. Dies ist besonders im Frühling und Sommer gut erkennbar. Die Verdunstung beträgt im Jahresmittel rund 627 mm und ereignet sich größtenteils im Frühling und Sommer mit jeweils etwa 250 mm. In der jährlichen Summe der Verdunstung reicht die Gesamtmenge von etwa 570 mm in der Altmark bis zu 660 mm im Burgenland. Im Harz ist die Verdunstung deutlich geringer mit Werten um 500 mm im Oberharz. Die Diskrepanz zwischen Harz und Umland kommt durch die Kombination von stärkerer Bewölkung und vor allen Dingen niedrigeren Temperaturen zustande. Der allgemeine Nord-Süd-Gradient wird hauptsächlich durch die erhöhte Solarstrahlung im Süden des Landes im Zusammenspiel mit den leicht höheren Temperaturen verursacht. Die Kombination aus reduzierter Verdunstung und hohen Niederschlagsmengen führt im Oberharz zu einem Überangebot an Niederschlagswasser, was sich auch in der

Tatsache widerspiegelt, dass der Harz Quellregion für einige Flüsse wie Bode und Helme darstellt.

3.8 Weitere Niederschlagskenngrößen

Um Starkregenereignisse und Dürreperioden besser einordnen zu können, muss man weitere Klimakenngrößen im Themenfeld Niederschläge betrachten. Dazu gehören die in Tabelle 2.4 definierten Starkregenkenngößen, die in Abbildung 3.18 dargestellt sind. Die RR95 beträgt im Landesmittel 185 mm und die RR99 rund 63 mm. Die Verteilung beider Parameter weist ein Maximum im Oberharz auf und zeigt in den tief liegenden Regionen eine, wenn auch geringe, Zunahme in den südlichen Landesteilen. Diese Zunahme beträgt rund 3 % für die RR95 und 6 % für die RR99 (Tab. 3.13).

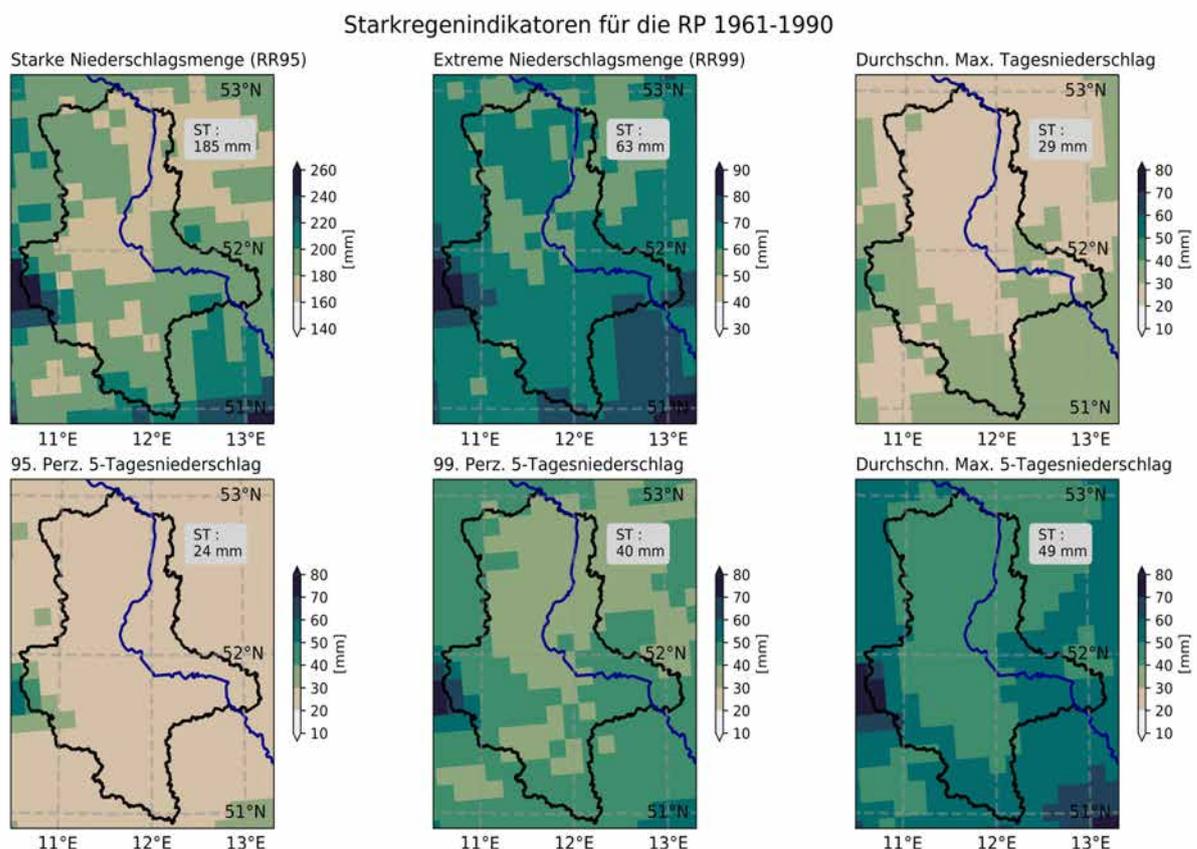


Abbildung 3.18: Starkregenkenngößen für die RP. Berechnungsmethoden können in 2.4 nachvollzogen werden. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Anhand der Ergebnisse der Regionalisierung in Tabelle 3.13 ist diese leichte Zunahme der Starkregenkenngößen von Norden nach Süden auch in anderen wenn auch nicht allen Kenngrößen wiederzufinden. Der durchschnittliche maximale Tagesniederschlag beträgt im Landesmittel 29 mm mit einer Schwankungsbreite von 28 bis 30 mm. Das 95. und 99. Perzentil des 5-Tagesniederschlages liegt bei 24 bzw. 40 mm im Landesmittel (Abb. 3.18 und Tab. 3.13) Eine Zunahme von Norden nach Süden ist dabei im 95. Perzentil nicht zu erkennen, jedoch um etwa 5 % beim 99. Perzentil. Der durchschnittliche jährliche maximale 5-Tagesniederschlag beträgt 49 mm im Landesmittel und in den Tieflandregionen ergibt sich eine Schwankungsbreite von 47 bis 50 mm oder etwa 6 % von Norden nach Süden. Die leichte Zunahme von Norden nach Süden bei einigen dieser Starkregenkenngößen dürfte auf das Auftreten der als 'Vb' bezeichneten Wetterlage zurückzuführen sein, bei der ein Tief von der Südseite der Alpen in Richtung Polen zieht und dabei insbesondere in Sachsen, aber häufig auch in den südlichen

Teilen von Sachsen-Anhalt für großflächige, ergiebige und manchmal mehrere Tage anhaltende Niederschläge sorgt. Das historische Elbehochwasser aus dem Jahr 2002 wurde durch eine solche Wetterlage verursacht (Engel, 2004).

Tabelle 3.13: Ergebnisse der regionalen Auswertung der Starkregenkenngößen [mm] in der RP.

Kenngröße	ST	R01	R02	R03	R04	R05	R06
RR95, Starke Niederschlagsmenge	185	183	283	212	181	183	187
RR99, Extreme Niederschlagsmenge	63	61	91	71	62	63	65
Durchschn. Max. Tagesniederschlag	29	28	42	33	29	29	30
95. Perzentil 5-Tagesniederschlag	24	25	45	30	24	24	24
99. Perzentil 5-Tagesniederschlag	40	39	67	48	41	40	41
Durchschn. Max. 5-Tagesniederschlag	49	47	78	56	47	49	50

Abgesehen von der leichten Zunahme der Starkregenkenngößen im Tiefland von Norden nach Süden, ist der Oberharz die Region mit den höchsten Werten im gesamten Bundesland. Alle Kenngrößen sind hier im Vergleich zum Landesmittel um 40 bis 80 % erhöht (Tab. 3.13). Entsprechend ist die im vorausgehenden Abschnitt gemachte Bewertung des Harzes als potentiell am meisten von lokalen Hochwassern geprägte Region bestätigt worden. Außerdem deutet die Zunahme der Starkregenkenngößen nach Süden, auch über die Landesgrenze Sachsen-Anhalts hinaus, darauf hin, dass die sich aus diesen Gebieten speisende Flüsse Elbe, Saale, Unstrut und Mulde von Hochwassern häufiger betroffen sein könnten, als etwa die Aller.

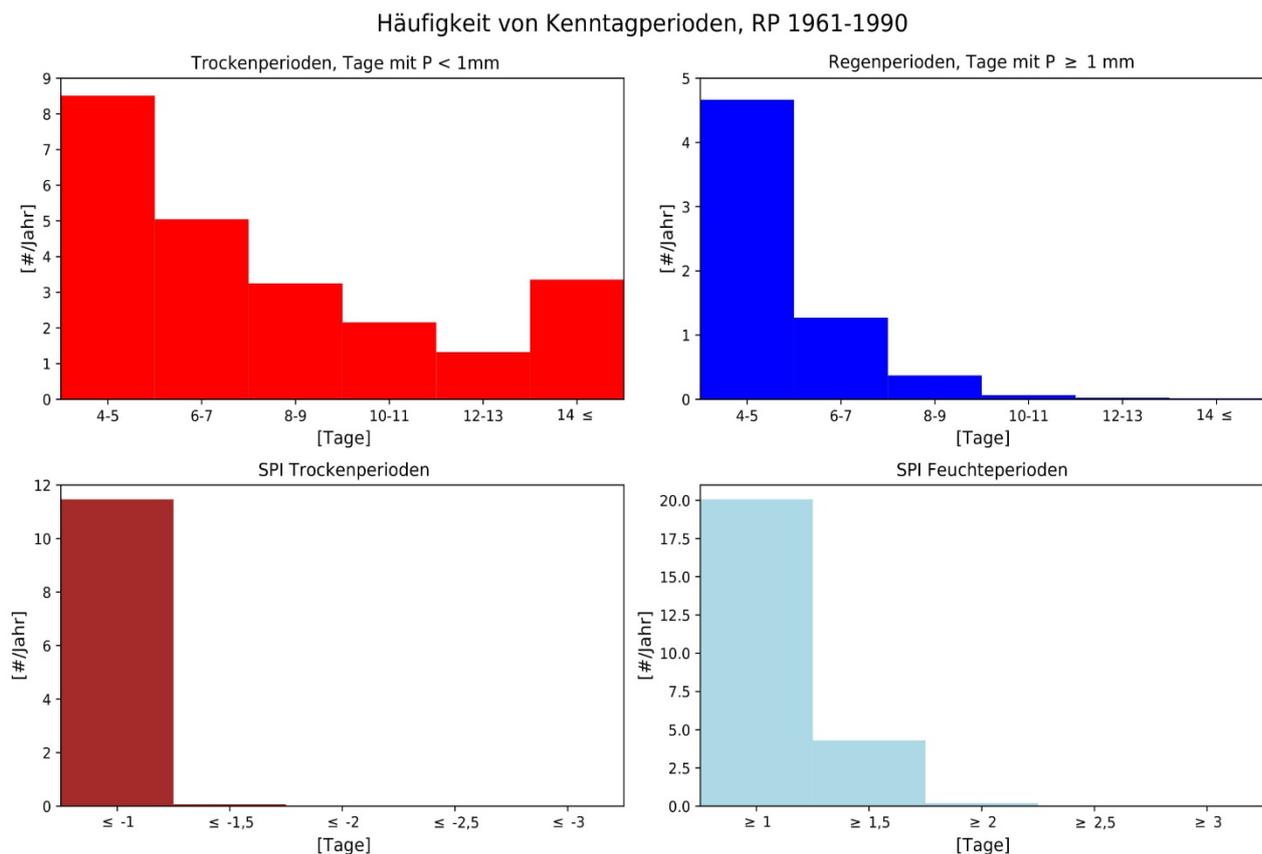


Abbildung 3.19: Von links oben: Trockenperioden, Regenperioden, Anzahl der SPI Trocken- und Nässeperioden für die RP. Berechnungsmethoden können in 2.4 nachvollzogen werden.

In Abbildung 3.19 sind Anzahl von Trocken- und Regenperioden verschiedener Länge dargestellt auf der Basis der Werte des SPI₉₀ sowie der Anzahl aufeinander folgender Tage mit bzw. ohne Niederschlag ≥ 1 mm. Das Kriterium für den SPI₉₀ zur Bestimmung von

Trockenperioden und Feuchteperioden ist dann erfüllt, wenn der SPI_{90} entweder um mindestens eine Standardabweichung über oder unter dem Erwartungswert - dem Mittelwert - liegt. Regenperioden mit mehr als 8 Tagen mit $P \geq 1$ mm treten nur sehr selten auf, während 4 bis 5 Niederschlagstage mit mindestens 1 mm Niederschlag etwa 4- bis 5-mal pro Jahr auftreten. Der zur Bewertung der über die letzten 90 Tage dargebotenen Niederschlagsmenge verwendete SPI ist an etwa 20 Tagen größer als 1 und an etwa 4 Tagen im Jahr größer als 1,5 für die RP (Abb. 3.19). Dies bedeutet, feuchte Perioden treten relativ häufig auf, aber sehr nasse Perioden sind selten. Die Anzahl von Trockenperioden mit aufeinander folgenden Tagen mit $P < 1$ mm ist erheblich größer als die Anzahl von Regenperioden. Trockenperioden von mindestens 14 Tagen Andauer treten etwa 3-mal pro Jahr in der RP auf und mehr als 7 trockene Tage treten im Durchschnitt der RP etwa 9-mal pro Jahr auf. Naturgemäß sind kurze Trockenperioden häufiger als langanhaltende, jedoch nimmt die jährliche Anzahl der Tage in anhaltenden Trockenperioden nur wenig ab mit der Zunahme der Länge der Trockenperioden. Trockene Verhältnisse bezüglich des Niederschlags herrschen an etwa 11 Tagen, Dürre mit einem SPI unter -1,5 ist jedoch in der RP extrem selten beobachtet worden (Abb. 3.19). Die gegensätzlichen Ergebnisse bei der Betrachtung von den absoluten Schwellwerten der Regen- bzw. Trocken und der relativen Schwellenwerte des SPI_{90} ist durch die stark gekippte Verteilung der täglichen Niederschlagsmengen zu erklären. Trockene Tage sind im Landesmittel deutlich häufiger als Tage mit $P \geq 1$ mm, weshalb auch Trockenperioden häufiger und länger anhaltend sind als Regenperioden. Die geringe Häufigkeit von trockenen oder sehr trockenen Verhältnissen über einen Zeitraum von 90 Tagen zeigt, dass in der RP Niederschlagsereignisse in der Regel regelmäßig auftraten und langanhaltende Perioden mit besonders trockenen Verhältnissen sehr selten sind.

3.9 Weitere Klimakenngrößen

Zur Beurteilung des Klimazustandes sind die Klimakenngrößen im Themenfeld Niederschlag und Temperatur grundsätzlich von großem Interesse, aber eine vollständige Beschreibung eines Klimas beinhaltet auch Aussagen über einfallende Strahlung, Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit. Diese Klimakenngrößen sind in diesem Projekt lediglich bezüglich ihrer saisonalen und jährlichen Mittelwerte ausgewertet worden, jedoch sind einige dieser Kenngrößen sicherlich auch über diese Mittelwerte hinaus bedeutsam für das Klima und auch für Vulnerabilität und Energiegewinnung.

In Abbildung 3.20 ist die relative Luftfeuchtigkeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass grundsätzlich der Norden Sachsen-Anhalts etwa 2-4 % höhere Werte aufweist als der Süden und auch im Harz eine etwa 5 % höhere relative Luftfeuchtigkeit auftritt als in der Umgebung. Der Norden Sachsen-Anhalts liegt im Frühling und Sommer im Bereich geringfügig tieferer Temperaturen und durch seine Nähe zu Nordsee und Ostsee gelangen feuchte Luftmassen leichter in diese Region. Der Harz ist durch seine Höhenlage kühler und daher erhöht sich die relative Luftfeuchtigkeit. Neben den regionalen Besonderheiten ist ein klarer Jahresgang zu erkennen, mit tieferen Werten von 74 bzw. 72 % in Frühling und Sommer und höheren Werten von 81 bzw. 84 % im Herbst und Winter (Abb. 3.20). Die höhere Luftfeuchtigkeit im Winterhalbjahr wird durch die kühleren Temperaturen verursacht, da die relative Luftfeuchtigkeit das Verhältnis von tatsächlichem Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck beschreibt, also dem Gehalt an Wasserdampf, bei dem Kondensation eintritt.

Relative Luftfeuchtigkeit für die RP 1961-1990

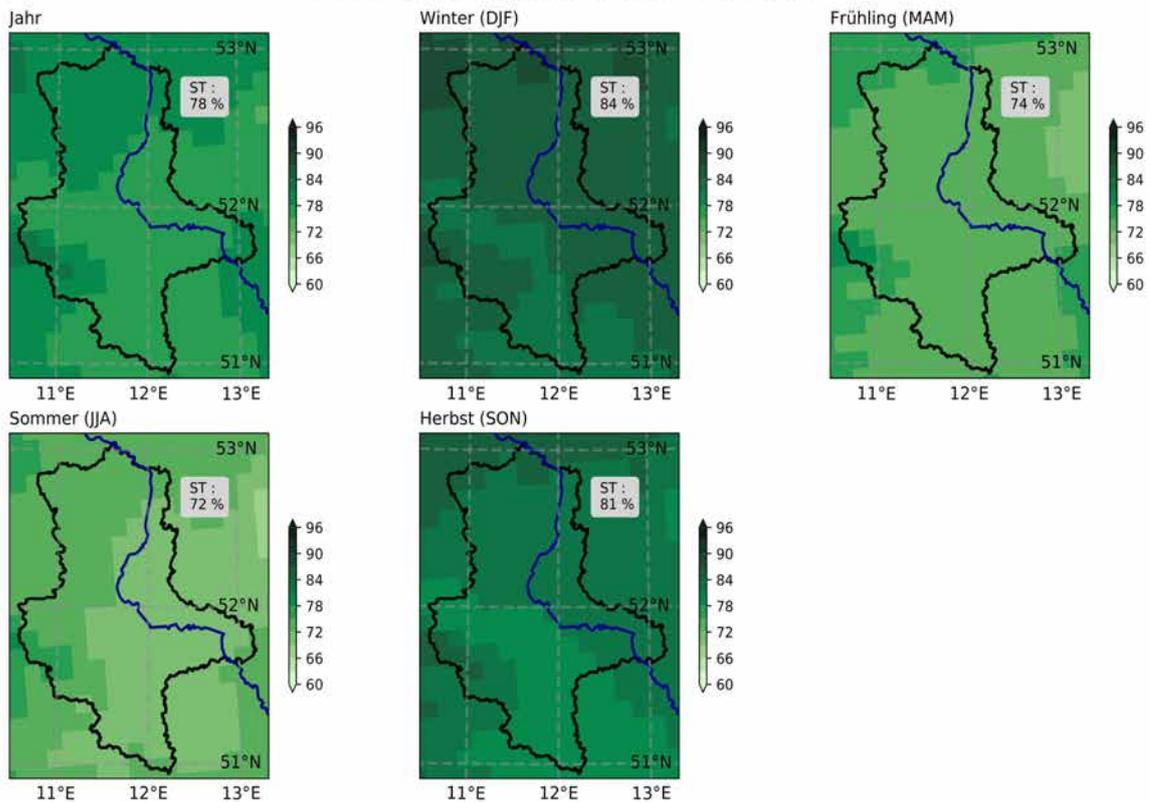


Abbildung 3.20: Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst.

Der Sättigungsdampfdruck nimmt exponentiell mit der Temperatur ab bzw. zu (Gl. 2.4 c), sodass im Winter selbst bei geringeren Wassergehalten, der Sättigungsdampfdruck verhältnismäßig deutlich geringer ist und damit die relative Feuchte steigt.

Neben der relativen Luftfeuchtigkeit ist auch die spezifische Feuchte (Abbildung 3.21) ein wichtiger Feuchteparameter. Die spezifische Feuchte ist ein Maß für das Massenverhältnis von in der Luft enthaltenem Wasserdampf und der Gesamtmasse der Luft. Die spezifische Luftfeuchte bestimmt den Wassergehalt und das Potential für Starkniederschläge. Hohe spezifische Feuchte erzeugt hohe potentielle Energien durch das Freiwerden von latenter Wärme beim Kondensieren des Wasserdampfes. Deshalb ist eine hohe spezifische Feuchte ein entscheidender Faktor bei etwa unwetterträchtigen Gewitterlagen im Sommerhalbjahr, wenn auch nicht der einzige erhebliche Faktor. Die spezifische Feuchte weist einen im Vergleich zur rh umgekehrten Jahresgang auf mit höheren Werten von $8,6 \text{ gkg}^{-1}$ im Sommer und den tiefsten Werten von $3,4 \text{ gkg}^{-1}$ im Winter (Abb. 3.21). Die räumliche Verteilung ist einheitlich, außer im Harz wo aufgrund der Höhenlage und tieferen Temperaturen geringfügig weniger Wasserdampf in der Luft enthalten ist. Die höheren Werte im Sommerhalbjahr korrespondieren mit größeren Verdunstungsraten, die den Ursprung für den Wasserdampfgehalt in der unteren Atmosphäre darstellen.

Spezifische Luftfeuchtigkeit für die RP 1961-1990

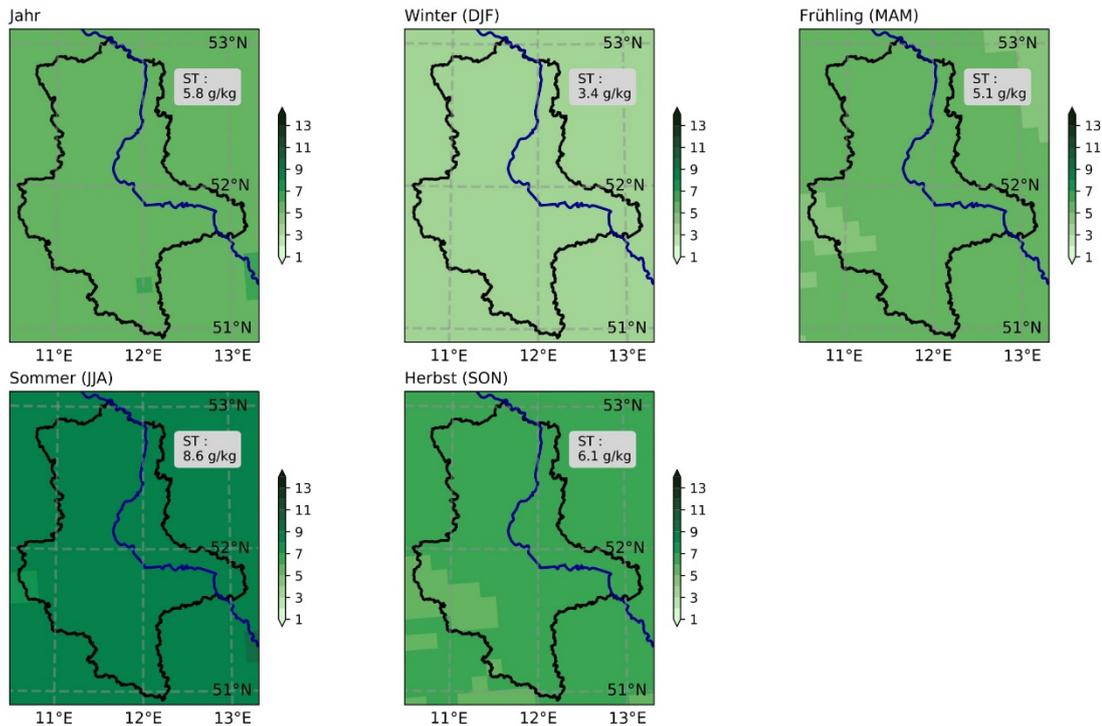


Abbildung 3.21: Durchschnittliche Spezifische Luftfeuchtigkeit, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Die hohen Verdunstungsraten und damit erhöhten Werte der spezifischen Luftfeuchte werden unter anderem auch durch die Solarstrahlung verursacht, dargestellt in Abbildung 3.22. Im Jahresmittel beträgt die Einstrahlung etwa 120 Wm^{-2} , naturgemäß liegt dieser Wert im Sommer am höchsten mit etwa 196 Wm^{-2} und im Winter am niedrigsten mit etwa 41 Wm^{-2} . Es ist erkennbar, dass die Solarstrahlung von Norden nach Süden etwas abnimmt, was der geringeren Sonnenhöhe über dem Horizont geschuldet ist. Die Solarstrahlung bestimmt die bodennahe Energiebilanz der Erdatmosphäre und ist damit entscheidend für Temperatur, Verdunstung und Feuchte. Außerdem ist die Solarstrahlung ein wichtiger Faktor in der lokalen, nachhaltigen Energieerzeugung durch Solarpaneele. Die Solarstrahlung kann durch den Feuchtegehalt der Atmosphäre und Bewölkung reduziert werden. Falls sich diese Einflussgrößen im Zuge des Klimawandels ändern, kann sich auch der erwartbare Energieertrag ändern.

Ebenfalls zur Erzeugung von Energie wird der Wind genutzt, was in Sachsen-Anhalt auch bereits verbreitet geschieht. Die Einspeisung beträgt in Sachsen-Anhalt über 9.000 Gigawattstunden und es ist geplant, einen Teil der Wind- und anderer erneuerbar erzeugter Energie zur Erzeugung von Wasserstoff zu nutzen, welcher als nachhaltiger Treibstoff und Energiespeicher Verwendung finden kann (Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie, 2019). Die Betrachtung der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit in diesem Projekt kann aufgrund der Auflösung der verwendeten Datensätze nicht zur Ermittlung des Energieertrages herangezogen werden, Änderungssignale können aber Hinweise geben und als Grundlage für feinere Berechnungen genutzt werden.

Solarstrahlung für die RP 1961-1990

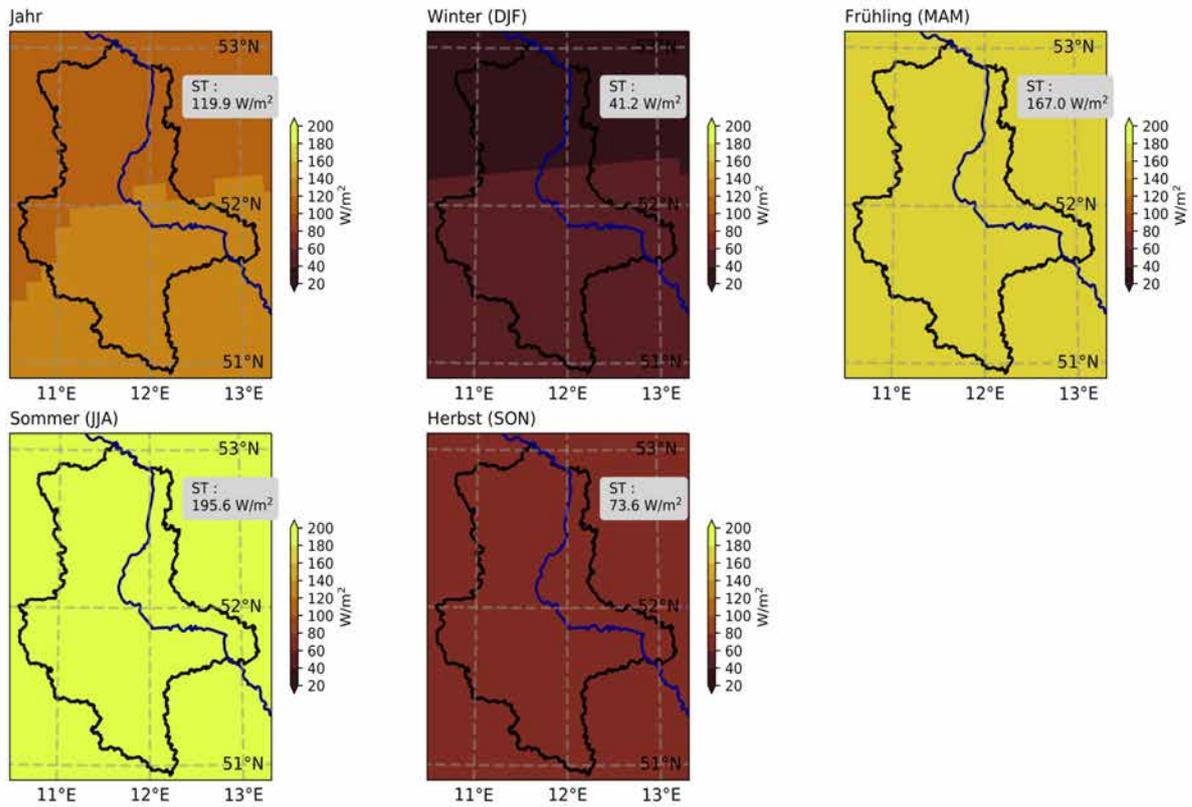


Abbildung 3.22: Durchschnittliche Solarstrahlung, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst.

Windgeschwindigkeit für die RP 1961-1990

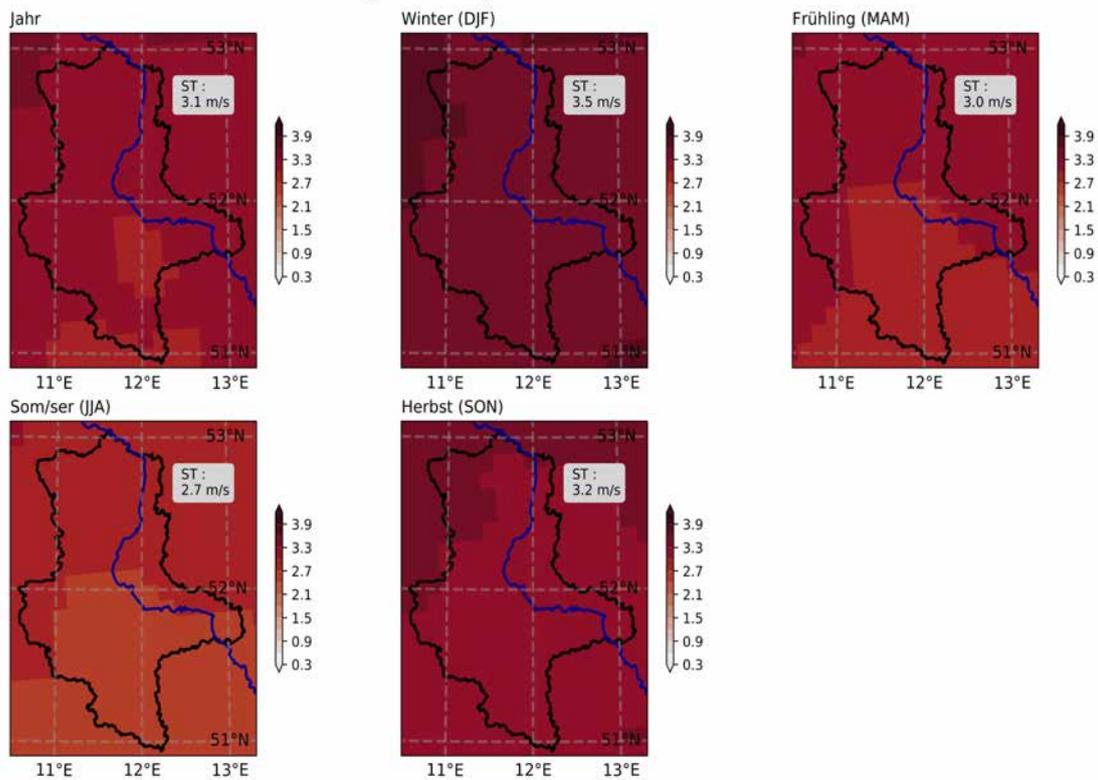


Abbildung 3.23: Durchschnittliche Windgeschwindigkeit, von oben links: Jahr, Winter, Frühling, Sommer, Herbst. Das Landesmittel ist jeweils oben rechts dargestellt.

Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit (Abbildung 3.23) beträgt $3,1 \text{ ms}^{-1}$ und weist ein Minimum im Sommer mit $2,7 \text{ ms}^{-1}$ sowie ein Maximum im Winter mit $3,5 \text{ ms}^{-1}$ auf, welches etwa 10 % mehr als das Jahresmittel sind (Abb. 3.23). Die Windgeschwindigkeit liegt im Norden des Landes um etwa $0,4 \text{ ms}^{-1}$ über der im Süden. Dies wird im wesentlichen durch die Nähe zu Zyklonenzugbahnen erklärt sowie die Tatsache, dass die Landschaft hier sehr flach und wenig gegliedert ist und damit dem Wind weniger Reibungswiderstand bietet. Die sehr hohen Windgeschwindigkeiten am Brocken im Harz können durch den verwendeten Datensatz nicht abgebildet werden. Der Brocken weist eine mittlere Windgeschwindigkeit von $11,7 \text{ ms}^{-1}$ im Jahresmittel auf für die Periode 1895-2012 (Kinkeldey, Nöth, & Adler, 2015) und die dortige Wetterstation ist seit dem Beginn des Jahres 2020 der 'Automatisierung' zum Opfer gefallen, weshalb Meldungen über Schneehöhe und Wetterzustand von dieser Station von nun an mit Vorsicht zu genießen sind.

Die Auswertung zum Klima der RP 1961-1990 zeichnet wie erwartet das Bild eines Übergangsklima zwischen moderat maritim und moderat kontinental geprägtem Mittelbreitenklima mit relativ geringen Niederschlägen in Sachsen-Anhalt. Die Winter sind im Osten und Süden des Landes geringfügig kälter als im Nordwesten, während das Sommerhalbjahr nach Südosten wärmer ist als nach Nordwesten zu. Aufgrund der Lage im Windschatten der zentralen Mittelgebirge relativ zur südwestlichen Hauptwindrichtung fallen die Niederschläge verhältnismäßig gering aus. Mithilfe des HYRAS-Datensatzes konnten diese regional und jahreszeitlich spezifischen Merkmale eindeutig bestimmt werden. Lokalklimatische Besonderheiten wie sehr kalte Muldenlagen im Unterharz oder die hohen Windgeschwindigkeiten am Brocken können aufgrund der Auflösung des Datensatzes nicht dargestellt werden.

Dieses Kapitel soll einen Überblick über das Referenzklima für dieses Projekt geben. Die Auswertungen gegenüber der geringfügig milderen Basisperiode 1971-2000, die für hydrologische Betrachtungen als Grundlage herangezogen wird sowie einige Regionalisierungen für einige Parameter der RP befinden sich im Dateianhang zu diesem Bericht. Im folgenden Kapitel werden die Änderungssignale der Klimakenngrößen in verschiedenen Zeiträumen und für die RCP2.6 und RCP8.6 Szenarien dargestellt.

4 Klimaänderungssignale

In diesem Kapitel werden die Änderungssignale des Klimas in Sachsen-Anhalt beschrieben. Die Änderungssignale werden für jede Klimaprojektion ausschließlich aus den Daten der jeweiligen Klimaprojektion ermittelt. Es werden also zunächst die langjährigen Mittel der Zukunftsperioden und der RP sowie der BP aus den Daten der Projektion ermittelt. Anschließend wird die Differenz als Änderungssignal ausgegeben, ggf. mit Schwellwertanpassung. Dieses Kapitel enthält explizit die Änderungssignale relativ zur RP, die Darstellung der Änderungssignale zur BP befindet sich in einem separaten Dateianhang. In der Kartendarstellung sind die Mittelwerte der Änderungssignale für das Referenzensemble aus allen Klimaprojektionen abgebildet. Dabei ist immer ein Änderungssignal für die nahZ (2021-2050) und die fernZ (2071-2100) für beide Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 dargestellt. In der Balkendiagramm-Abbildung der Änderungssignale sind alle Änderungssignale des Referenzensembles enthalten und die Werte für schwachen Wandel, Median, starken Wandel und den Bereich mit 66 % um den Median (wahrscheinliche Änderung) sind besonders hervorgehoben. Die regionalen Auswertungen befinden sich weitestgehend im Anhang, da die Änderungssignale regional sehr ähnlich verteilt sind.

RCP2.6 und RCP8.5 unterscheiden sich in ihren Auswirkungen auf das Klima stark, insbesondere was die Entwicklung des Klimas nach 2050 betrifft. In der folgenden Auswertung der Änderungssignale wird dem Leser deutlich, dass das RCP8.5 Änderungssignale für das Klima in Sachsen-Anhalt beinhaltet, die weit außerhalb der heute üblichen Bandbreite liegen, während das RCP2.6 lediglich eine moderate Verschiebung des Klimas in Richtung dessen bedeutet, was wir heute als oberen Bereich der Bandbreite beschreiben würden. Die Stärke und besonders die Geschwindigkeit der Änderung des Klimas hängt also sehr stark von den Maßnahmen zum Klimaschutz ab und es könnte sehr schwierig sein, die Infrastruktur sowie andere gesellschaftliche Systeme an die neuen Gegebenheiten anzupassen; dies stellt eine der Kernaussagen des gesamten Projektes dar.

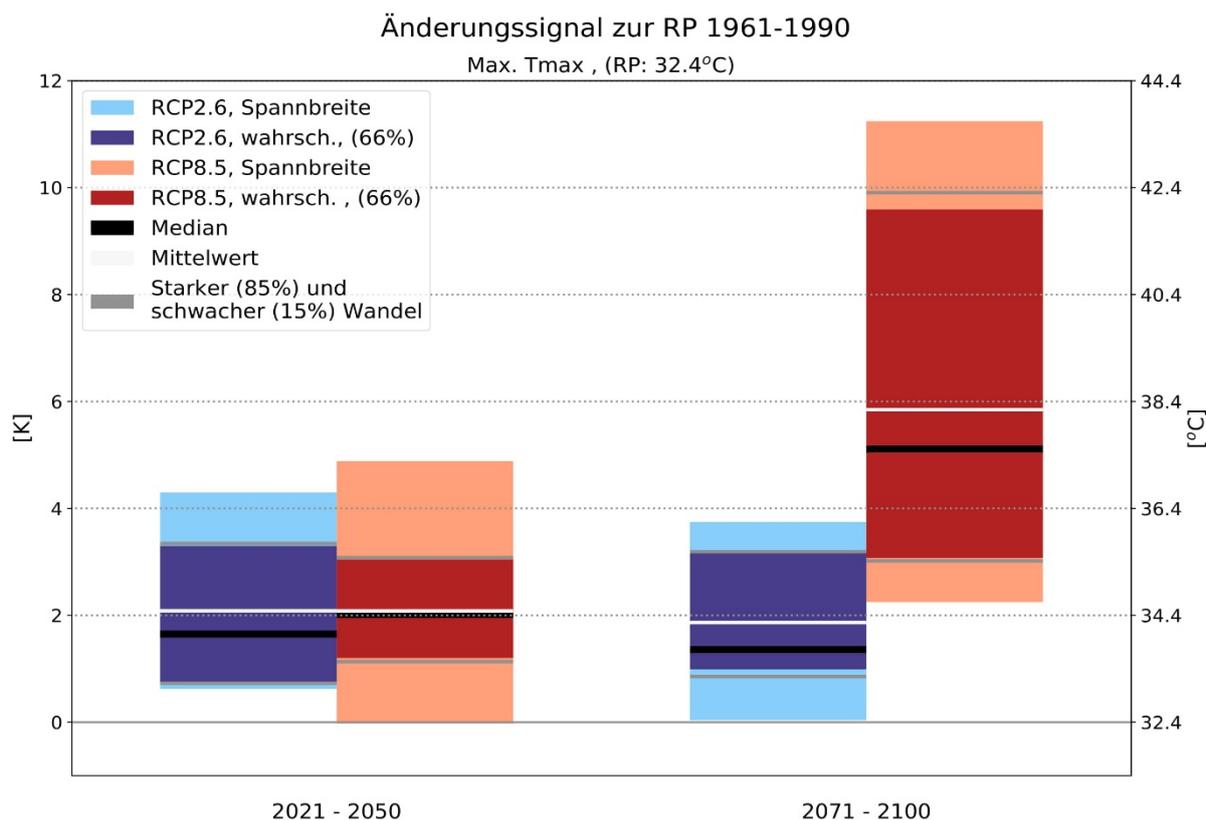


Abbildung 4.1: Illustration der Auswertung und Darstellung der Klimaänderungssignale am Beispiel der durchschnittlichen jährlichen höchsten T_{max} .

In Abbildung 4.1 ist die Legende dargestellt, die den folgenden Abbildungen der Bandbreite der Änderungssignale zu Grunde liegt. Die Bandbreiten des RCP2.6 sind in blauer Farbe und die des RCP8.5 in roter Farbe abgebildet. In dunklem Farbton ist die ‚wahrscheinliche‘ Bandbreite abgesetzt, d.h. der Bereich um den Median, der 66 % der Projektionen umfasst. Die gesamte Spannweite der Änderungssignale ist in etwas hellerem Farbton abgebildet. Starker und schwacher Wandel, also das 85. und 15. Perzentil der Bandbreite, sind mit dünnen grauen Linien gezeichnet, der Mittelwert ist mit einer dicken weißen Linie und der Median mit einer dicken schwarzen Linie eingezeichnet.

4.1 Mitteltemperaturen

Die mittlere Änderung des T_{mit} im Referenzensemble ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Im RCP2.6 beträgt die Änderung +1,5 K in der nahZ und +1,6 K in der fernZ, während sich das mittlere T_{mit} im RCP8.5 zunächst um +1,9 K in der nahZ und dann +4,2 K in der fernZ erhöht. An der farbigen Darstellung in den Karten und den regionalen Flächenmitteln in der rechten Spalte in Abbildung 4.2 ist gut zu erkennen, dass es keine regionale Differenzierung in der Erwärmung gibt. An dieser Darstellung wird bereits deutlich, dass die Folgen der Erwärmung im Falle des RCP2.6 zum einen deutlich geringer ausfallen und zum anderen bereits in der nahZ in vollem Umfang ausgeprägt und spürbar wären. Eine Erwärmung um den Betrag von +1,6 K wäre vergleichbar mit dem Temperaturmittel der letzten 15 Jahre, während Abweichungen von +4,2 K zur RP in Deutschland seit Beginn der Messungen noch nicht aufgezeichnet wurden.

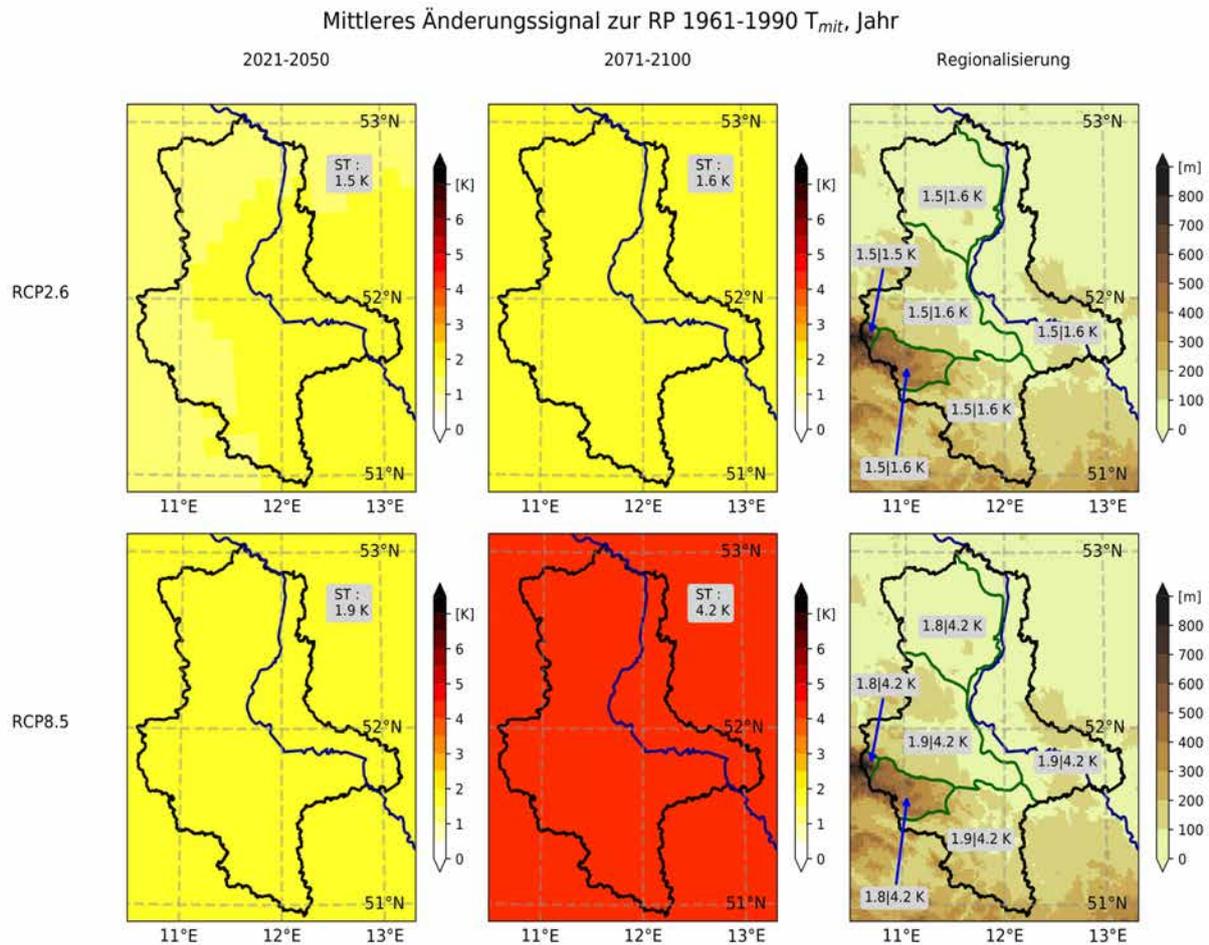


Abbildung 4.2: Mittleres Änderungssignal in [K] gegenüber der RP für das durchschnittliche jährliche T_{mit} .

In Abbildung 4.3 und 4.4 sind die mittleren Änderungssignale der mittlere T_{max} und T_{min} dargestellt. Die Änderung des T_{max} ist etwa 0,1 K größer, in der fernZ im RCP8.5 sogar um etwa 0,4 K größer als die des T_{mit} . Gleichzeitig fällt die Änderung des T_{min} um etwa 0,2 K geringer aus als die des T_{mit} im RCP2.6 und um 0,3 K in der nahZ bzw. 0,6 K in der fernZ des RCP8.5. Somit nimmt die Differenz zwischen T_{max} und T_{min} insgesamt etwas zu, um etwa 0,3 K im RCP2.6 und 0,4 K in der nahZ bzw. 1,0 K in der fernZ im RCP8.5. Die Neigung zu höheren Tagesgängen der Temperatur kann durch die Kombination mehrerer möglicher Faktoren verursacht werden, insbesondere trockenere Böden, geringere Bewölkung und erhöhte langwellige Abstrahlung durch höheres Temperaturniveau. Diese Kombination wird in der weiteren Folge dieses Kapitels untersucht werden. Auch für T_{max} und T_{min} ist deutlich erkennbar, dass die Änderungssignale keine regionale Differenzierung aufweisen.

Bemerkenswert ist für das RCP8.5, dass die Änderung zwischen RP und nahZ für das T_{mit} von +1,9 K einer Änderungsrate von +0,32 K pro Dekade entspricht, während die Steigerung von weiteren +2,3 K zwischen nahZ und fernZ in 50 Jahren einer Änderungsrate von +0,46 K pro Dekade entspricht. Die Änderungsrate im RCP8.5 nimmt im Laufe des späteren 21. Jahrhunderts also um etwa 44 % zu gegenüber den früheren Jahrzehnten, während die Änderungsrate im RCP2.6 für die späteren Jahrzehnte des 21. Jahrhunderts bei etwa +0,02 K pro Dekade liegt, was äußerst gering ist und innerhalb des Rahmens natürlicher Schwankungen liegt. Die dekadischen Änderungsraten sowie deren Verstärkung in der fernZ von T_{max} und T_{min} liegen in der gleichen Größenordnung wie für das T_{mit} .

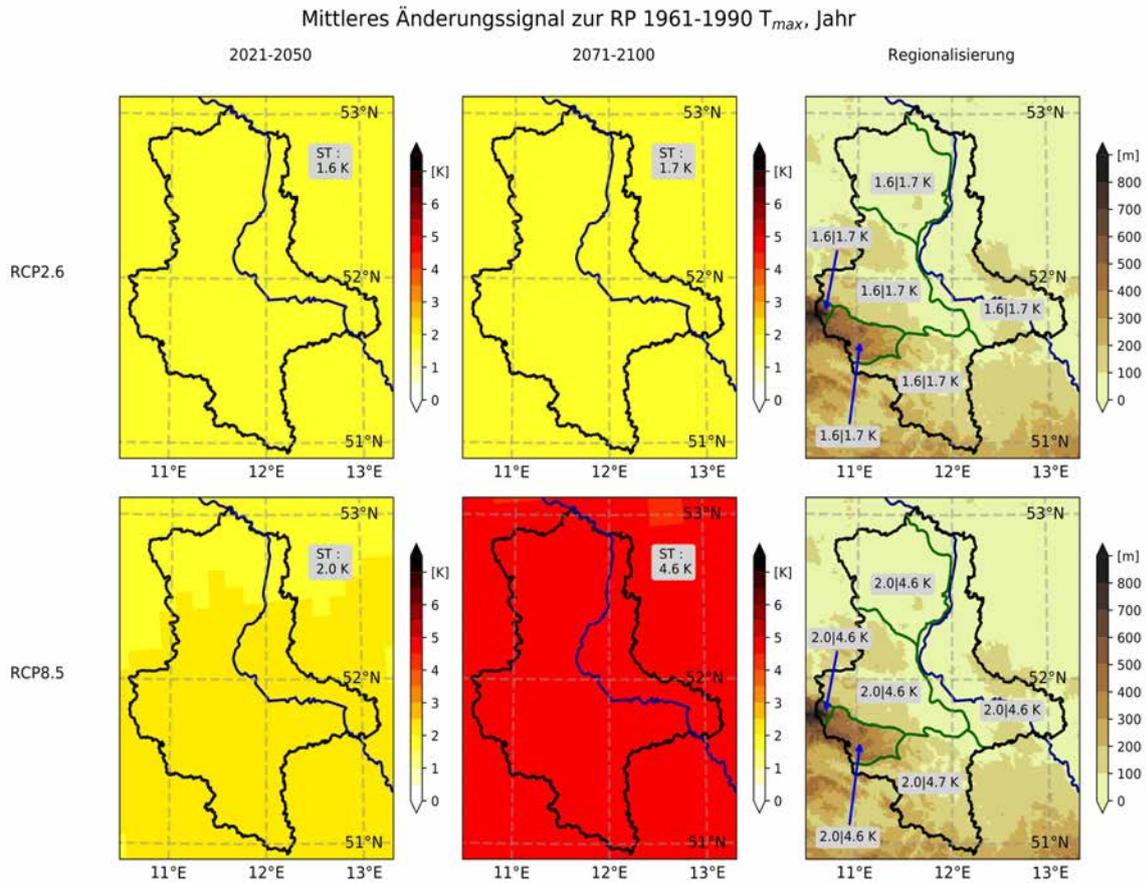


Abbildung 4.3: Mittleres Änderungssignal in [K] gegenüber der RP für das durchschnittliche jährliche T_{max} .

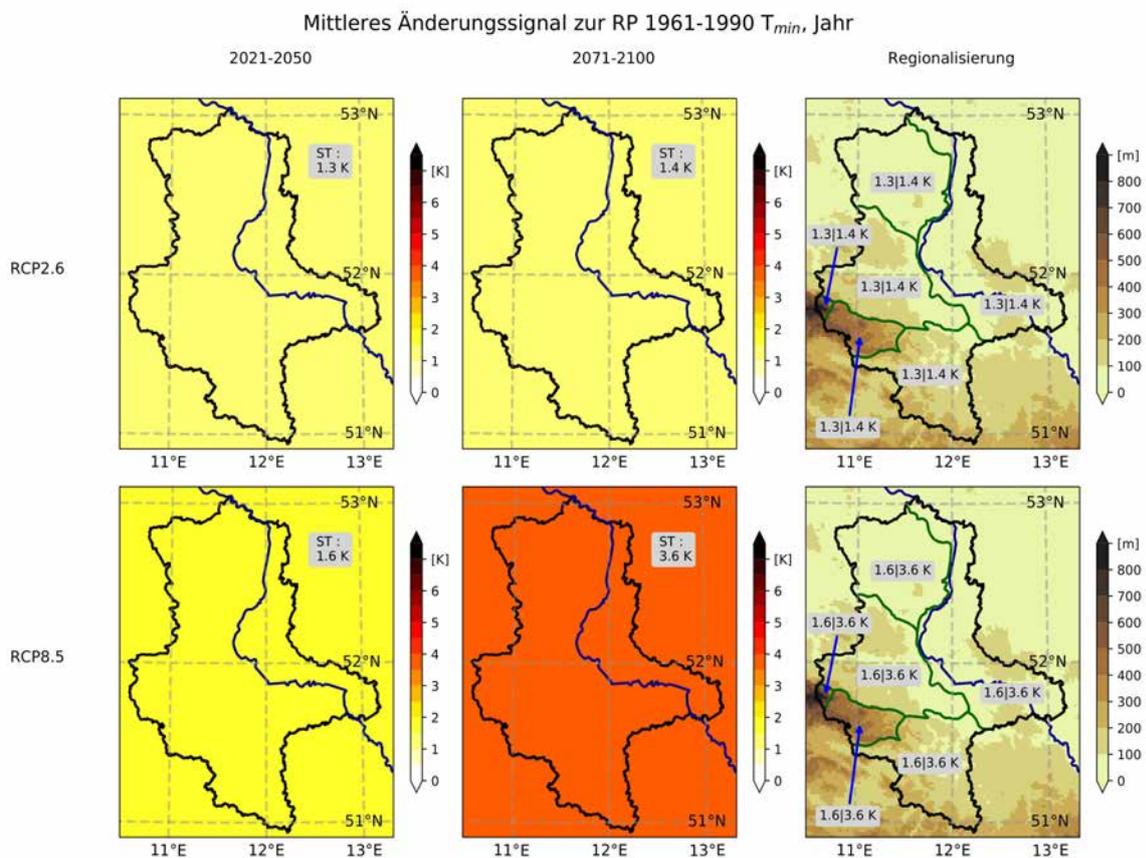


Abbildung 4.4: Mittleres Änderungssignal in [K] gegenüber der RP für das durchschnittliche jährliche T_{min} .

Änderungssignal T_{mit} zur RP 1961-1990

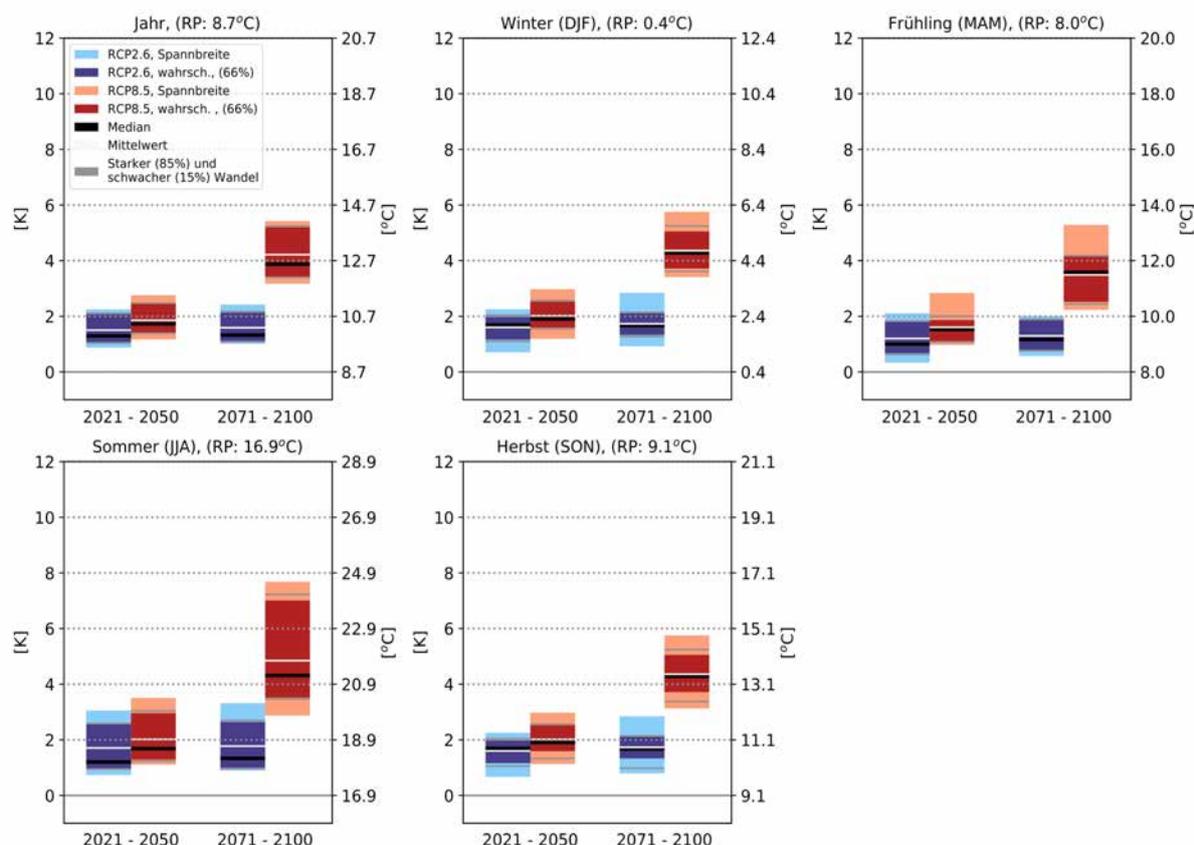


Abbildung 4.5: Bandbreite und saisonale Auswertung der Änderungssignale des T_{mit} . Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

In Abbildung 4.5 ist die Bandbreite der Änderungssignale des T_{mit} dargestellt und auch für die Jahreszeiten aufgeschlüsselt. Die mittleren Änderungssignale im Winter und Herbst liegen sehr nahe am jährlichen Änderungssignal, die Erwärmung im Frühling fällt um etwa 0,2 bis 0,4 K geringer aus als im Jahresmittel und die Erwärmung im Sommer fällt stärker aus als im Jahresmittel. Die Verstärkung der sommerlichen Erwärmung gegenüber dem Jahresmittel beträgt etwa 0,2 K für das RCP2.6 und die nahZ im RCP8.5, in der fernZ des RCP8.5 beträgt diese Verstärkung 0,7 K und das mittlere Änderungssignal +4,9 K (Abb. 4.5). Die Bandbreite der möglichen Änderungssignale beträgt für das RCP2.6 etwa 1 K mit Werten von +1 bis +2 K für das Jahresmittel und ist etwas größer in den Jahreszeiten mit einer Bandbreite von etwa 1,5 K zwischen minimalen und maximalen Änderungssignal, außer im Sommer, wenn dieser Wert auf 2 K ansteigt. Diese Werte sind auch für die nahZ des RCP8.5 zutreffend, jedoch nimmt die Bandbreite in diesem Szenario in der fernZ auf etwa 2 K zu für das Jahresmittel, was einer Verdoppelung entspricht. In den Jahreszeiten nimmt die Bandbreite auf etwa 2,5 K zu, im Sommer auf sogar 4,5 K für die fernZ im RCP8.5 (Abb. 4.5). Die Bandbreite der Änderungssignale für die fernZ liegt zwischen +3 und +7,5 K im RCP8.5. Die wahrscheinliche Bandbreite, in der sich 66 % der Änderungssignale befinden und die um den Median herum in beide Richtungen verteilt sind, ist für das RCP2.6 im Winter und Herbst deutlich enger als die gesamte Bandbreite. Für das RCP8.5 nimmt die wahrscheinliche Bandbreite im Sommer der fernZ immer noch etwa 3,5 K ein und die große Bandbreite zeigt damit auf, dass das Änderungssignal der T_{mit} im Sommer unter der Annahme fortschreitender THG-Emissionen besonders großen Unsicherheiten unterliegt.

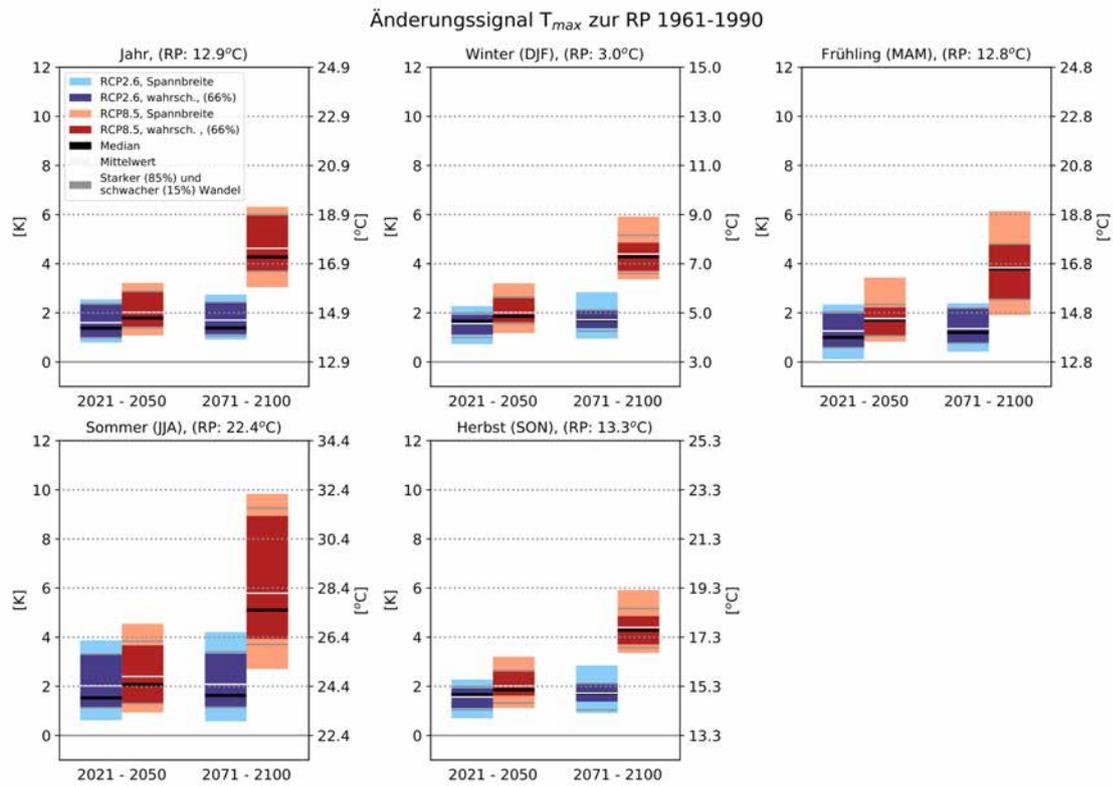


Abbildung 4.6: Bandbreite und saisonale Auswertung der Änderungssignale des T_{max} . Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

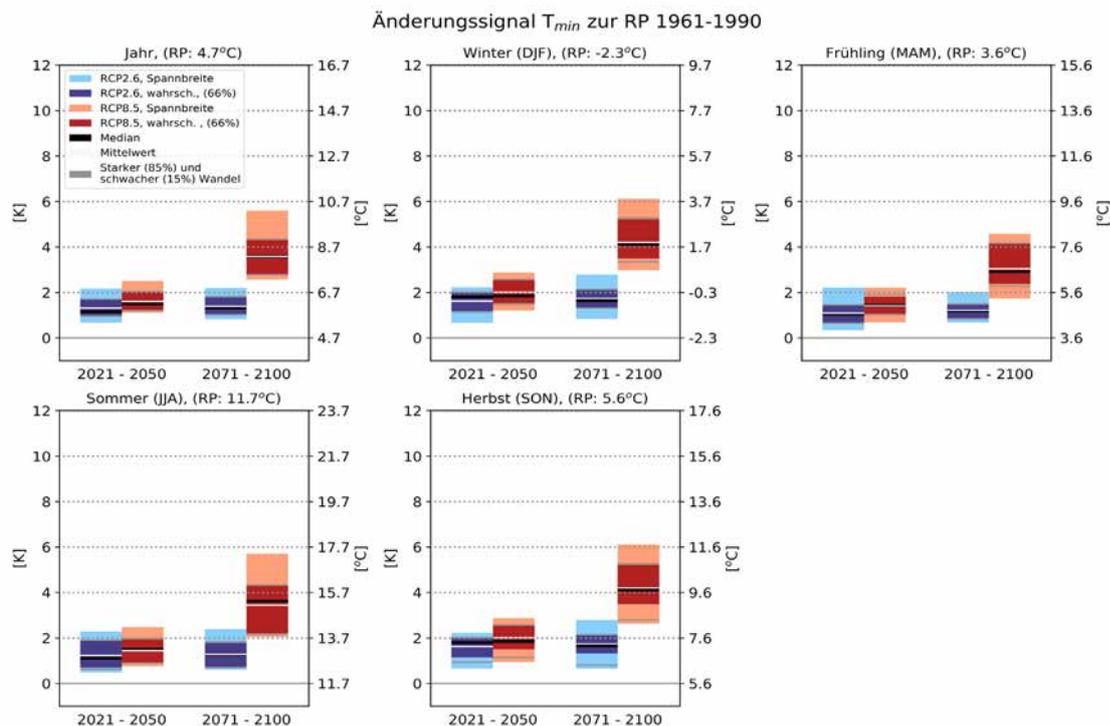


Abbildung 4.7: Bandbreite und saisonale Auswertung der Änderungssignale des T_{min} . Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

Die in Abbildung 4.6 und 4.7 dargestellten Änderungssignale für T_{max} und T_{min} bestätigen die oben getätigten Aussagen. Es fällt auf, dass generell die Bandbreite der Signale für das T_{min} um etwa 0,5 K geringer ausfallen als für das T_{mit} und etwa 1 bis 2 K größer ausfallen für das T_{max} . Der wahrscheinliche Bereich für das mittlere T_{max} im Sommer umfasst in der fernZ für das RCP8.5 einen Bereich von 26,4 bis etwas über 31 °C und damit auch die Möglichkeit, dass bei einem anhaltenden Ausstoß von THG-Emissionen heiße Tage die Normalität in Sachsen-Anhalt darstellen.

Es kann festgestellt werden, dass alle Änderungssignale im positiven Bereich liegen, also eine Erwärmung bedeuten. Weiterhin ist für das RCP8.5 eine Beschleunigung der Erwärmung zu erwarten, während für das RCP2.6 ein Stopp der Erwärmung etwa im Zielbereich des Pariser Klima-Abkommens aus 2015 projiziert wird. Bemerkenswert ist außerdem, dass für die T_{max} eine stärkere Zunahme projiziert wird als für die T_{mit} und T_{min} . Im Jahresverlauf wird für das Frühjahr eine geringere und für den Sommer eine stärkere Erwärmung der Temperaturen projiziert. Dies hängt möglicherweise damit zusammen, dass im Frühjahr auch bei voranschreitendem Klimawandel noch sehr kalte Luftmassen in arktischen Breiten bereit stehen und die Wahrscheinlichkeit für Kaltlufteinbrüche am höchsten ist, während im Sommer möglicherweise die Nordwärtsverlagerung der subtropischen Hochdruckzelle anhaltende Hitzewetterlagen wahrscheinlich macht.

4.2 Temperaturkenntage

Mithilfe der Änderungen der Temperaturkenntage können Hitzebelastung und thermische Eigenschaften des zukünftigen Klimas bewertet werden und entsprechender Handlungsbedarf beispielsweise für Kühlungsinfrastruktur und Landwirtschaft abgeleitet werden.

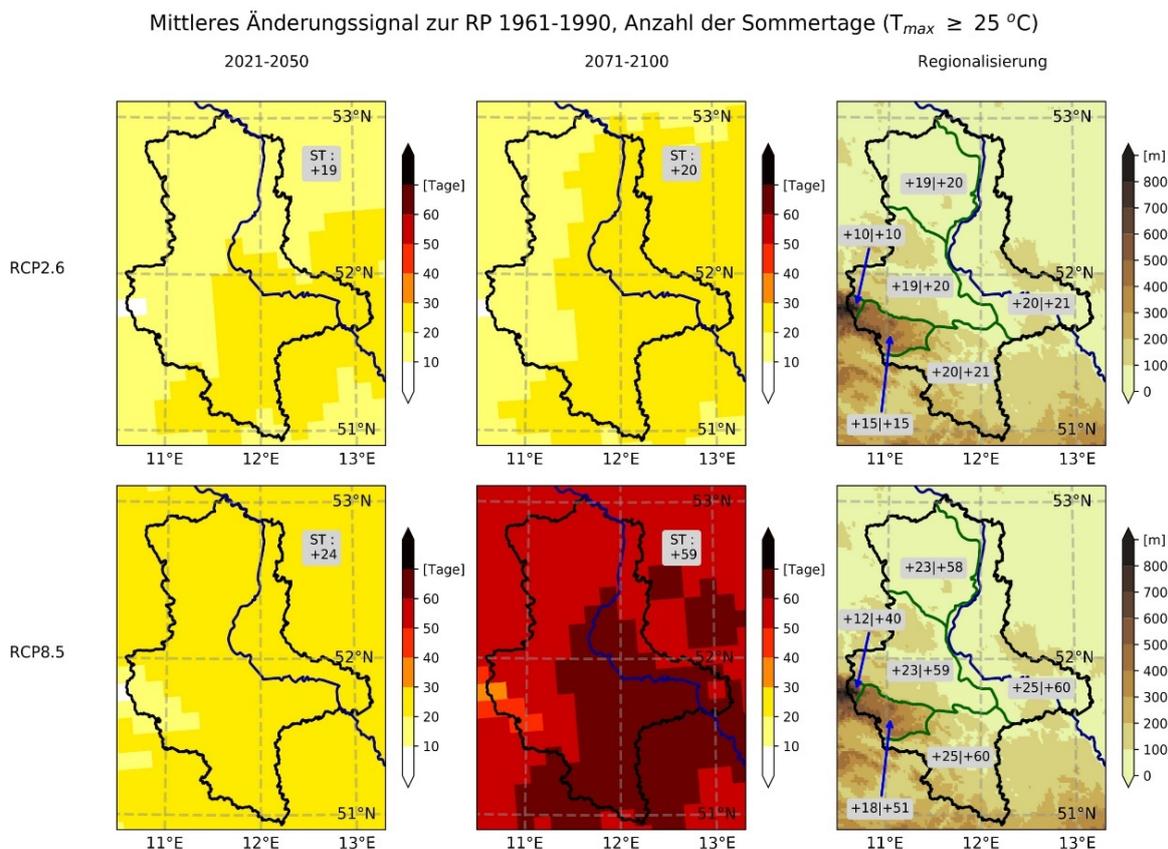


Abbildung 4.8: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für jährliche Anzahl von Sommertagen.

In Abbildung 4.8 ist die Änderung der Anzahl der Sommertage dargestellt. Für das RCP2.6 beträgt die Änderung +19 bzw. +20 Tage in der nahen und fernen Zukunft, während im RCP8.5 in der nahen Zukunft zunächst +24 und von 2017-2100 +59 Sommertage mehr verzeichnet werden als in der RP. Tendenziell ist die Änderung in den südöstlichen Landesteilen etwas stärker als im Norden und Westen Sachsen-Anhalts. Außerdem ist die Änderung im Harz bedingt durch die Höhenlage geringer, im Oberharz beträgt das mittlere Änderungssignal für das RCP2.6 und die nahZ des RCP8.5 etwa die Hälfte des Landesmittels, in der fernZ des RCP8.5 steigt der Anteil jedoch auf zwei Drittel an.

Die regionale Verteilung folgt etwa der heutigen regionalen Verteilung, was bedeutet, dass die Anzahl der Sommertage auch im Klima der Zukunft im Nordwesten des Landes geringer sein wird als im Osten und Süden von Sachsen-Anhalt. Die Änderung der Sommertage im RCP2.6 erscheint gemäßigt im Vergleich zur Anzahl solcher Tage in den letzten 10 Jahren in Sachsen-Anhalt, wo diese zwischen 8 und 58 Tagen über dem Mittel der RP lag. Die Anzahl der mittleren Sommertage in der fernen Zukunft unter Annahme des RCP8.5 entspricht etwa der Anzahl der Sommertage aus dem Jahr 2018. Auch in der Anzahl der Sommertage wird die Beschleunigung der Erwärmung im RCP8.5 deutlich, so nehmen die Sommertage zunächst um etwa +4 pro Dekade bis zum Ende der nahen Zukunft zu, während diese Rate sich auf +7 Tage pro Dekade bis zum Ende des Jahrhunderts beschleunigt, also um etwa 75 %.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Anzahl der Hitzetage ($T_{max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$)

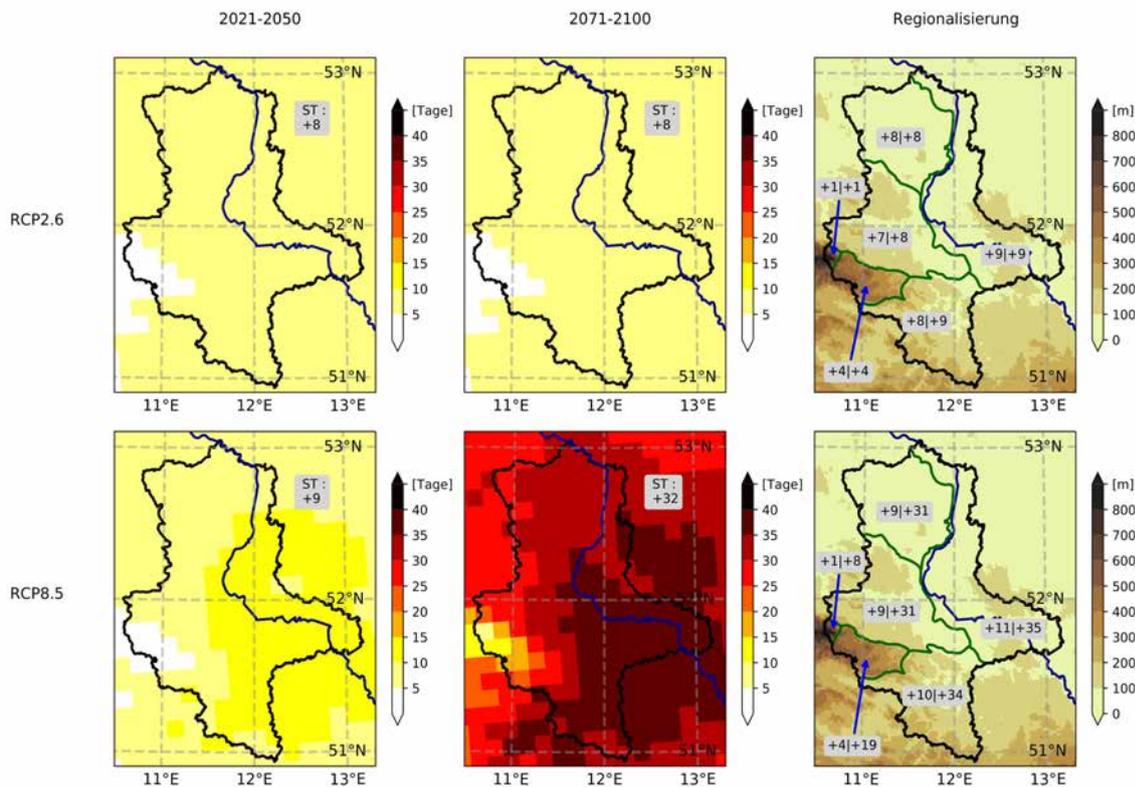


Abbildung 4.9: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für jährliche Anzahl von Hitzetagen.

Für die weiter am warmen Rand des Spektrums der klimatologischen Temperaturverteilung liegenden Hitzetage trifft die Aussage über die Beschleunigung des Klimawandels im RCP8.5 ebenfalls und noch deutlicher zu (Abb. 4.9). Die Anzahl der Hitzetage steigt um etwa +8 Tage im RCP2.6, ohne sich weiter zu erhöhen in der fernen Zukunft. Im RCP8.5 steigt die Zahl der Hitzetage pro Jahr zunächst im Mittel um +9 Tage bis zum Ende der nahZ und um weitere 23 Tage auf +32 Tage gegenüber der RP in der fernZ (Abb. 4.9). Die Änderungsrate von der nahZ bis zur fernZ ist mit +4,6 Hitzetagen pro Dekade mehr als 3-mal so hoch wie bis zur nahZ im RCP8.5 mit +1,5 pro Dekade. Regional differenziert ist deutlich, dass die geographische Verteilung der Änderungssignale auch für die Hitzetage der heutigen Verteilung mit höheren Werten im Süden und Osten des Landes entspricht. Dies ist plausibel, da die Änderung des T_{max} im ganzen Land etwa gleichmäßig erfolgen soll und dessen sommerliche Werte im Süden und Osten Sachsen-Anhalts etwas höher liegen. Im Oberharz, wo Hitzetage die klimatische Ausnahme darstellen in der RP, ändert sich dies erst in der fernZ des RCP8.5, wo dann im Mittel mehr Hitzetage auftreten, als im Landesmittel in der RP. Anhand der Zunahme der Hitzetage lässt sich feststellen, dass die Hitzebelastung gegenüber der RP stark ansteigt.

Solche Anzahlen an Hitzetagen wie im Mittel der Klimaprojektion im RCP8.5 für das Ende des 21. Jahrhunderts projiziert werden, sind in Sachsen-Anhalt bisher nicht beobachtet worden, wo das Maximum bisher bei etwa 30 Hitzetagen liegt und im Jahr 2018 aufgetreten ist. Dies entspricht etwa einer Abweichung von 23 Hitzetagen gegenüber der RP. Auf eine derartige Veränderung der Hitzebelastung wie im RCP8.5 ist das Land Sachsen-Anhalt nicht vorbereitet. Deutlich wird dies an den Auswirkungen der heißen und trockenen Sommer der letzten Jahre auf den Wasserhaushalt, die Temperaturbelastung in Wohngebäuden, an Arbeitsplätzen innen wie außen und auch an Erscheinungen im Straßenbau, wo 'Blow-Ups' auf Autobahnfahrbahnen immer häufiger auftreten (Holldorb, Rumpel, Gerstengarbe, Österle, & Hoffmann, 2016).

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Starke Hitzebelastung (NOAA-Heatindex $\geq 39\text{ }^{\circ}\text{C}$)

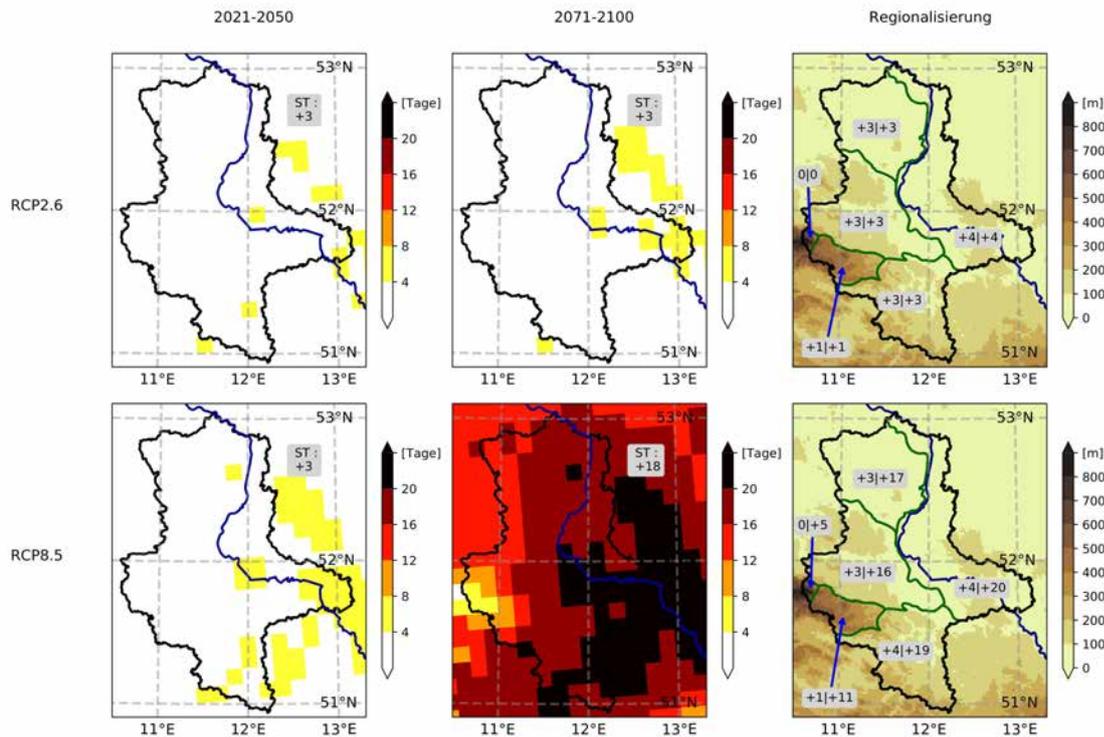


Abbildung 4.10: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für jährliche Anzahl von Tagen mit starker Hitzebelastung.

Diese Aussage wird auch dadurch bestätigt, dass das Mittel der Klimaprojektionen eine Zunahme der Tage mit starker bis sehr starker Hitzebelastung um 18 Tage in der fernen Zukunft im RCP8.5 zeigt (Abb. 4.10). Die Zunahme solcher Tage beträgt etwa +3 im RCP2.6 und in der nahen Zukunft des RCP8.5. Die regionale Verteilung folgt etwa der heutigen Verteilung dieser klimatologischen Größe mit höheren Werten im östlichen und südlichen Sachsen-Anhalt. Im Oberharz, wo solche Tage praktisch nicht vorkommen in der RP, ergibt sich im RCP2.6 und in der nahen Zukunft im RCP8.5 keine wesentliche Änderung an dieser Tatsache. Zum Ende des Jahrhunderts steigt im RCP8.5 die Hitzebelastung auch dort an und es werden +5 Tage mit starker Hitzebelastung verzeichnet. Auch im Unterharz steigt die Anzahl der Tage mit starker Hitzebelastung im Mittel der Klimaprojektionen im RCP8.5 sprunghaft an zwischen nahZ und fernZ (Abb. 4.10). Der Anstieg der Hitzebelastung lässt sich auch am Anstieg der Kühlgradtage ausmachen (Abb. 4.11). Mit +15 bis +20 K ist der Anstieg in den Projektionen des RCP2.6 und in der nahZ des RCP8.5 moderat, während im RCP8.5 mit einer Erhöhung von annähernd +100 K eine sehr starke und sprunghafte Änderung in der fernZ eintritt. Der starke Anstieg der Kühlgradtage zeigt, dass der Bedarf für Energie zur Kühlung von Gebäuden massiv ansteigen wird.

Mit den in Abbildungen 4.8, 4.9, 4.10 und 4.11 dargestellten Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Hitzebelastung im RCP2.6 moderat ansteigt, ohne sich im weiteren Verlauf zu verschärfen, während im RCP8.5 im späteren Verlauf des 21. Jahrhunderts eine deutliche Beschleunigung und Verschärfung der Hitzebelastung stattfindet.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Kühlgradtage (Summe $T_{mit} > 23^{\circ}\text{C}$, $T_{mit} > 23^{\circ}\text{C}$)

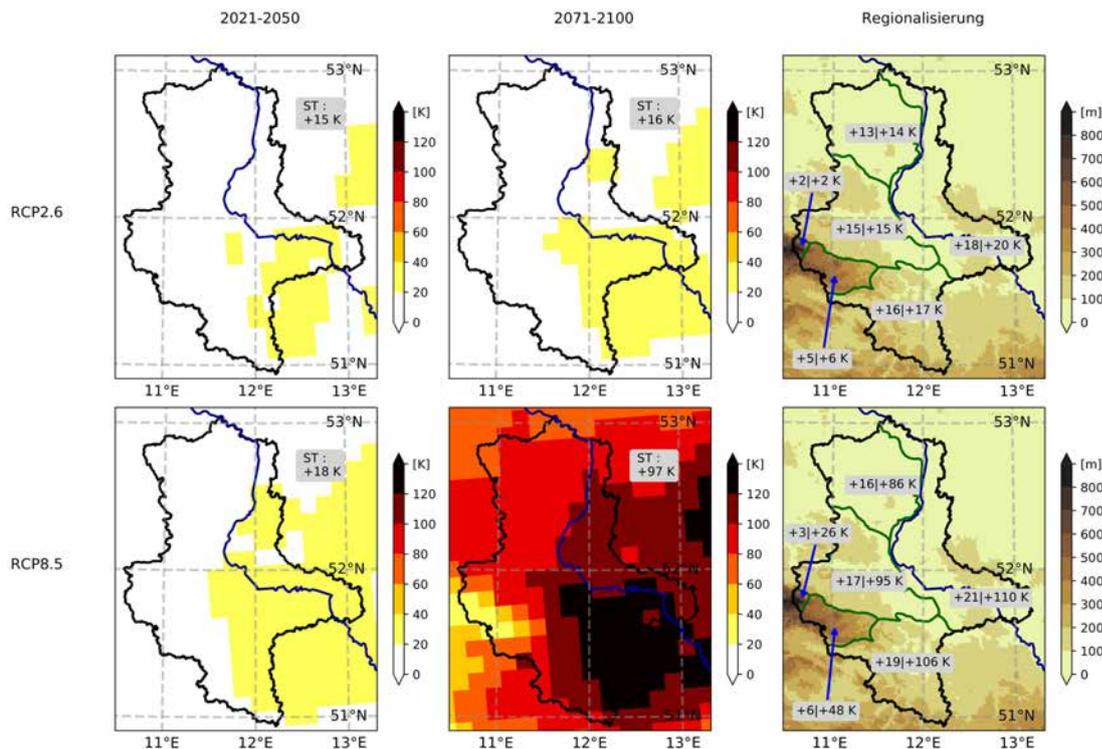


Abbildung 4.11: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Kühlgradtage. Die Änderung ist in [K] angegeben.

Sommer mit sehr starker Hitzebelastung könnten unter Annahme des RCP8.5 Normalität werden. Die regionale Verteilung dieser Kenngrößen verändert sich im Verlauf des Klimawandels nicht.

Während die Hitzebelastung ansteigt, besonders im RCP8.5, wird durch den Anstieg der Temperaturen der Energieaufwand für Heizenergie abnehmen. Die mit dieser Größe verbundene Änderung der Heizgradtage, welche ein proportionales Maß für den Energieaufwand darstellt, ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Im RCP2.6 nimmt die Anzahl der Heizgradtage um 14 bis 15 % ab, ohne sich dabei zwischen nahZ und fernZ nennenswert zu verändern. Für das RCP8.5 nimmt das Landesmittel der Heizgradtage in der nahZ um 17 % ab und in der fernZ um 34 %. Die Abnahme erfolgt regional sehr gleichmäßig und ist in den höher gelegenen Regionen des Harzes geringfügig schwächer als im Landesmittel (Abb. 4.12).

Auch die Anzahl der Eistage nimmt im Mittel der Klimaprojektionen gegenüber dem Landesmittel von etwa 25 Eistagen in der RP deutlich ab. Im RCP2.6 beträgt die Abnahme -11 Tage in der nahZ und -12 Tage in der fernZ. Dies entspricht einer Reduktion von etwa -45 bis -50 % gegenüber der RP. Im Oberharz und Unterharz beträgt die Abnahme jeweils -17 bis -18 bzw. -13 bis -14 Tage, ist also etwas größer. Im RCP8.5 ist die mittlere Abnahme deutlich stärker, in der nahZ treten -13 Eistage weniger auf und in der fernZ ist es eine Abnahme von -22 Tagen gegenüber der RP (Abb. 4.13). Letzteres entspricht einer Abnahme von etwa 85 % auf etwa 3-4 Eistage im Mittel pro Jahr. Dies bedeutet, dass Eistage im RCP8.5 bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erscheinung mit Seltenheitswert werden. Auch im RCP8.5 tritt die Abnahme in den tief liegenden Regionen gleichmäßig ein und ist um etwa zwei Drittel stärker im Oberharz verglichen zum Landemittel.

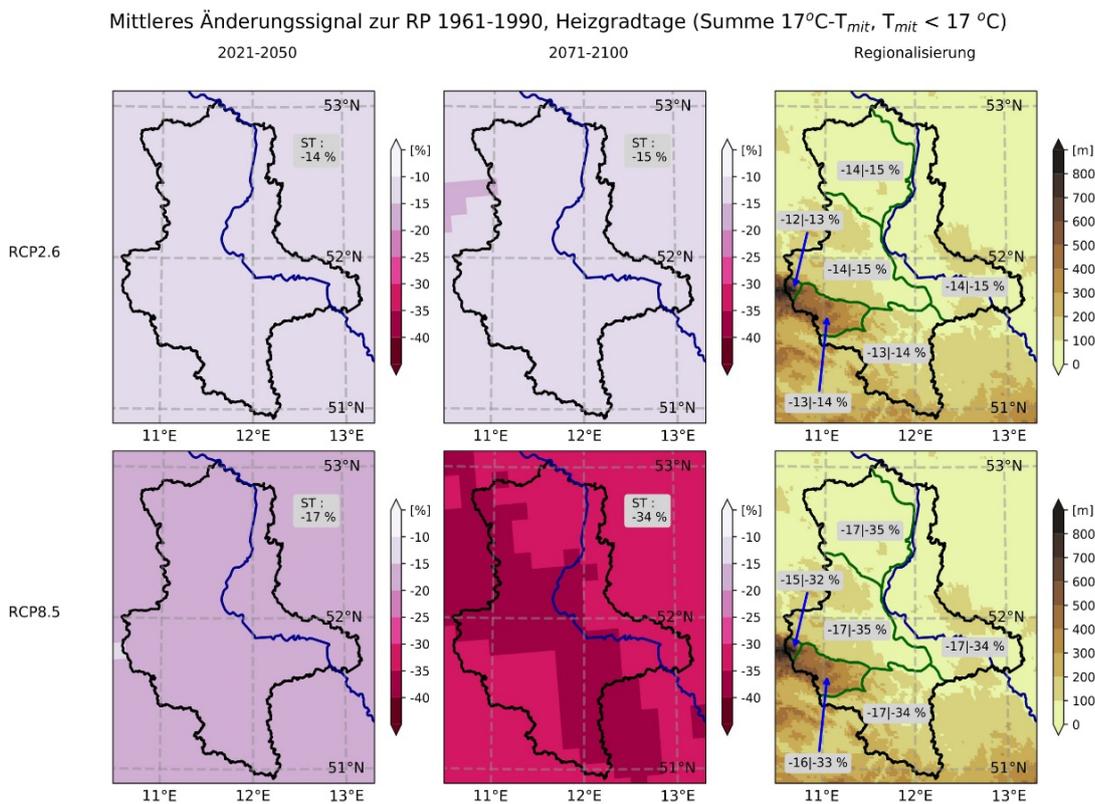


Abbildung 4.12: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Heizgradtage. Die Änderung ist als relatives Signal in % angegeben.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Anzahl der Eistage ($T_{max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

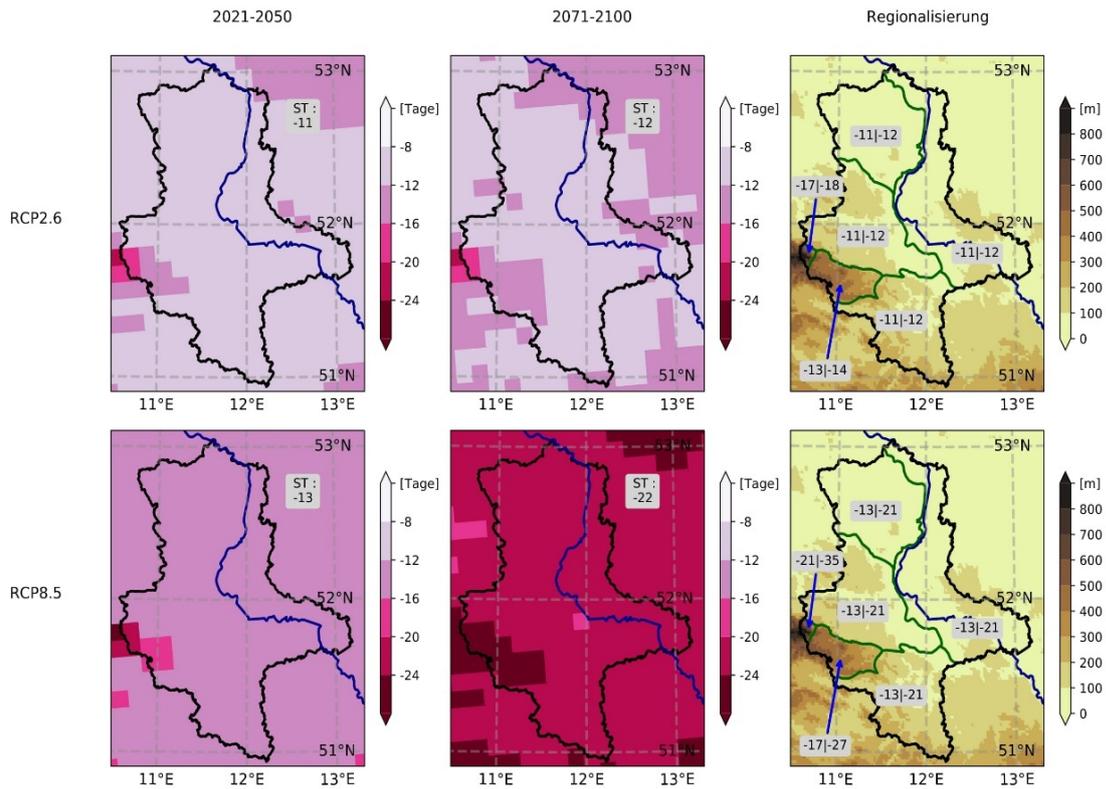


Abbildung 4.13: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Eistage.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Anzahl der Frosttage ($T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

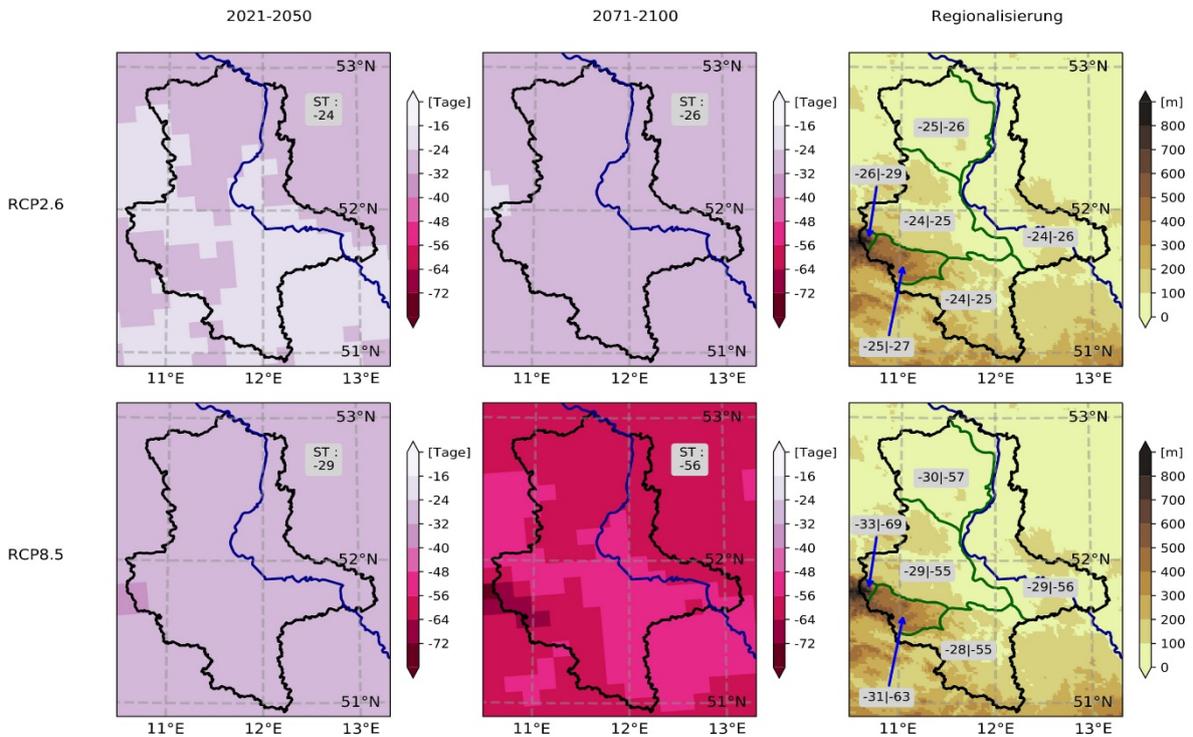


Abbildung 4.14: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Frosttage.

Auch die Ergebnisse der Klimaprojektionen bezüglich der Frosttage zeigen, dass im RCP2.6 eine deutliche Abnahme ohne weitere Verschärfung im späteren 21. Jahrhundert und im

RCP8.5 eine starke Abnahme mit deutlicher Verschärfung im späten 21. Jahrhundert stattfindet (Abb. 4.14). Die Anzahl der Frosttage geht im Landesmittel um -24 bzw. -26 Tage gegenüber der RP zurück in der nahen bzw. fernen Zukunft. Im RCP8.5 geht die Anzahl der Frosttage zunächst um -29 in der nahen und -56 Tage in der fernen Zukunft zurück. Regional ist die Abnahme der Frosttage im Mittel der Klimaprojektionen relativ gleichmäßig verteilt in den tief liegenden Regionen. Im Harz, insbesondere im Oberharz, ist die Abnahme etwas stärker mit Änderungssignalen, die im Unterharz etwa 5 bis 10 % und im Oberharz etwa 10 bis 20 % stärker sind als im Landesmittel (Abb. 4.14).

Ähnlich wie bei der Analyse der Änderung der Tiefsttemperaturen fällt auf, dass für die nähere Zukunft, RCP2.6 und RCP8.5 in ihren Auswirkungen sehr ähnlich sind, während in der weiteren Zukunft diese Klimaszenarien sehr unterschiedliche Auswirkungen haben. Im Grunde wird für das RCP2.6 in der fernZ gegenüber der nahZ kein weiterer Klimawandel festgestellt, ganz im Gegensatz zum RCP8.5, dessen Klimaprojektionen nicht nur eine weitere Verschärfung der Klimaänderungen anzeigen, sondern auch eine Erhöhung der Änderungsrate zeigt.

In den Abbildungen 4.15 und 4.16 sind die Änderungssignale für die Tropennächte und Strengfrosttage dargestellt. Die oben gemachten Feststellungen werden auch hier wieder offensichtlich bestätigt. Die Anzahl der Tropennächte steigt im RCP2.6 in der nahen und fernen Zukunft im Mittel um eine Tropennacht im Jahr an gegenüber der RP. Gleiches gilt auch für die nahe Zukunft im RCP8.5. In den Jahren 2071-2100 jedoch, steigt im RCP8.5 die Anzahl der Tropennächte um +5 im Jahr an im Landesmittel verglichen mit der RP.

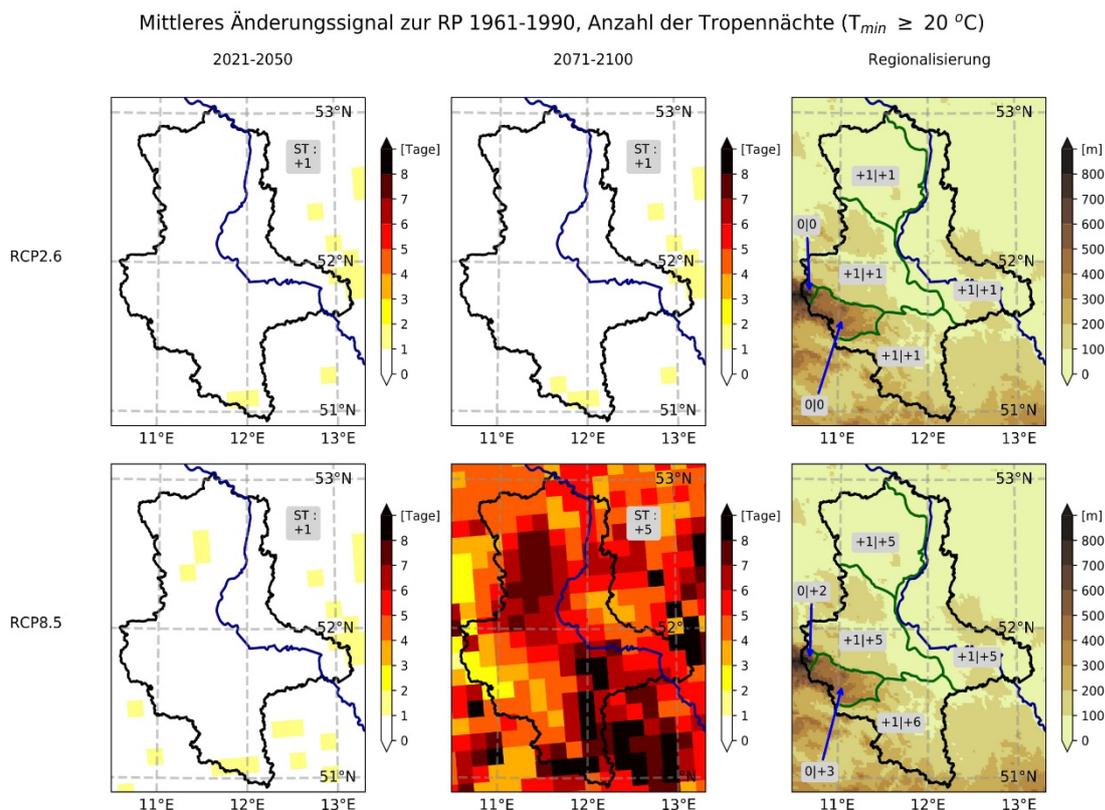


Abbildung 4.15: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Tropennächte.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Anzahl der Strengfrostage ($T_{min} \leq -10\text{ °C}$)

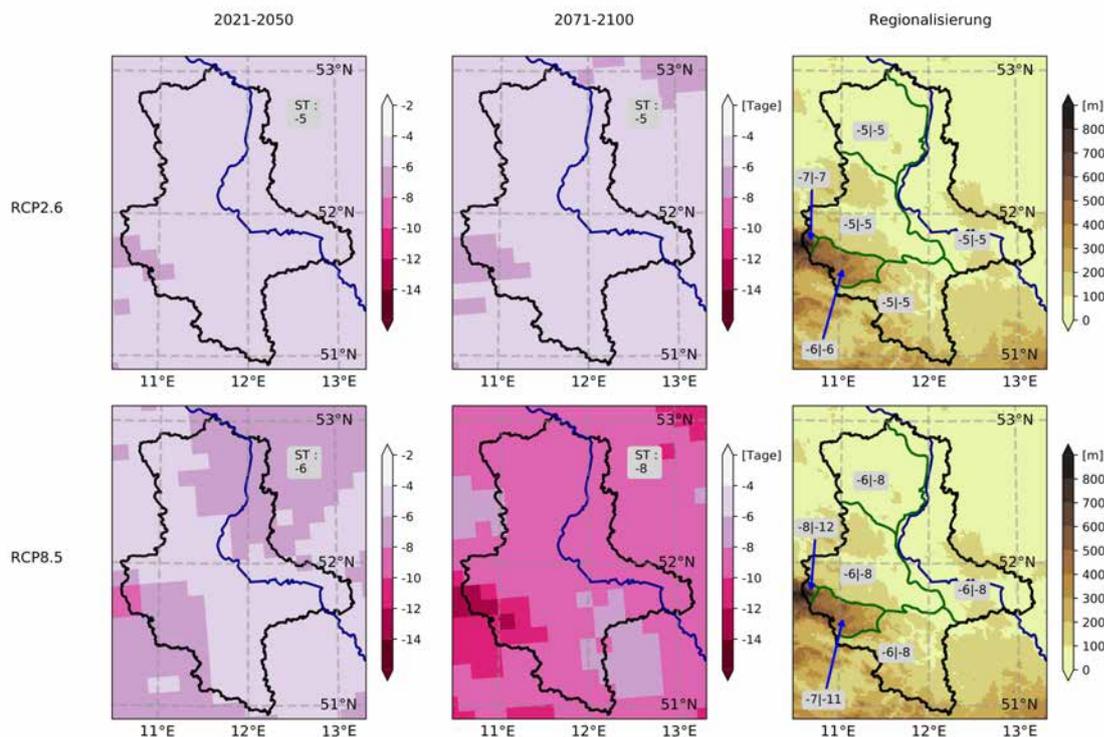


Abbildung 4.16: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Anzahl der Strengfrostage.

Die regionale Verteilung ist uneinheitlich mit großen Schwankungen zwischen einzelnen Gitterzellen, regionale Maxima finden sich jedoch in der Altmark und Börde sowie in der Leipziger Tieflandbucht und Minima im Harz. Dies weist darauf hin, dass zwischen den Klimaprojektionen eine erhöhte Unsicherheit bezüglich dieser Größe besteht. In der fernen Zukunft werden auch im Oberharz, wo Tropennächte in der RP nicht aufgezeichnet wurden, etwa zwei Tropennächte pro Jahr verzeichnet (Abb. 4.15). Die Darstellung der Strengfrostage zeigt das gleiche Muster wie die vorhergehenden Änderungssignale (Abb. 4.16). Die Abnahme der Strengfrostage beträgt -5 für das RCP2.6 und zunächst -6 Tage in der nahen und -8 Tage in der fernen Zukunft für das RCP8.5. Im Oberharz tritt eine größere Abnahme auf, während in den tief liegenden Regionen des Landes eine relativ gleichmäßige Abnahme im Mittel der Klimaprojektionen erfolgt. Ebenso wie die Eistage, werden Strengfrostage mit im Mittel der Klimaprojektionen nur noch 2 pro Jahr in der fernen Zukunft im RCP8.5 ein seltenes Phänomen werden.

Änderungssignale Anzahl der Wärmekentage zur RP 1961-1990

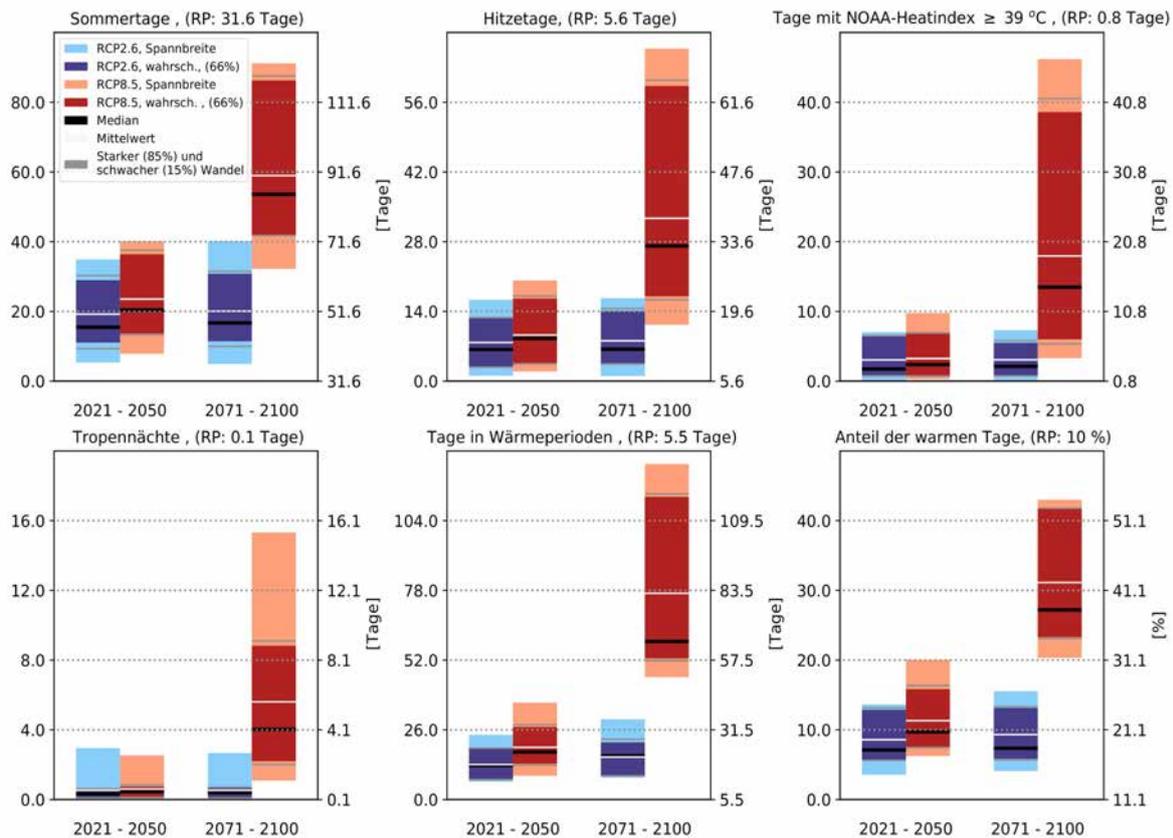


Abbildung 4.17 Bandbreite der Änderungssignale für (von oben links nach rechts unten): Sommertage, Hitzetage, Tage mit starker Hitzebelastung, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und Anteil warmer Tage. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.

In Abbildung 4.17 ist die Bandbreite der Änderungssignale für 'warme' Kentage sowie die Anzahl an Tagen pro Jahr in Wärmeperioden und der Anteil warmer Tage innerhalb des Referenzensembles abgebildet. Für das RCP2.6 ist eine in der Regel gleichbleibende Bandbreite zu erkennen für beide Zukunftsperioden und auch der Wertebereich ist für beide Perioden sehr ähnlich. Der Anstieg der Anzahl der Sommertage liegt im RCP2.6 bei wahrscheinlich +10 bis +30 Tagen oder +30 bis nahe +100 %, bei Hitzetagen sind es wahrscheinlich +3 bis +14 Tagen oder +50 bis +270 %, die Anzahl der Tage mit starker Hitzebelastung steigt wahrscheinlich um +1 bis +6 Tage. Die Anzahl der Tropennächte steigt wahrscheinlich um etwa einen Tag im RCP2.6 und die Anzahl der Tage in Wärmeperioden steigt um wahrscheinlich +3 bis +14 Tage und der Anteil warmer Tage steigt im RCP2.6 wahrscheinlich um +6 bis +14 % an gegenüber der RP (Abb. 4.17). Die Schwankungen zwischen naher und ferner Zukunft sind sehr gering im RCP2.6. Das RCP8.5 weist in der nahZ Änderungssignale von ähnlicher Größenordnung wie das RCP2.6 auf, die Bandbreiten dieser Szenarien überlappen sich in der nahZ weitestgehend vollständig, wobei jedoch die Bandbreite des RCP8.5 geringfügig zu höheren Werten verschoben ist und etwas größer ist als die des RCP2.6. Die Änderungssignale im RCP8.5 sind in der fernen Zukunft deutlich größer und weiter gestreut mit größerer Bandbreite (Abb. 4.17). Für Sommertage, Tropennächte, Tage in Wärmeperioden und den Anteil der warmen Tage überlappen sich die unteren Bereiche der wahrscheinlichen Bandbreite der Änderungssignale des RCP8.5 in der fernen Zukunft überhaupt nicht mit dem wahrscheinlichen Bereich der anderen Szenarien bzw. der nahen Zukunft. Auch für die Hitzetage und die Tage mit starker Hitzebelastung liegt der unterste

Bereich der wahrscheinlichen Bandbreite des fernen Zukunftssignals des RCP8.5 gleichauf mit den größten Änderungssignalen im wahrscheinlichen Bereich der anderen Zeiträume und Szenarien. Die Bandbreite der Änderungssignale in der fernen Zukunft im RCP8.5 ist mehrere Male größer als die Bandbreite des RCP2.6 oder der nahen Zukunft des RCP8.5, was die Unsicherheit über die Stärke der Änderung im Falle anhaltender THG-Emissionen verdeutlicht.

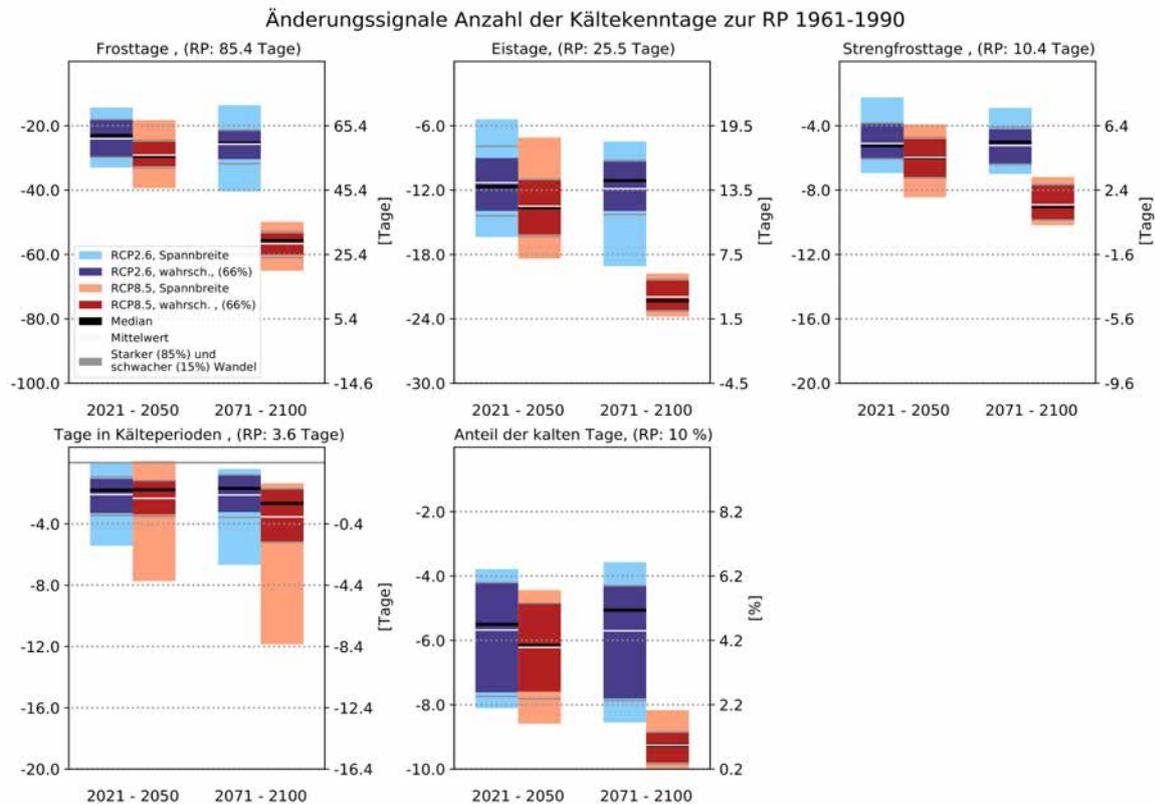


Abbildung 4.18: Bandbreite der Änderungssignale für (von oben links nach rechts unten): Frosttage, Eistage, Strengfrostage, Tage in Kälteperioden und Anteil kalter Tage. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.

Die Mittelwerte der Änderungssignale liegen im Referenzensemble etwas über dem Median für das RCP8.5. Die Stärke der Änderung im RCP8.5 in der fernen Zukunft repräsentiert einen zum Klimazustand der RP völlig anderen Klimazustand mit deutlich größerer Hitzebelastung. Die Darstellung in Abbildung 4.17 zeigt ebenso deutlich, dass im RCP2.6 der Hauptteil der Änderung des Klimas bis in die nahe Zukunft schon abgelaufen ist und im weiteren Verlauf keine nennenswerte Änderung auftritt, während im RCP8.5 ein Großteil der deutlich stärkeren Änderung mit größerer Geschwindigkeit erst 2071-2100 spürbar wird.

Für die Änderungssignale 'kalter' Kenntage lassen sich die obigen Aussagen über warme Kenntage nicht ohne weiteres übertragen. Die in Abbildung 4.18 dargestellten Bandbreiten der Änderungssignale innerhalb des Referenzensembles zeigen, dass Bereich der Änderungssignale und Schwankungsbreite des RCP2.6 sich nicht wesentlich unterscheidet zwischen naher und ferner Zukunft. Die Bandbreiten des RCP8.5 sind in der nahen Zukunft ähnlich zu der des RCP2.6, wengleich etwas mehr zu negativeren Änderungssignalen verschoben. Bei der Anzahl der Tage in Kälteperioden liegt der wahrscheinliche Bereich für RCP2.6 und nahe Zukunft des RCP8.5 bei -1,5 bis -3,6 Tagen, was in Anbetracht des Mittels der RP ein sehr großer Bereich ist. Einzelne Klimaprojektionen weisen noch stärkere Änderungssignale auf, da in deren historischen Simulationen die Anzahl der Tage in Kälteperioden größer ist als im HYRAS-Datensatz. Die Anzahl der Tage in Kälteperioden ist

auch der einzige Parameter, bei dem der wahrscheinliche Bereich der fernen Zukunft überhaupt Überschneidungen mit der nahen Zukunft bzw. dem RCP2.6 aufweist. Alle anderen kalten Kenntage zeigen in der fernen Zukunft für die Projektionen des RCP8.5 zum einen Änderungssignale stärker als in den anderen Szenarien und Zeiträumen und zum anderen ist die Schwankungsbreite verhältnismäßig gering. Bei den Parametern Eistage und Strengfrostnächte entspricht die Bandbreite des RCP8.5 in der fernen Zukunft in etwa einer nahezu völligen Abwesenheit dieser Parameter mit nur noch 2 bis 5 Eistagen bzw. 0 bis 2,5 Strengfrostnächten pro Jahr. Dies gilt auch für den Anteil der kalten Tage, der in der fernZ auf 0,5 bis 1,5 % im RCP8.5 abnimmt, ansonsten aber wahrscheinlich auf 2 bis 6 % zurückgeht in der nahen Zukunft und im RCP2.6 (Abb. 4.18). Eine zunehmende Geschwindigkeit bzw. eine höhere Änderungsrate im RCP8.5 zwischen fernZ und nahZ verglichen mit der Änderung zwischen nahZ und RP ist in den kalten Kenntagen kaum feststellbar. So findet der Rückgang der Frosttage im RCP8.5 bis zur nahZ mit einer Rate von etwa -5 pro Dekade statt und fährt dann mit gleicher Geschwindigkeit fort.

4.3 Extremtemperaturen

Die in Abbildung 4.19 dargestellten Änderungssignale der 99. Perzentile und jährlichen Maxima der Temperaturen zeigt erneut das bereits festgestellte Muster mit moderater und nicht weiter verschärfender Erwärmung im RCP2.6 sowie zunächst moderater und in der fernZ deutlich verschärfender Erwärmung im RCP8.5. Die Bandbreite der Änderung des 99. Perzentils und des jährlichen Maximums ist für das T_{\max} deutlich größer als für das T_{\min} . Die wahrscheinlichen Änderungssignale liegen für das RCP2.6 und die nahe Zukunft im RCP8.5 wahrscheinlich zwischen etwa +0,5 und +3 K bzw. +2 K für das T_{\max} bzw. T_{\min} . Die Änderungssignale von 99. Perzentil und durchschnittlichem Maximum unterscheiden sich kaum.

Für die ferne Zukunft des RCP8.5 liegt die wahrscheinliche Bandbreite bei +3,2 bis +9,5 K für das T_{\max} und bei +2,5 bis +5 K für das T_{\min} . Das durchschnittliche T_{\max} , das in Abbildung 4.19 dargestellt ist, liegt in nicht wenigen Projektionen bei über 40 °C, was bisher in Sachsen-Anhalt weder an einzelnen Stationen noch im Flächenmittel erreicht wurde.

Wie in den bisherigen Ergebnissen zeigt sich im RCP2.6 kein wesentlicher Wandel zwischen nahZ und fernZ, während im RCP8.5 die Änderung zwischen der nahen und fernen Zukunft stärker ausfällt, als die Änderung zwischen RP und naher Zukunft. Die im RCP8.5 gezeigten Änderungssignale überlappen sich kaum mit den Projektionen für andere Zeiträume und Szenarien. Es gibt keine Projektionen im RCP8.5, deren Änderungssignal in der nahZ nicht kleiner ist als in der fernZ.

Änderungssignale hoher Extremtemperaturen zur RP 1961-1990

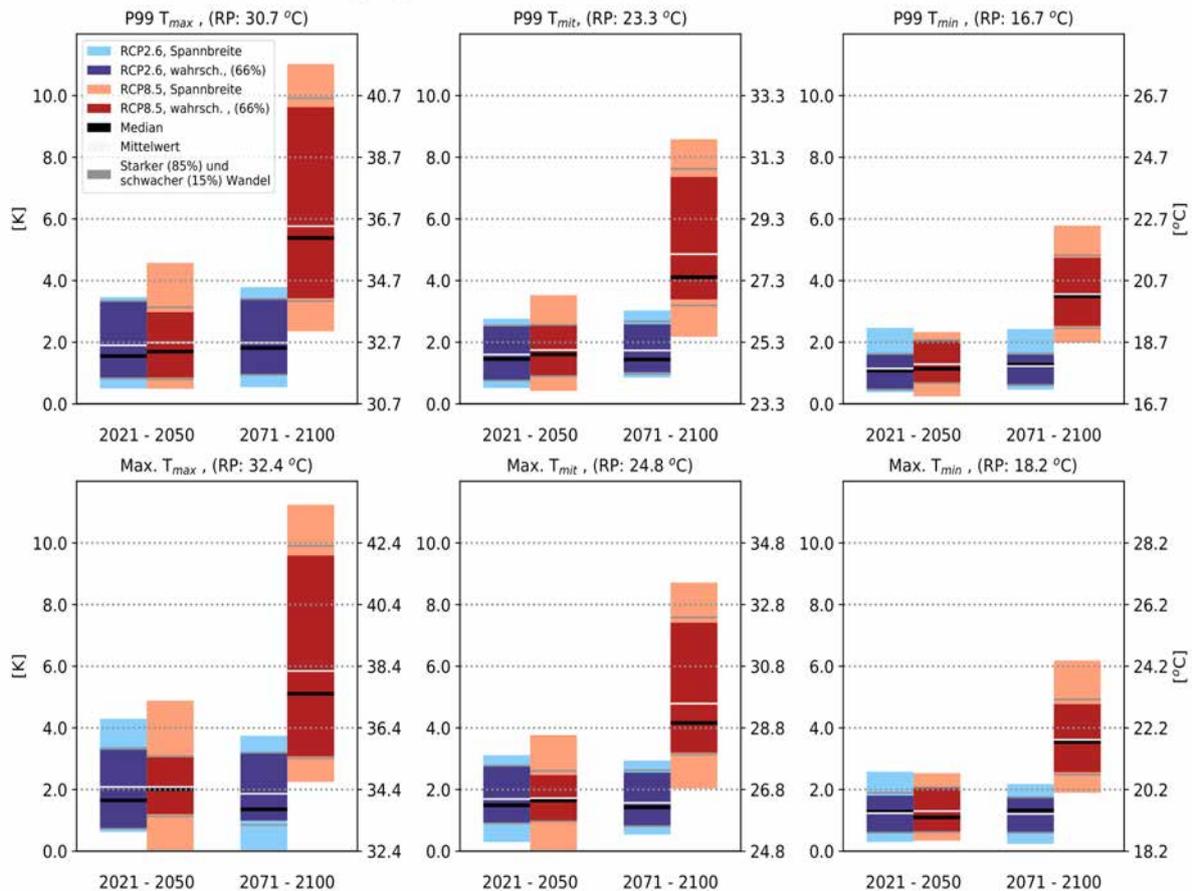


Abbildung 4.19: Bandbreite der Änderungssignale für das 99. Perzentil (oben) und das durchschnittliche jährliche Maximum (unten) von T_{max} , T_{mit} und T_{min} (v.l.n.r.).

Auf der kalten Seite der Temperaturextreme findet eine ähnliche Änderung wie bei den warmen Extremen statt (Abb. 4.20). Die Schwankungsbreite der Änderungssignale für das T_{max} ist allerdings im Gegensatz zu den hohen Extremtemperaturen kleiner als die des T_{min} . Bezüglich der Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 kann in der nahen und fernen Zukunft erneut die gleiche Aussage getroffen werden mit der interessanten Ergänzung, dass im RCP8.5 vereinzelt Projektionen für das 1. Perzentil in der nahZ sogar ein Signal nahe oder minimal unter 0 K berechnen. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass die Projektionen des RCP2.6 allesamt positive Änderungssignale zeigen. Da dieses negative Änderungssignal nur im MPI-CLM Modelllauf für das RCP8.5 aber nicht für das RCP2.6 auffällt, muss die Erklärung in den Wetterlagen liegen, die in diesem Modell auftreten. Die Verstärkung der Erwärmung ist in den Projektionen des RCP8.5 in der fernen Zukunft abzulesen an der Tatsache, dass der untere Bereich der wahrscheinlichen Bandbreite grundsätzlich oberhalb der gesamten wahrscheinlichen Bandbreite des RCP2.6 und der nahen Zukunft liegt.

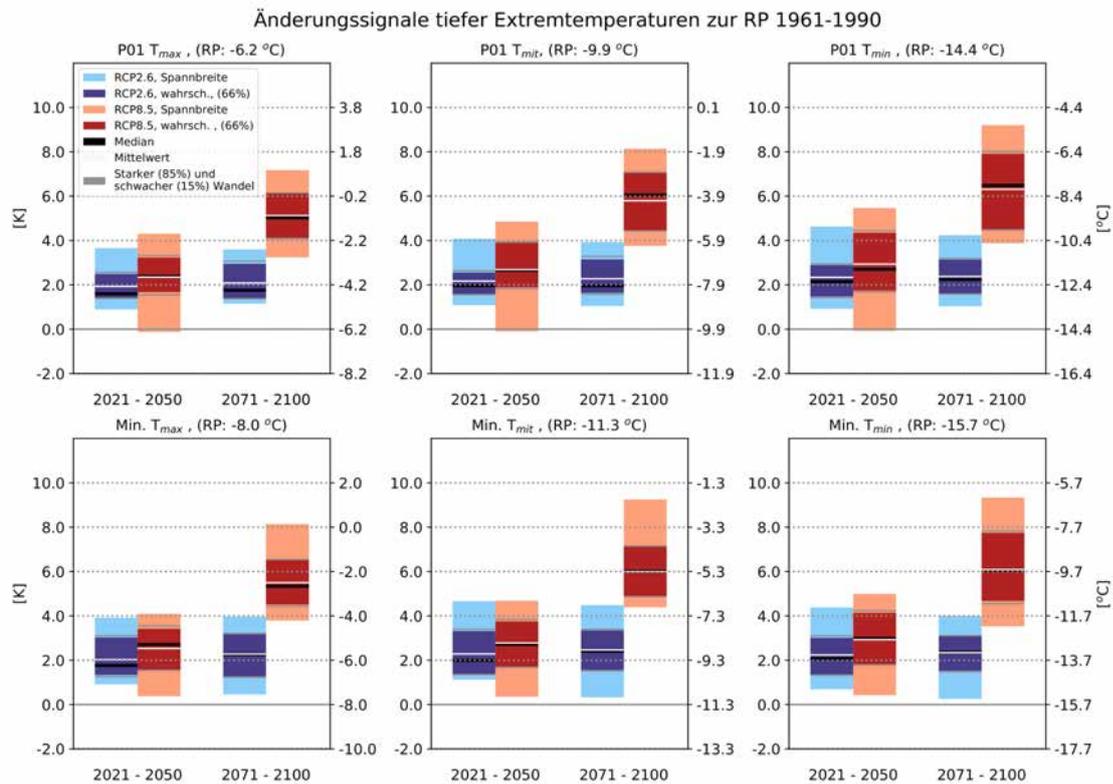


Abbildung 4.20: Bandbreite der Änderungssignale für das 1. Perzentil (oben) und das durchschnittliche jährliche Minimum (unten) von T_{max} , T_{mit} und T_{min} (v.l.n.r.). Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.

Die Änderungssignale der tiefen Extremtemperaturen sind im Vergleich mit den oberen Extremtemperaturen geringfügig schwächer ausgeprägt, speziell in der fernen Zukunft des RCP8.5. Änderungen von 10 K wie in den extremsten Projektionen für die höchsten Temperaturen im RCP8.5 sind für die tiefen Extremtemperaturen nicht berechnet worden.

4.4 Thermische Vegetationsperiode

Die Länge der thermischen Vegetationsperiode betrug in der RP etwa 246 Tage im Landesmittel und der Beginn datiert etwa auf den 18. März, was dem 76. Kalendertag entspricht. In Abbildung 4.21 ist die mittlere Änderung der Länge und in Abbildung 4.22 die mittlere Änderung des Beginns der Vegetationsperiode dargestellt in Bezug auf das Referenzensemble.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Beginn der Vegetationsperiode

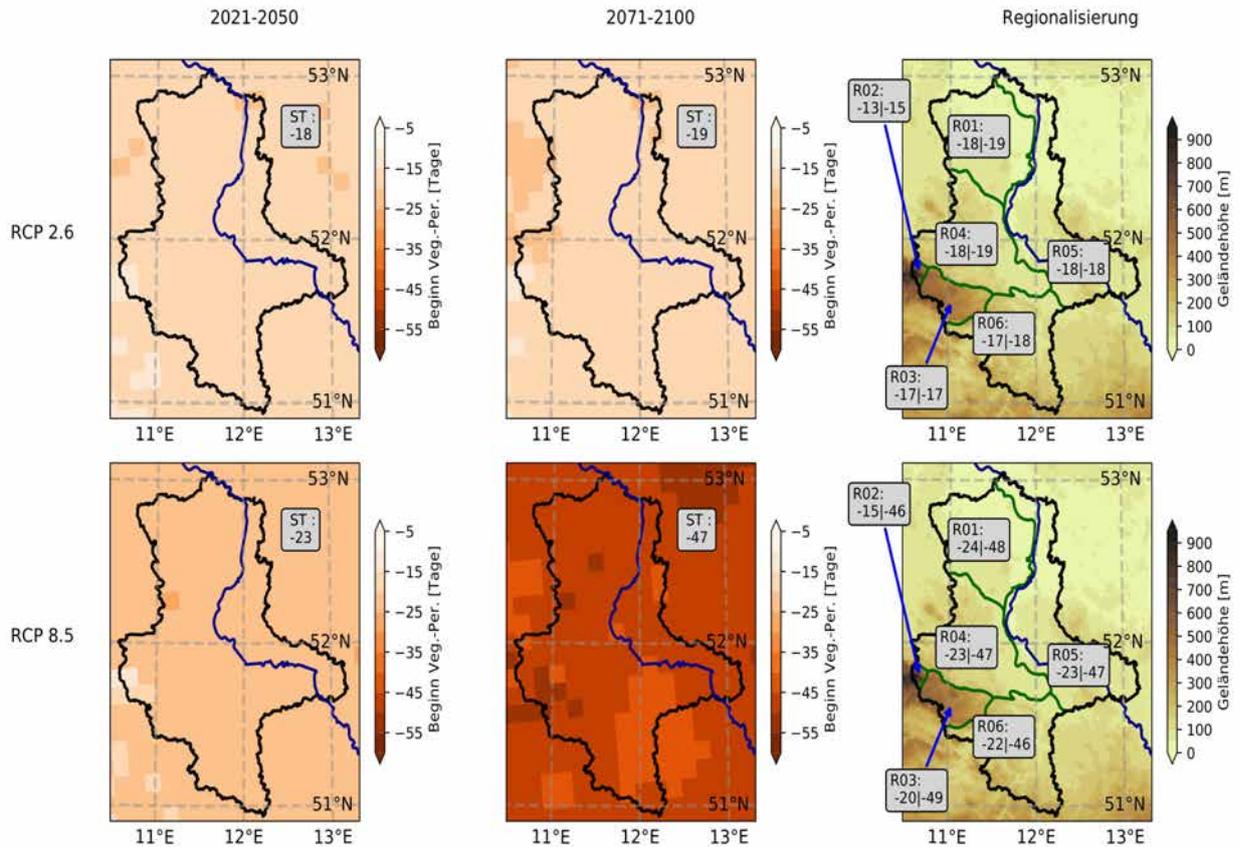


Abbildung 4.21: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für den Beginn der thermischen Vegetationsperiode.

Der Beginn der Vegetationsperiode tritt deutlich früher als in der RP ein, im RCP2.6 etwa 18 bis 19 Tage früher im Landesmittel, während sich der Beginn der thermischen Vegetationsperiode um zunächst 23 Tage in der nahZ und dann 47 Tage in der fernZ verfrüht. Die regionale Verteilung zeigt, dass sich in den tief liegenden Regionen die Vegetationsperiode im Norden des Landes stärker verfrüht als im Süden, die Differenz der Änderungssignale beträgt etwa 1-2 Tage. Im Harz ist die Verfrüfung der Vegetationsperiode im RCP2.6 etwas weniger ausgeprägt mit etwa 13 bis 15 Tagen und damit etwa 4 bis 5 Tagen weniger Verfrüfung im Oberharz verglichen mit dem Landesmittel. Im RCP8.5 beträgt der Unterschied zunächst etwa 8 Tage, verkürzt sich in der fernZ jedoch auf 1 Tag, während sich der Eintritt der Vegetationsperiode im Unterharz sogar stärker nach vorne verschiebt als im Landesmittel mit -49 Tagen (Abb. 4.21).

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Länge der Vegetationsperiode

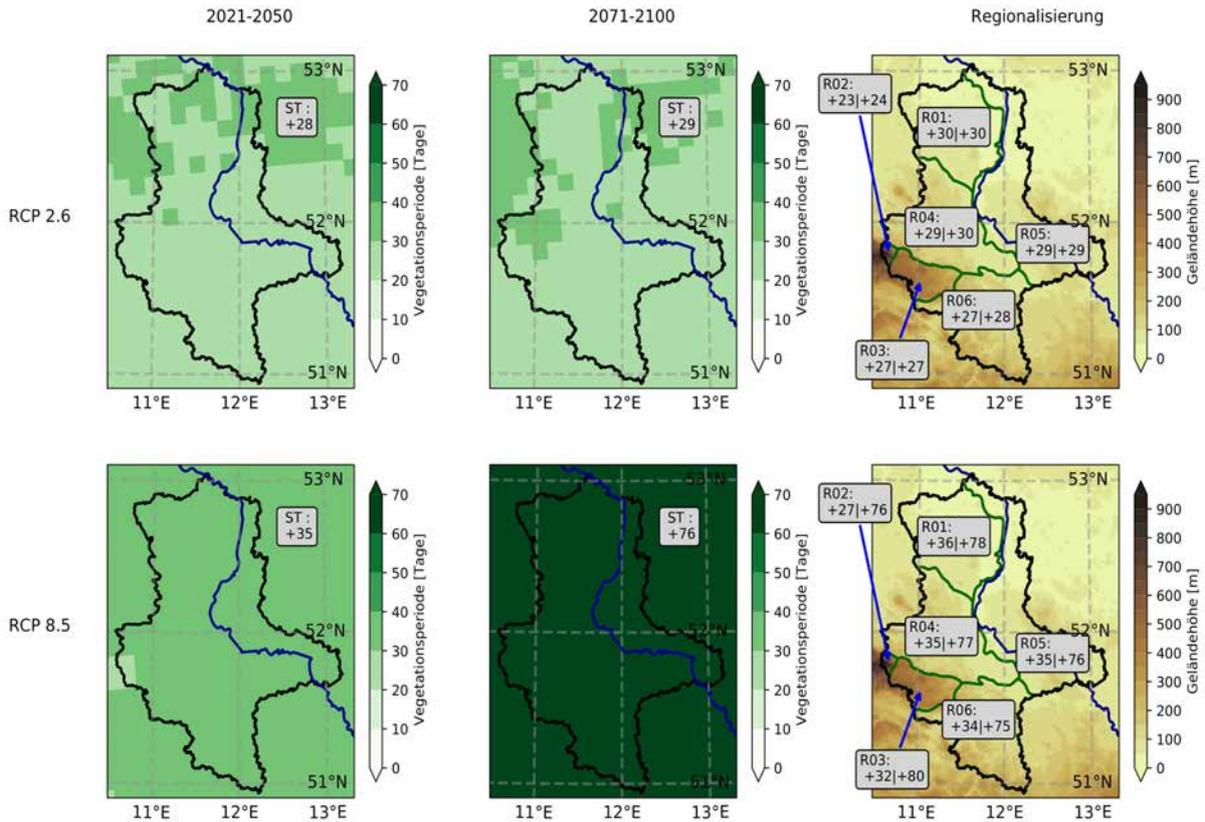


Abbildung 4.22: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Länge der thermischen Vegetationsperiode.

Bezüglich der Länge der Vegetationsperiode ergibt sich eine Verlängerung um etwa +28–+29 Tage in naher und ferner Zukunft für das RCP2.6 im Mittel alle Projektionen des Referenzensembles. Im RCP8.5 nimmt die Länge der Vegetationsperiode im Landesmittel zunächst um +35 Tage in der nahen und um +76 Tage in der fernen Zukunft zu gegenüber der RP. Auch für die Länge der Vegetationsperiode treten im Norden des Landes etwa um 1–2 Tage größere Änderungssignale auf, was auf die stärkere Verfrühung zurückzuführen ist (Abb. 4.22). Im RCP2.6 fällt die Verlängerung der Vegetationsperiode im Harz mit zunehmender Höhenlage weniger deutlich aus mit +23 bis +24 Tagen längerer Vegetationsperiode im Oberharz. Im RCP8.5 trifft dies mit +27 Tagen Zunahme gegenüber +35 im Landesmittel zunächst - in der nahZ - ebenfalls zu (Abb. 4.22). Jedoch bewegt sich in der fernZ die Zunahme der Länge der Vegetationsperiode auf dem gleichen Level wie in den tiefen Regionen, während diese im Unterharz mit +80 Tagen sogar stärker ausfällt.

Die Besonderheiten bei der Veränderung der Vegetationsperiode im Harz dürften mit der Tatsache zusammenhängen, dass die Schwellwerttemperatur von 5 °C in der fernZ in etwa den mittleren Wintertemperaturen entspricht und damit auch in milderer Witterungsphasen diese Temperatur deutlich früher überschritten werden kann. Bei geringerer Erwärmung wie im RCP2.6 wird diese Marke in den höheren Lagen deutlich später überschritten als in tieferen Lagen und auch deutlich früher unterschritten.

4.5 Niederschlagsmengen

Die jährlichen und saisonalen Niederschlagsmengen sind bedeutsam für den natürlichen Kreislaufes der Ökosysteme und auch der Land- und Energiewirtschaft in Sachsen-Anhalt. Besonders unter dem Eindruck der Auswirkungen der letzten trockenen und warmen Sommer, ist es besonders wichtig, die Veränderung der Niederschlagssummen für die Zukunft zu kennen, um gegebenenfalls Anpassungsmaßnahmen treffen zu können. Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, liegt Sachsen-Anhalt zu großen Teilen in einer vergleichsweise trockenen Zone in Mitteleuropa, weshalb die Bereiche außerhalb des Harzes auch als 'Mitteldeutsches Trockengebiet' bezeichnet werden, wo teilweise weniger als 500 mm Niederschlag pro Jahr fallen, während am Brocken über 1800 mm niedergehen.

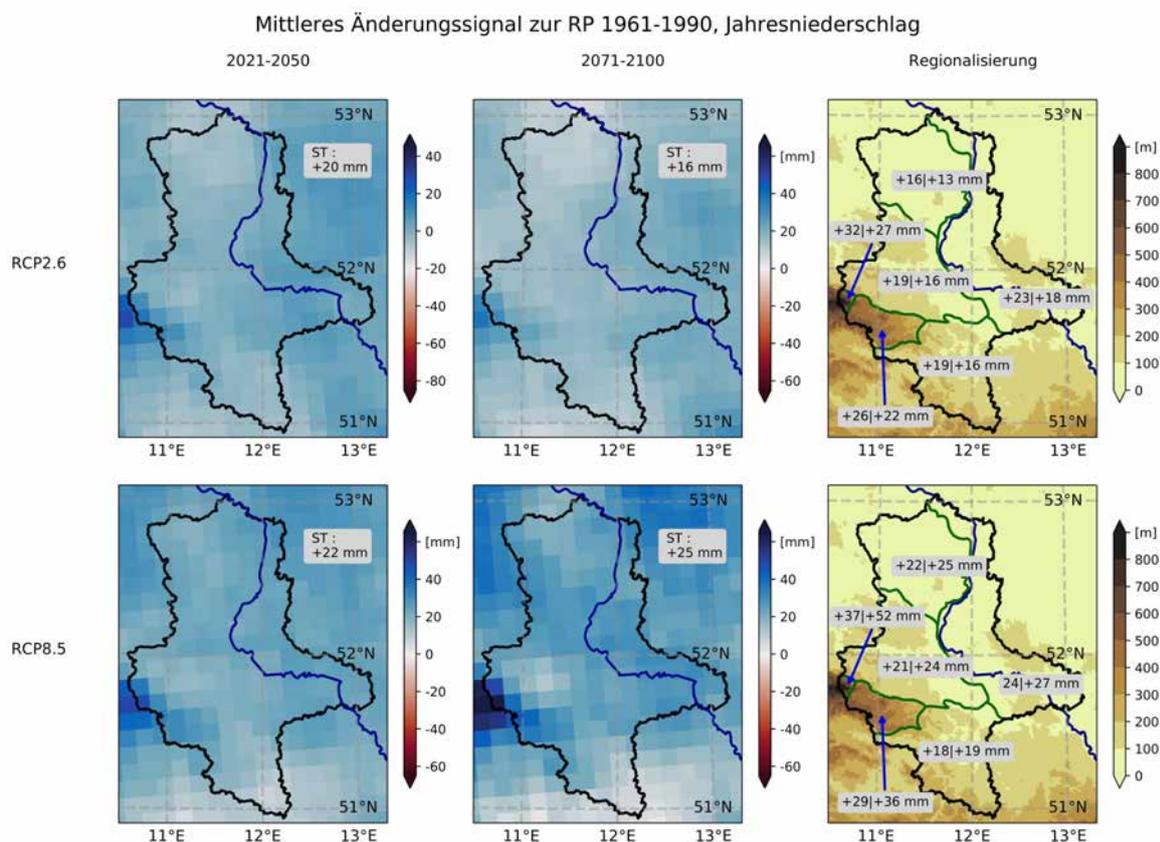


Abbildung 4.23: Mittleres Änderungssignal in [mm] gegenüber der RP für den Jahresniederschlag.

In Abbildung 4.23 sind die mittleren Änderungssignale der Klimaprojektionen des Referenzensembles dargestellt. Für das Gesamtjahr sehen die Klimaprojektionen im Mittel eine leichte Zunahme der Niederschläge. Die Änderungen liegen in allen Szenarien bei etwa +20 mm, was etwa +4 % gegenüber dem langjährigen Mittel der RP von 544 mm entspricht. Die regionale Verteilung ist etwas uneinheitlich, jedoch ist die Zunahme an den westexponierten Hängen des Harzes am größten und im Süden und Norden des Landes am geringsten (Abb. 4.23). Auch im östlichen Sachsen-Anhalt nehmen die Niederschläge im Mittel vergleichsweise mehr zu. Wie aus den Abbildungen 4.24 und 4.25 hervorgeht, sind die Änderungssignale der Niederschlagsmengen nicht gleichmäßig über das Jahr hinweg verteilt. Für das Winterhalbjahr wird im Mittel der RCP2.6 Projektionen eine Zunahme von zunächst +8 % in der nahen und dann +6 % in der fernen Zukunft berechnet. Die regionale Verteilung der relativen Zunahme ist einheitlich über das ganze Land verteilt. Im RCP8.5 wird in der nahZ für das Winterhalbjahr eine Zunahme von +8 % berechnet, während in der fernZ eine Zunahme von +17 % berechnet (Abb.

4.24). Die regionale Verteilung der Zunahme des Niederschlags im Winterhalbjahr im RCP8.5 ist relativ einheitlich, wenn auch auffällt, dass die nördlichen und östlichen Regionen des Landes sowie die südwestlichen Hänge des Harzes höhere und die unmittelbar östlich des Harzes liegenden Gebiete weniger hohe Zunahmen verzeichnen.

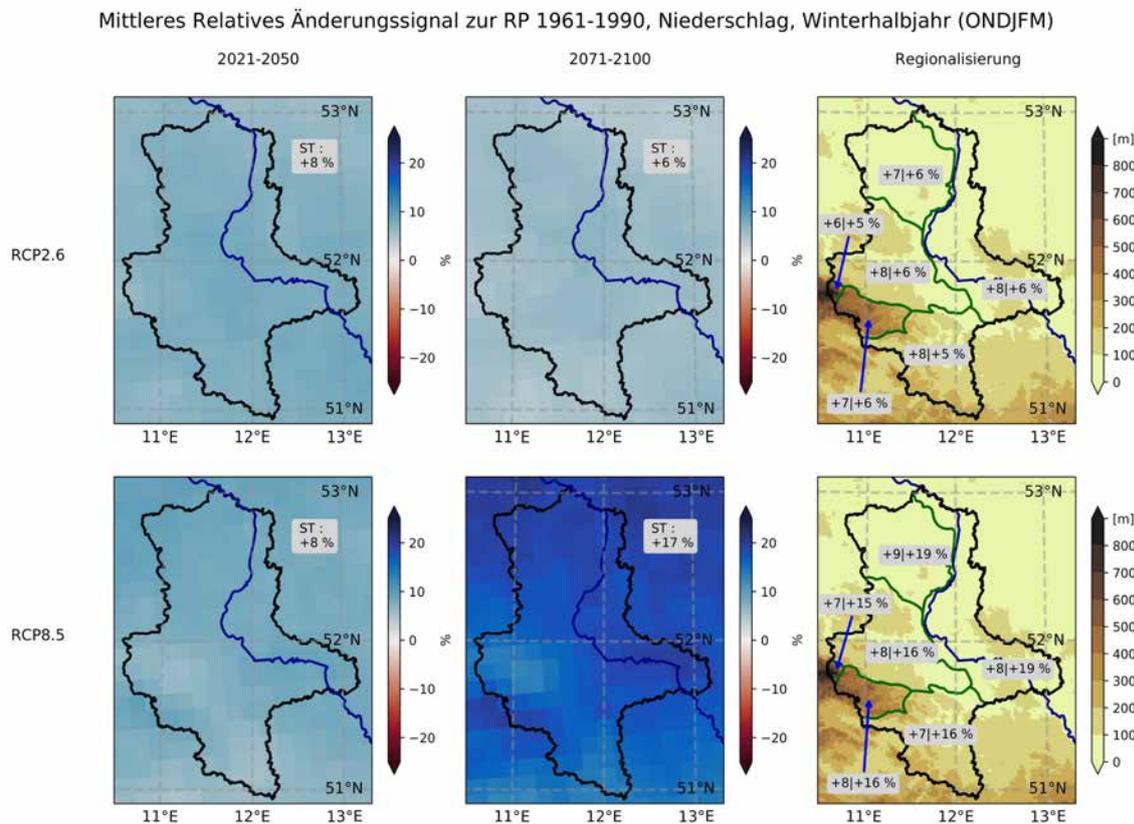


Abbildung 4.24: Mittleres relatives Änderungssignal in [%] gegenüber der RP für den Niederschlag im Winterhalbjahr (Oktober bis März).

Im Sommerhalbjahr ist das mittlere Änderungssignal weniger einfach zu interpretieren. Im RCP2.6 wird eine unbedeutende Zunahme von +1 % berechnet, während im RCP8.5 in der nahZ zunächst ebenfalls keine nennenswerte Änderung im Mittel der Projektionen zu erkennen ist mit +1 % und in der fernen Zukunft eine Abnahme um im Mittel -5 % eintritt (Abb. 4.25). Die regionale Verteilung zeigt, dass die trockensten Regionen am wenigsten Niederschlag einbüßen, während insbesondere im Norden und im Süden etwas höhere Signale von bis zu -7 % erkennbar sind. Die Betrachtung der Niederschlagsmenge im Sommerhalbjahr macht deutlich, dass ein Blick auf die Gesamtheit der Klimaprojektion im Referenzensemble wichtig ist.

Mittleres Relatives Änderungssignal zur RP 1961-1990, Niederschlag, Sommerhalbjahr (AMJJAS)

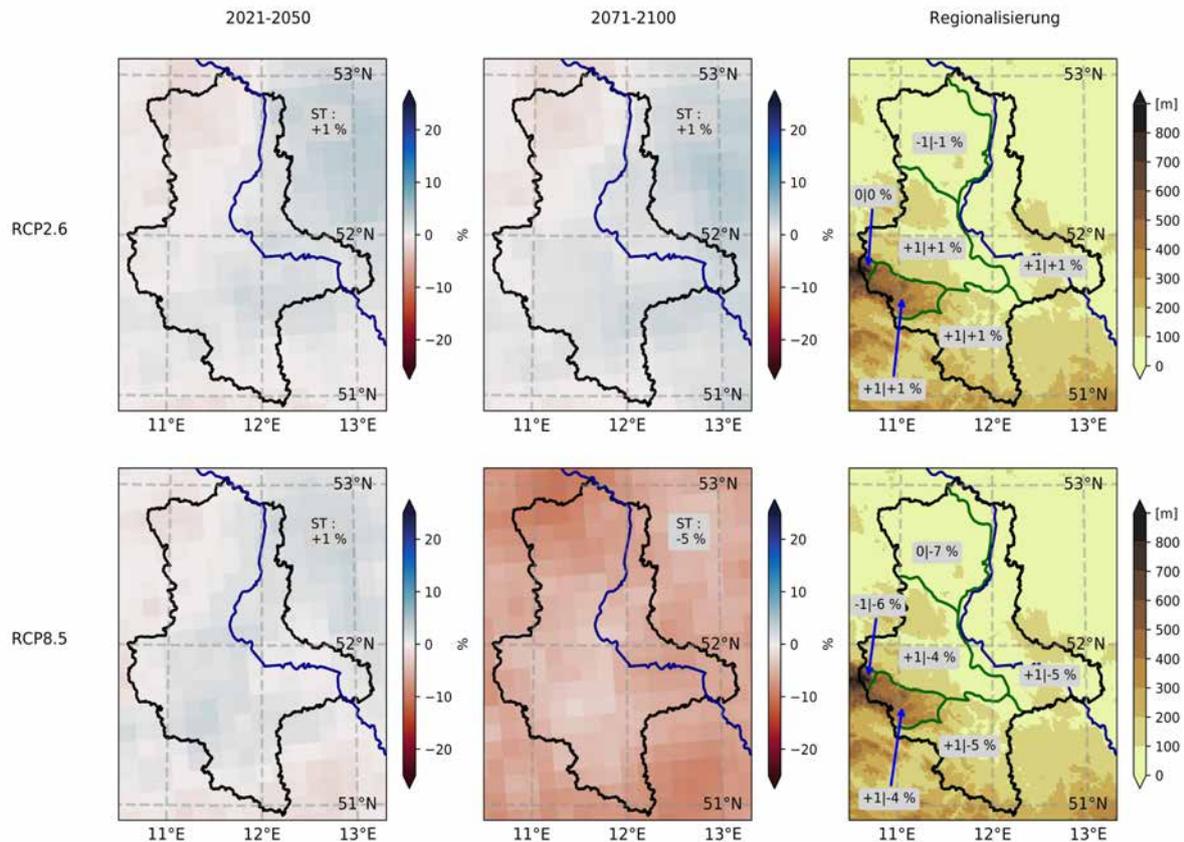


Abbildung 4.25: Mittleres relatives Änderungssignal in [%] gegenüber der RP für den Niederschlag im Sommerhalbjahr (April bis September).

Abbildung 4.26 zeigt die jahreszeitlich aufgeschlüsselten Änderungssignale des Referenzensembles. An der Tatsache, dass die Signale für das Gesamtjahr sowie die Mehrzahl der Jahreszeiten in beide Richtungen, Ab- oder Zunahme, weisen, wird bereits deutlich, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niederschlagsmengen nicht einfach zu bestimmen sind. Im Jahresmittel ist im RCP2.6 eine Änderung von 0 bis +50 mm pro Jahr wahrscheinlich für beide Zukunftszeiträume, während der Bereich der wahrscheinlichen Änderung im RCP8.5 weiter gefasst ist. Hier werden zunächst -10 bis +55 mm in der nahZ und -30 bis +90 mm in der fernZ als wahrscheinlicher Bereich projiziert. Für den Winter berechnet die Mehrzahl der Läufe im RCP2.6 eine Zunahme um +5 bis +20 mm und im RCP8.5 zunächst um +5 bis +25 mm und in der fernen Zukunft um +15 bis +35 mm, was einer Zunahme von +14 bis +30 % entspräche (Abb. 4.26). Für den Frühling ergibt sich ebenfalls eine Tendenz zu einer wahrscheinlichen Zunahme der Niederschlagsmengen. Die Projektionen des RCP2.6 berechnen etwa 0 bis +30 mm, die Projektionen des RCP8.5 zunächst 0 bis +25 mm in der nahen und -5 bis +40 mm in der fernen Zukunft. Für den Sommer schließt die wahrscheinliche Bandbreite der Projektionen des RCP2.6 die 0 mm grundsätzlich mit ein, es wird also keine wesentliche Änderung projiziert. Gleiches gilt auch für das RCP8.5, jedoch reichen die Änderungssignale weiter in den negativen Bereich herab. In der nahen Zukunft werden wahrscheinlich -25 bis +5 mm und in der fernZ -70 bis +10 mm projiziert. Aus diesen Signalen lässt sich keine belastbare Aussage über die Niederschlagsmengen treffen, außer dass die Wahrscheinlichkeit einer deutlichen Abnahme der Sommerniederschläge unter Annahme des RCP8.5 größer als die einer Zunahme ist. Im Herbst wird von Projektionen beider Szenarien eine Zunahme der Niederschläge berechnet, im RCP2.6 von etwa +5 bis +20 mm und im RCP8.5 erst +10 bis +25 mm in der nahen und dann +20 bis +35 mm in der fernen Zukunft.

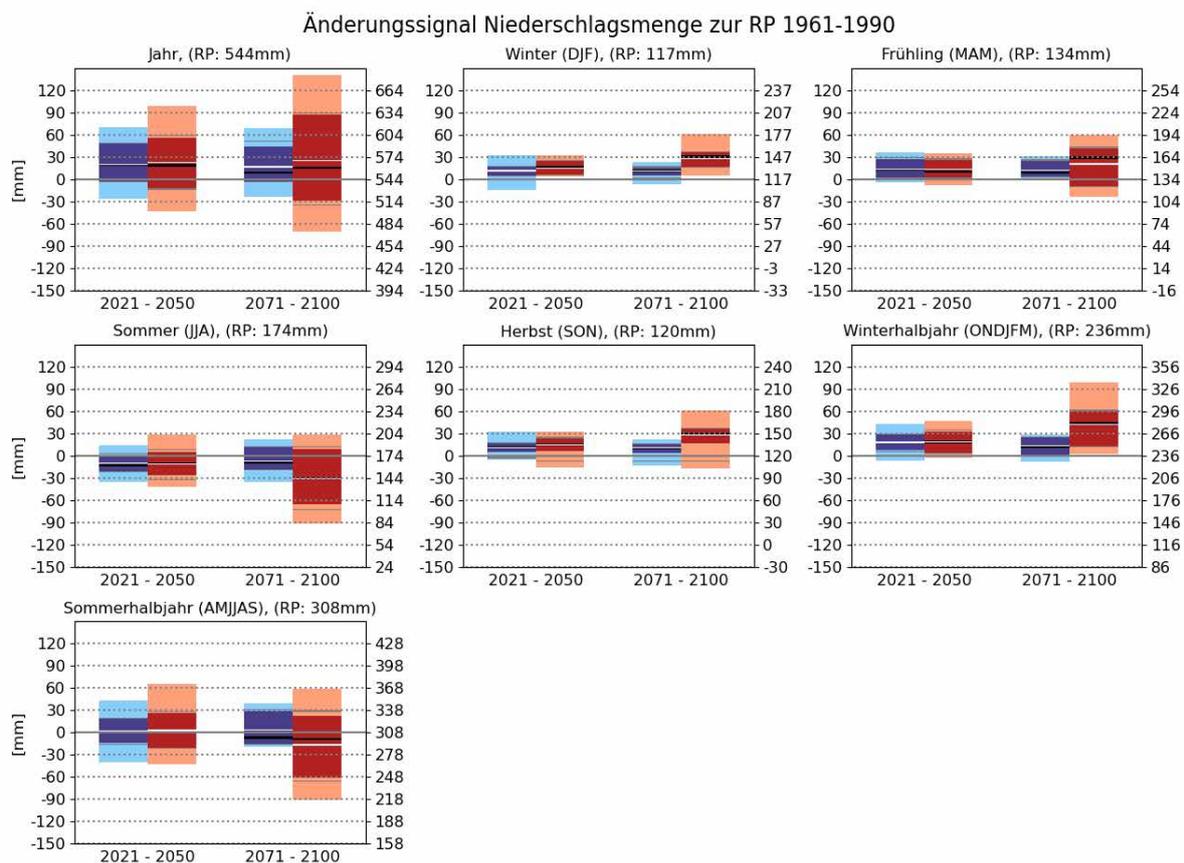


Abbildung 4.26: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale Niederschlagsmengen. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.

Summiert über die Halbjahre ergibt sich ein moderater Anstieg der Niederschlagsmengen von +10 bis +30 mm im Winterhalbjahr für das RCP2.6 und von +5 bis +30 mm in der nahen und +10 bis +60 mm in der fernen Zukunft für das RCP8.5. Weniger deutlich sind die Aussagen, die über die Niederschlagsmengen im Sommerhalbjahr getroffen werden können. In der nahen Zukunft liegen die Verteilungen der Projektion von RCP2.6 und RCP8.5 um 0 herum verteilt, es ist also am wahrscheinlichsten, dass gegenüber der RP in diesem Zeitraum keine Änderung eintritt. In der fernZ ist der wahrscheinliche Bereich des RCP2.6 mit -10 bis +30 mm in Richtung positiver Signale verschoben, der Median liegt jedoch bei -10 mm. Für das RCP8.5 liegt der Median ebenfalls bei etwa -10 mm, jedoch ist der Bereich zu negativen Werten verschoben von -60 bis +25 mm (Abb. 4.26).

4.6 Niederschlagstage

Da sich für die Niederschlagsmengen die Betrachtung der Halbjahre als aussagekräftiger erweist als die Betrachtung des Gesamtjahres, wird ebenso in Bezug auf die Regentage verfahren. Für das Winterhalbjahr zeigt das RCP2.6 eine Zunahme von +6 % in der nahZ und +4 % in der fernZ der Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag. Eine etwas deutlichere Zunahme von +6 % in der nahen und +10 % in der fernen Zukunft kann auch im RCP8.5 festgestellt werden (Abb. 4.27). Regional betrachtet erfolgt die Zunahme gleichmäßig, wenn auch im besonders feuchten Harz mit etwa geringerer Intensität. Die Zunahme im RCP8.5 ist im Nordosten des Landes etwas stärker als im Süden und Westen.

Mittleres relativesÄnderungssignal zur RP 1961-1990, Niederschlagstage mit $P \geq 1$ mm Winterhalbjahr (ONDJFM)

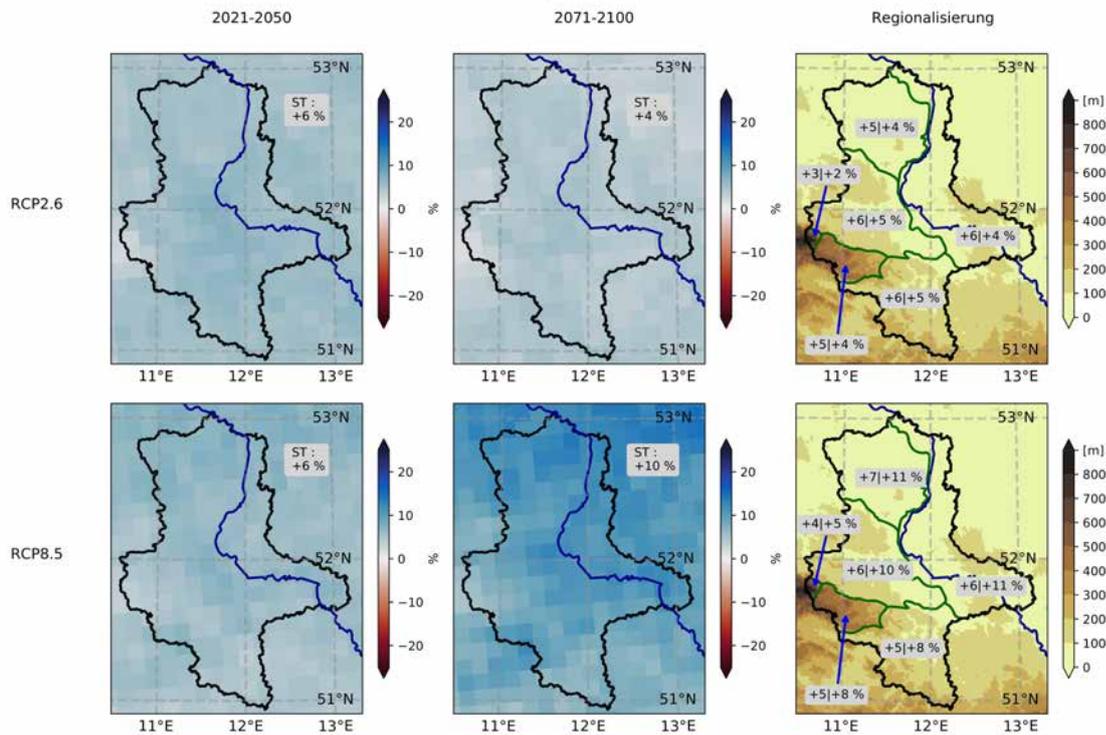


Abbildung 4.27: Mittlere relative Änderungssignale in [%] der Anzahl der Regentage mit $P \geq 1$ mm für das Winterhalbjahr (Oktober bis März).

Im Sommerhalbjahr wird von den Projektionen des RCP2.6 im Mittel keine Änderung der Niederschlagstage mit mindestens 1 mm berechnet, während im RCP8.5 eine Abnahme von zunächst -2 % und dann -10 % in der nahen bzw. fernen Zukunft erfolgt (Abb. 4.28). Im Sommerhalbjahr ist die Änderung der Niederschlagstage regional gleich verteilt. Die Abnahme der Niederschlagstage von -10 % und der Niederschlagsmenge um -5 % in der fernZ im RCP8.5 deutet auf seltenere, aber intensivere Niederschläge hin. Dies gilt auch für das Winterhalbjahr, in dem die Niederschlagsmenge stärker zunimmt als die Anzahl der Niederschlagstage.

Mittleres relatives Änderungssignal zur RP 1961-1990, Niederschlagstage mit $P \geq 1$ mm
Sommerhalbjahr (AMJJAS)

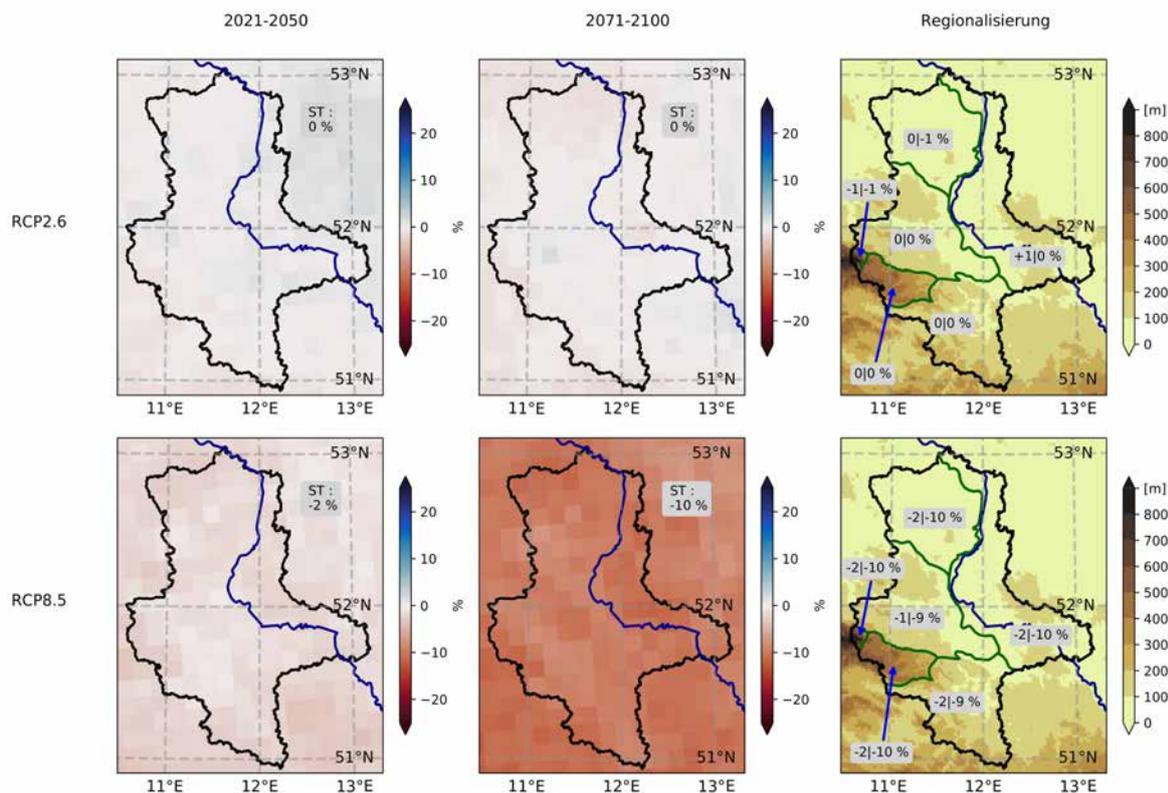


Abbildung 4.28: Mittlere Änderungssignale der Anzahl der Regentage mit $P \geq 1$ mm für das Sommerhalbjahr (April bis September).

Im Aufschluss nach Jahreszeiten wird deutlich, dass im Winter, Frühling und Herbst eher eine Zunahme von Niederschlagstagen wahrscheinlich ist, während im Sommer eine teils deutliche Abnahme wahrscheinlich ist. Die Signale des RCP8.5 in beide Richtungen sind größer und nehmen in die jeweilige Richtung zu von der nahen bis zur fernen Zukunft (Abb. 4.29), einzig im Frühling zeigt das RCP2.6 eine leichte Zunahme, während für das RCP8.5 zunächst eine geringere Zunahme in der nahZ und in der fernZ eine breite Bandbreite mit der 0 in der Mitte berechnet werden. In Halbjahre zusammengefasst zeigt sich, dass ebenso wie für die Niederschlagsmengen eine geringe Zunahme im Winterhalbjahr wahrscheinlich ist, die im RCP8.5 möglicherweise stärker ausgeprägt ist. Auf der anderen Seite, wird im Sommerhalbjahr im RCP2.6 keine Veränderung der Niederschlagstage mit mindestens 1 mm angezeigt, während im RCP8.5 in der fernen Zukunft eine Abnahme der Niederschlagstage wahrscheinlicher erscheint (Abb. 4.29). Die Abnahme beträgt im Mittel -5 Tage, der Median liegt bei -7 Tage für die ferne Zukunft des RCP8.5, jedoch liegt die gesamte Bandbreite bei -15 bis +5 Tagen und der wahrscheinliche Bereich erstreckt sich von -11 bis +3 Tage.

Die insgesamt uneinheitliche Situation in Bezug auf die Niederschlagstage setzt sich auch bei der Betrachtung von Niederschlagstagen mit höheren Schwellwerten fort. In Abbildung 4.30 ist das uneinheitliche Signal für die Tage mit mindesten 1 mm deutlich zu erkennen, während auch die Änderungssignale für Tage mit mehr als 10 bzw. 20 mm Tagesniederschlag für alle Szenarien und Zeiträume uneinheitlich sind. Der wahrscheinliche Bereich schließt die 0 immer ein. Insgesamt ist die Bandbreite des RCP8.5 besonders in der fernen Zukunft größer und erstreckt sich in beide Richtungen. Eine eindeutige und nennenswerte Änderung der starken und sehr starken Niederschlagstage lässt sich aus den Klimaprojektionen des Referenzensembles nicht ablesen.

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

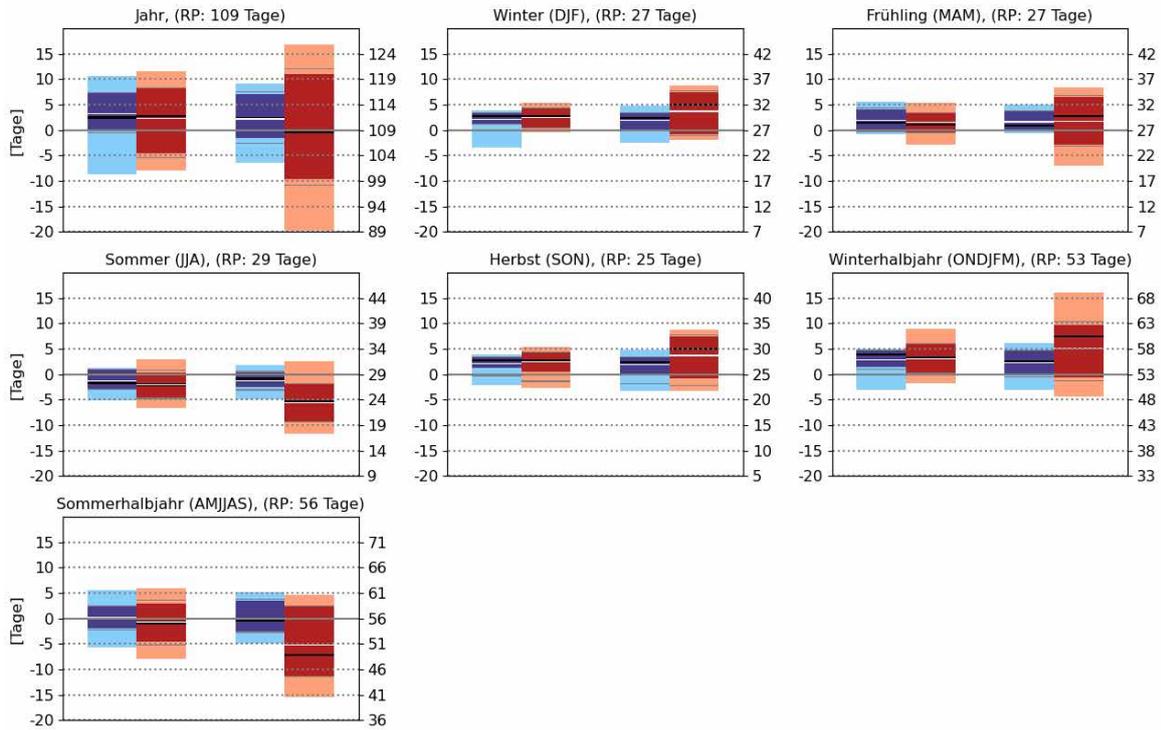


Abbildung 4.29: Bandbreite der Änderungssignale der Anzahl in [%] der Regentage mit $P \geq 1$ mm, saisonal ausgewertet. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft.

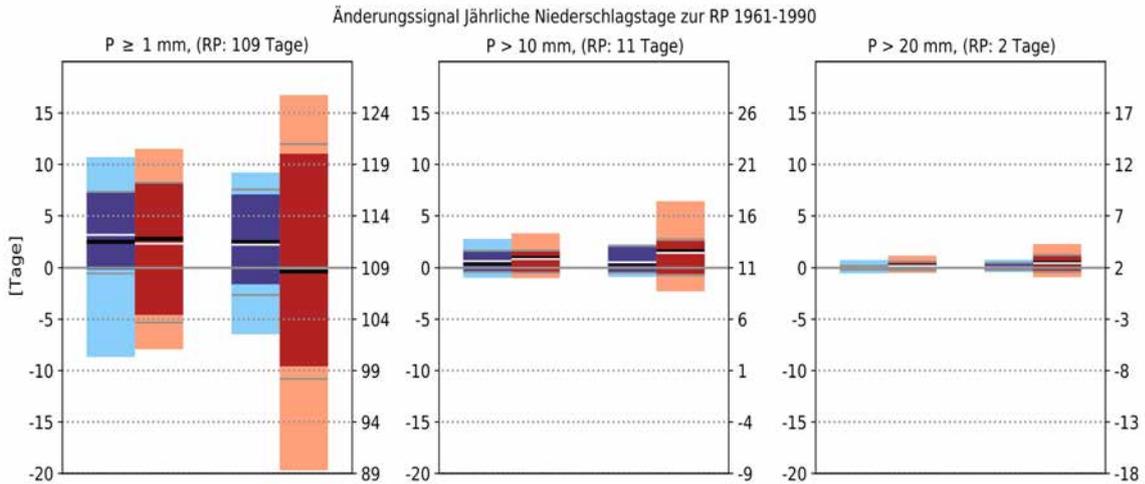


Abbildung 4.30: Bandbreite der Änderungssignale der Anzahl der jährlichen Regentage mit $P \geq 1$ mm, $P > 10$ mm und $P > 20$ mm (v.l.n.r.). Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft.

4.7 Klimatische Wasserbilanz

Die KWB ist ein wichtiger Indikator für die Landwirtschaft und den Wasserhaushalt einer Region, der die Verfügbarkeit von Wasser zur Bildung und Auffüllung von Grundwasser beschreibt. Die KWB wird dabei als Bilanz aus Niederschlagsmenge (positiv) und potentieller Verdunstung (negativ) berechnet. In diesem Projekt wird die Standard-Methode nach der Gleichung von Penman-Monteith (FAO56) angewandt, die neben Daten zur Temperatur auch die Beiträge des Windes, der Luftfeuchtigkeit, der solaren Strahlung und des Bodenwärmestromes berücksichtigt, im Gegensatz zu anderen Methoden, die lediglich die Daten zur Mitteltemperatur berücksichtigen (Rhodes, 2016). Die Verdunstung wird dabei für eine Grasoberfläche berechnet. Die Änderungssignale der jährlichen KWB spiegeln die oben beschriebenen Signale zu Temperatur und Niederschlag wider.

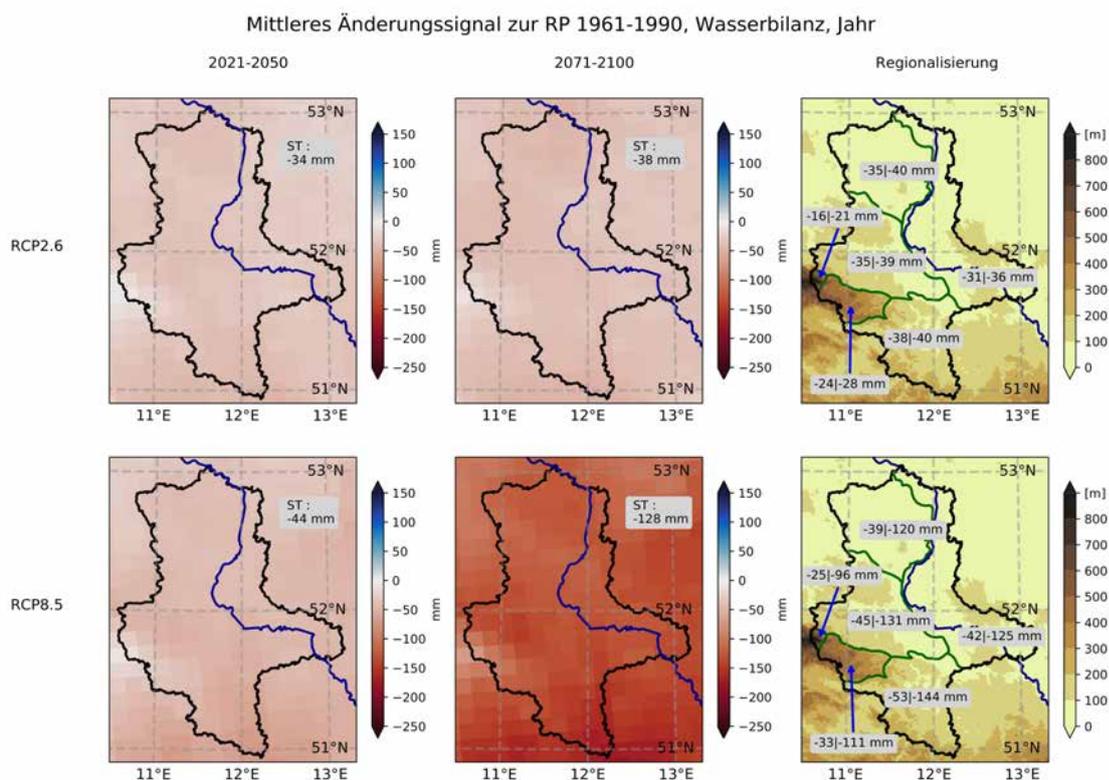


Abbildung 4.31: Mittlere Änderungssignale der KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Gesamtjahr.

In Abbildung 4.31 ist die jährliche Änderung der KWB dargestellt. Im RCP2.6 erfolgt eine Abnahme der KWB um etwa -35 bis -40 mm im Jahresmittel, dies entspricht einer Abnahme von ca. -40 - -50 % gegenüber der RP und einem Trendsignal von -6 mm bzw. -7 % pro Dekade bis zum Ende der nahZ. In der regionalen Betrachtung erfolgt die Abnahme im RCP2.6 relativ gleichmäßig, lediglich im Harz ist die Verringerung der KWB geringer mit -16 bis -21 mm im Oberharz und -24 bis -28 mm im Unterharz. Für das RCP2.6 ist zwischen naher und ferner Zukunft keine wesentliche Verschärfung des Änderungssignals zu erkennen. Im RCP8.5 fallen die Änderungen stärker aus, bereits in der nahZ verringert sich die KWB um -44 mm bzw. ca. -60 % und in der fernen Zukunft fällt die KWB im Mittel der Projektionen um -128 mm bzw. -150 % geringer aus als in der RP (Abb. 4.31). Dies entspricht einer Abnahme von -7,5 mm bzw. -9 % pro Dekade bis zum Ende der nahZ und -17 mm bzw. -20 % pro Dekade bis zum Ende der fernZ. Die regionale Verteilung zeigt eine Verschärfung der Abnahme der KWB von Norden

nach Süden. Auch im RCP8.5 ist die Abnahme des KWB im Harz vergleichsweise gedämpft. Im südlichen Sachsen-Anhalt nimmt die KWB örtlich um fast -200 mm ab.

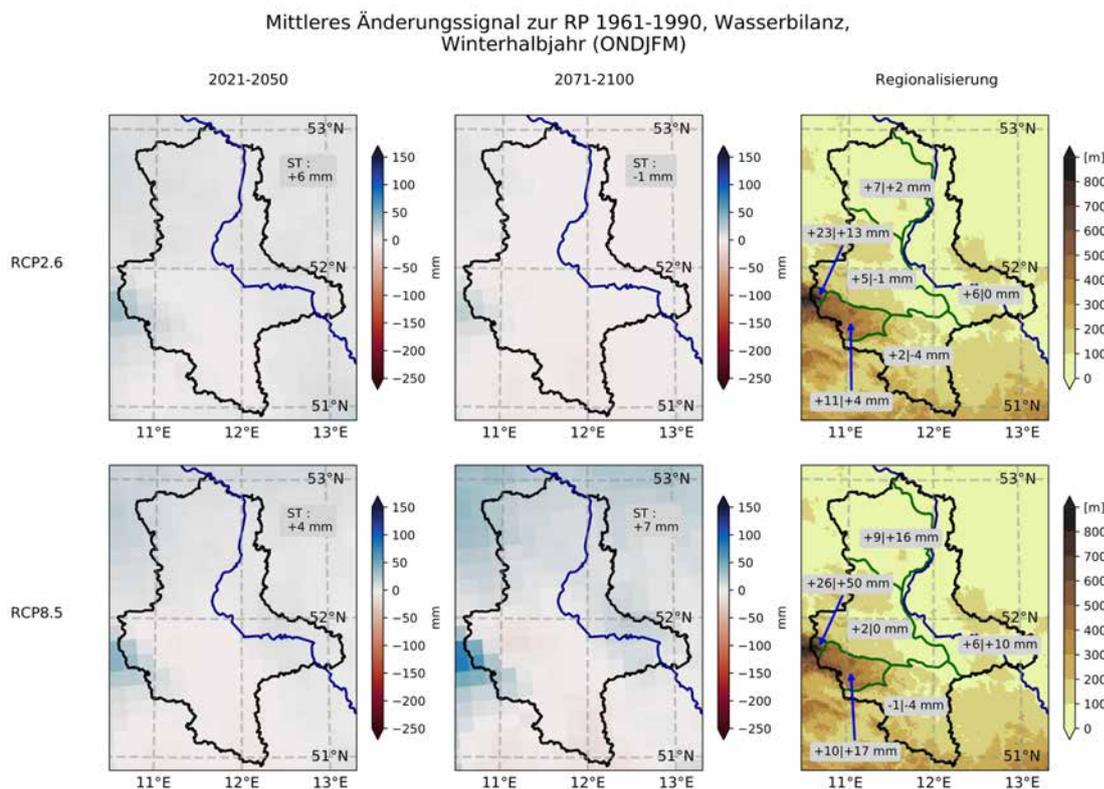


Abbildung 4.32: Mittlere Änderungssignale der KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Winterhalbjahr (Oktober bis März).

Wird die halbjährliche Änderung der KWB wie in Abbildungen 4.32 und 4.33 betrachtet, fällt auf, dass im Mittel der Projektionen des Referenzensembles die Veränderung der KWB im Winterhalbjahr nur unwesentlich ausfällt, während die Änderung im Sommerhalbjahr das gesamte jährliche Änderungssignal bestimmt. Im Winterhalbjahr findet im Mittel der Projektionen keine wesentliche Änderung der KWB statt, da die erhöhten Niederschläge aufgrund des Temperaturanstiegs weitestgehend durch erhöhte Werte der potentiellen Verdunstung kompensiert werden. Dies trifft in ähnlichem Umfang auf RCP2.6 und RCP8.5 zu. Die Änderung der KWB im Winterhalbjahr weist keine Änderung oder Verschärfung zwischen naher und ferner Zukunft auf. Die regionale Verteilung im Winterhalbjahr zeigt im Gegensatz zu den Tieflandregionen, eine deutliche Zunahme im Oberharz, wo die Niederschlagsmengen am meisten zunehmen, während im östlich angrenzenden Regenschatten im südlichen Sachsen-Anhalt und der Magdeburger Börde wenig nennenswerte Änderungssignale auftreten (Abb. 4.32). Dies ist auf die überproportional große Zunahme der Niederschlagsmengen im Harz zurückzuführen.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990, Wasserbilanz, Sommerhalbjahr (AMJJAS)

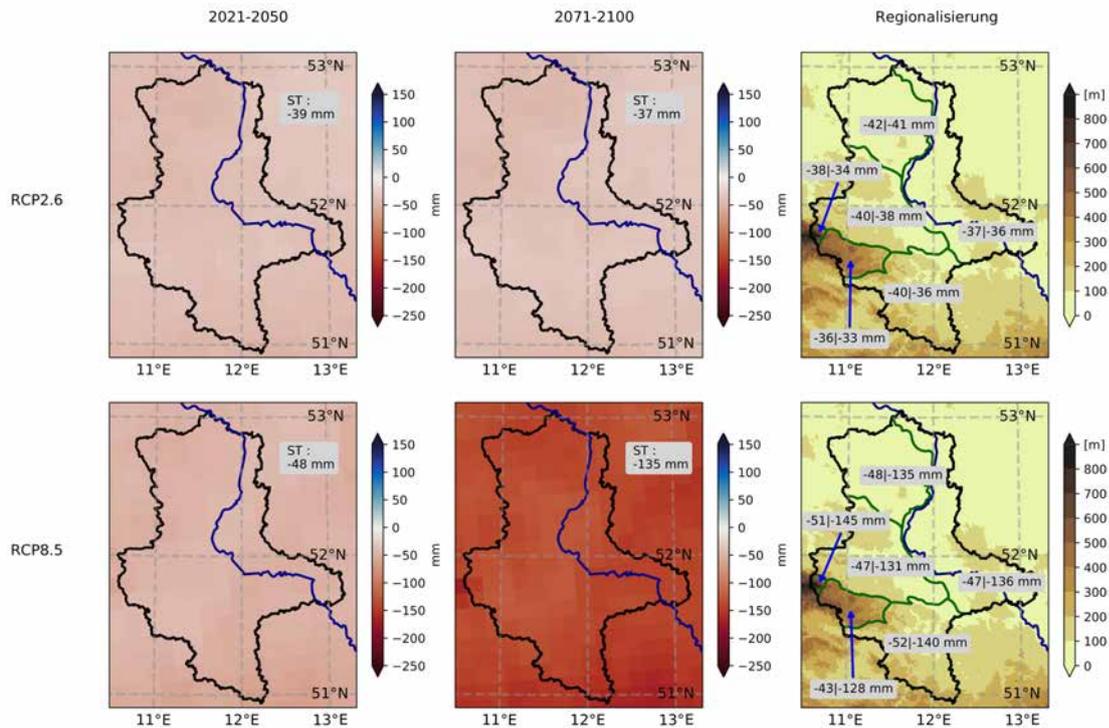


Abbildung 4.33: Mittlere Änderungssignale der KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Sommerhalbjahr (April bis September).

Im Sommerhalbjahr findet eine Verringerung des Saldos der KWB statt mit deutlichen Änderungssignalen in den Klimaprojektionen. Die moderate Temperaturerhöhung im RCP2.6 führt zu einer Abnahme der KWB von etwa -35 bis -40 mm im Mittel der Projektionen, wobei keine wesentliche Änderung zwischen der nahZ und fernZ auftritt (Abb. 4.33). Die regionale Verteilung der Änderungssignale ist für das RCP2.6 relativ einheitlich ohne nennenswerte Schwerpunkte. Im RCP8.5 beträgt die Abnahme zunächst -48 mm in der nahen und -135 mm in der fernen Zukunft, dies entspricht einer Beschleunigung der Änderung von -8 mm bzw. -10 % pro Dekade bis zum Ende der nahZ auf -17,4 mm bzw. -21 % pro Dekade zwischen naher und ferner Zukunft (Abb. 4.33). In der regionalen Verteilung sind kleinere Unterschiede zu erkennen, ohne im Vergleich zum gesamten Änderungssignal nennenswert zu sein für das RCP8.5 (Abb. 4.33).

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990,
Potentielle Verdunstung nach FAO56, Jahr

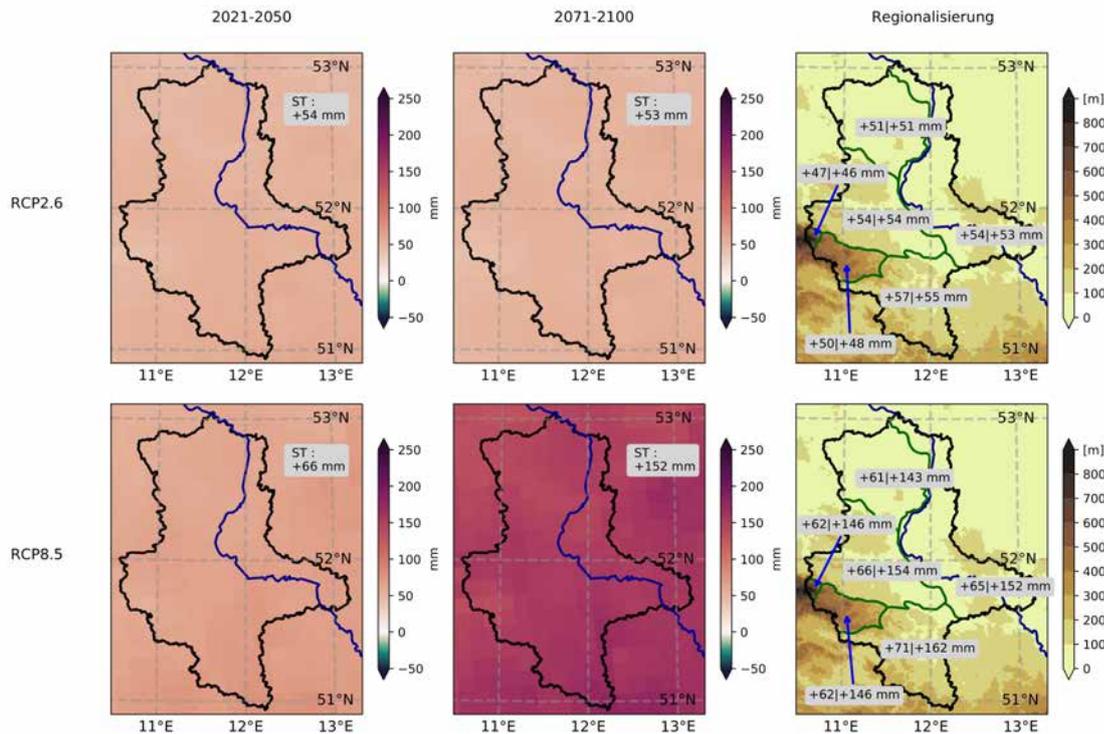


Abbildung 4.34: Mittlere Änderungssignale der potentiellen Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Gesamtjahr.

In den Abbildungen 4.34, 4.35 und 4.36 sind die Änderungssignale der potentiellen Verdunstung für Gesamtjahr, Winter- und Sommerhalbjahr dargestellt. Es ist erkennbar, dass in allen Zeiträumen eine Zunahme der Verdunstung auftritt, deren Großteil jedoch im Sommerhalbjahr auftritt. Die Begründung dafür liegt in der größeren Differenz zwischen tatsächlichem Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck, welche das Potential der Luft für die Aufnahme verdunstenden Wasserdampfs beschreibt. Für das RCP2.6 ist im Winterhalbjahr im Mittel der Projektionen eine geringe Zunahme der Verdunstung von +12-+14 mm festzustellen, während im Sommerhalbjahr eine Zunahme der Verdunstung von etwa +40 mm erfolgt. Dabei sind für das RCP2.6 weder regionale Schwerpunkte noch unterschiedliche Änderungssignale zwischen naher und ferner Zukunft auszumachen. Für das RCP8.5 wird im Jahr im Mittel der Projektionen des Referenzensembles eine Erhöhung der Verdunstung um +66 mm in der nahen und +152 mm in der fernen Zukunft berechnet. Dabei stammen in der nahen und fernen Zukunft etwa 21-22 % der Zunahme aus dem Winterhalbjahr. In der Regionalisierung ist für das RCP8.5 in beiden Halbjahren und Zukunftsperioden eine stärkere Zunahme der Verdunstung im Süden des Landes zu beobachten.

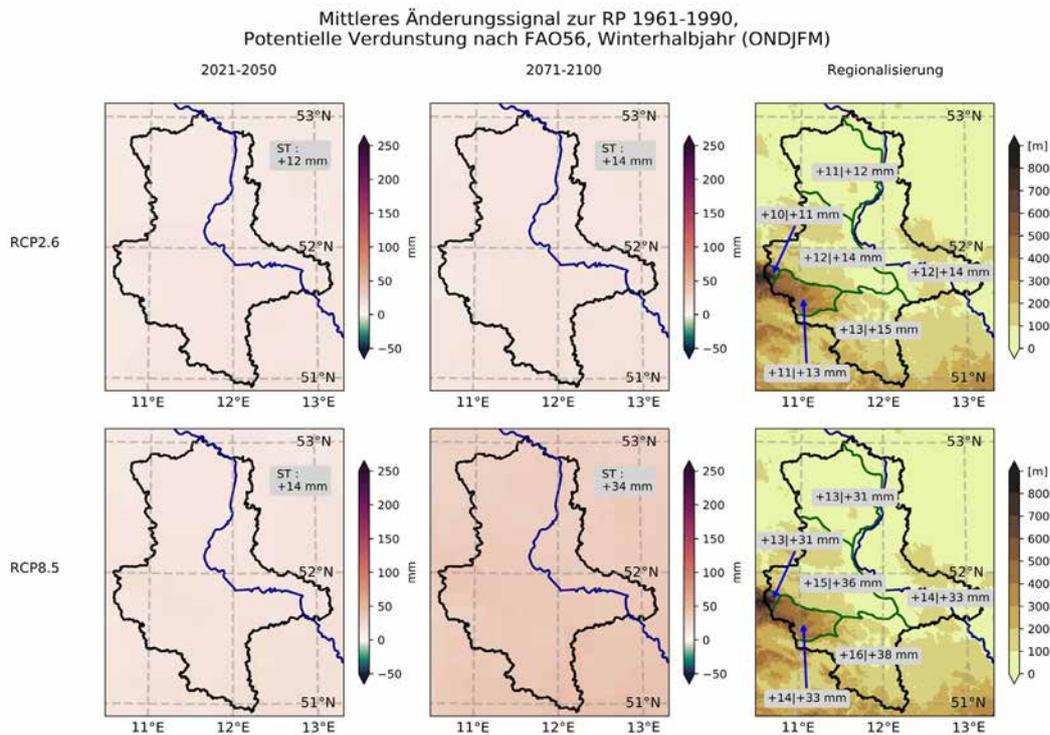


Abbildung 4.35: Mittlere Änderungssignale der potentiellen Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Winterhalbjahr (Oktober bis März).

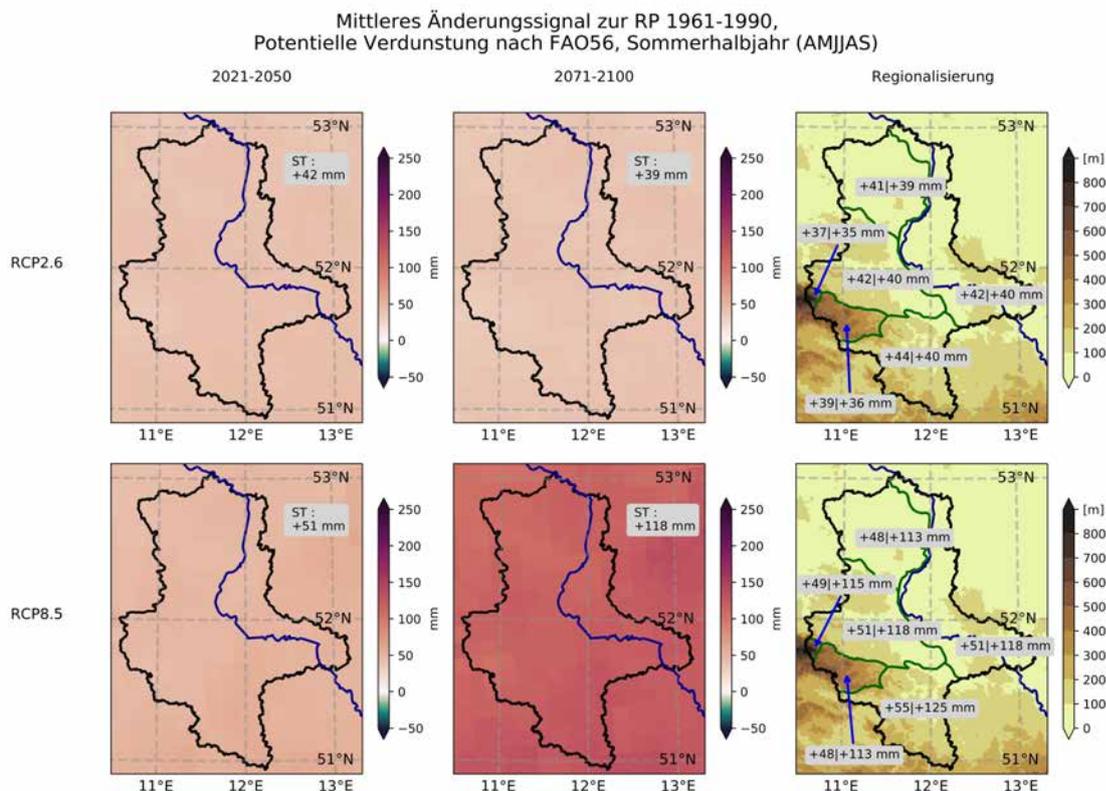


Abbildung 4.36: Mittlere Änderungssignale der potentiellen Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56) für das Sommerhalbjahr (April bis September).

Die Darstellung der saisonalen Aufschlüsselung der Bandbreiten der Änderungssignale der KWB in Abbildung 4.37 zeigt, dass eine große Unsicherheit bezüglich der Beträge der Änderungen besteht, insbesondere bei Betrachtung der jährlichen Summe der Änderungssignale. Es ist deutlich ablesbar, dass die jährliche KWB wahrscheinlich abnimmt

und diese Beiträge hauptsächlich aus dem Sommer stammen. Für den Frühling ist aufgrund der Streuung der Projektionen um den Wert 0 herum, mit zunehmender Unsicherheit in der fernZ, keine nennenswerte Änderung zu erwarten, jedoch zeigen im RCP8.5 mehr Projektionen ebenso wie Mittelwert und Median eine leichte Abnahme der KWB. Im Sommer werden im RCP2.6 wahrscheinliche Abnahmen von -20 bis -80 mm gezeigt, während das RCP8.5 in der nahen Zukunft eine Abnahme von wahrscheinlich -10 bis -110 mm, in der fernZ von -40 bis -190 mm zeigt (Abb. 4.37). Die sommerliche Abnahme der KWB wird durch die Kombination aus abnehmenden Niederschlägen und zunehmenden Temperaturen verursacht. Die große Unsicherheit im Betrag des wahrscheinlichen Änderungssignals wird durch die große Unsicherheit der Änderungen des Niederschlags hervorgerufen und nicht durch die Unsicherheiten der Verdunstungsmengen (Abb. 4.38).

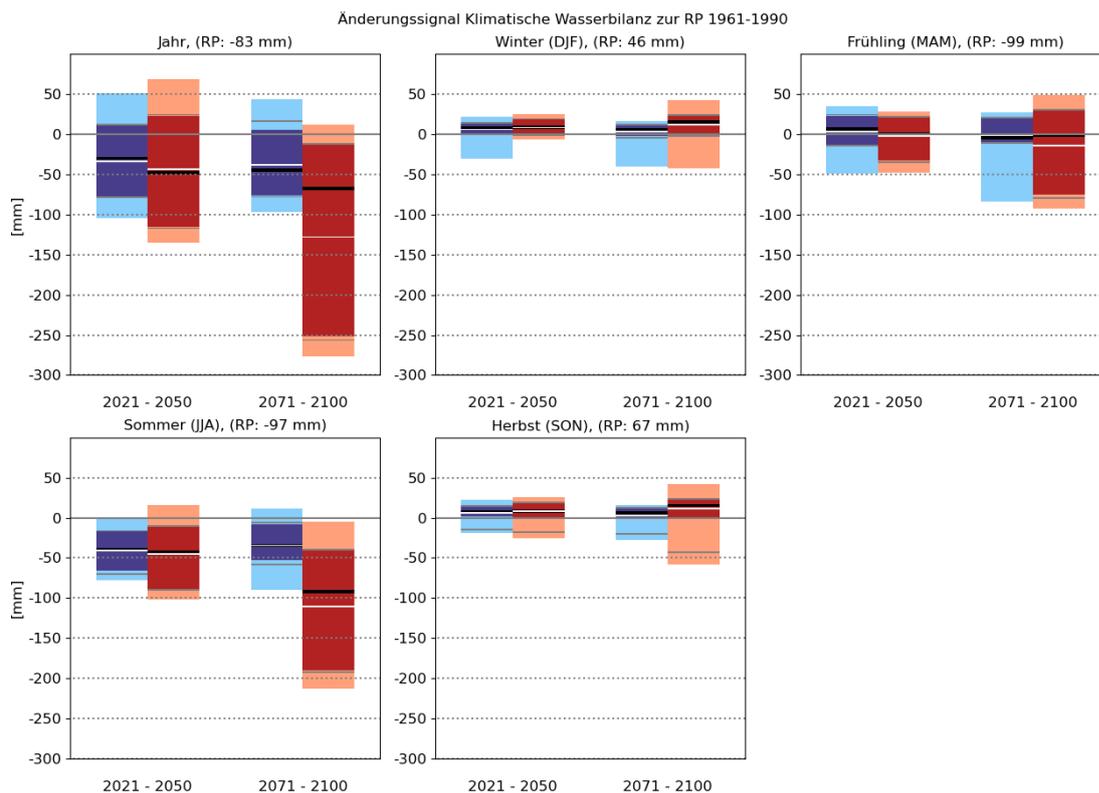


Abbildung 4.37: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale KWB gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56).

Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden. Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

Die große Bandbreite der Änderungssignale, die immer auch in beide Richtungen weisende Ergebnisse enthält, zeigt, dass die sich die Unsicherheit in der Änderung der KWB hauptsächlich aus den Unsicherheiten der Niederschlagsentwicklung speist. Dies ist offensichtlich, wenn die eindeutigen und relativ eng gebündelten Änderungssignale der potenziellen Verdunstung in Abbildung 4.38 betrachtet werden. Herbst und Winter zeigen nur unbedeutende Zunahmen der Verdunstungsmengen, während im Frühling und Sommer eine substantielle Erhöhung der potenziellen Verdunstung für beide Klimaszenarien projiziert wird. Die Projektion des Modells MIROC-CLM zeigt für beide Klimaszenarien eine erhebliche Abnahme der potenziellen Verdunstung, insbesondere im Herbst. Dies dürfte in dieser Projektion durch die projizierte Abnahme der Globalstrahlung zu erklären sein, da alle weiteren Einflussparameter sehr nahen an denen der anderen Modelle liegen. Ob dies plausibel ist, kann

in diesem Projekt jedoch nicht geprüft werden, es sollten aber weitere Überprüfungen dieser Projektion durchgeführt werden.

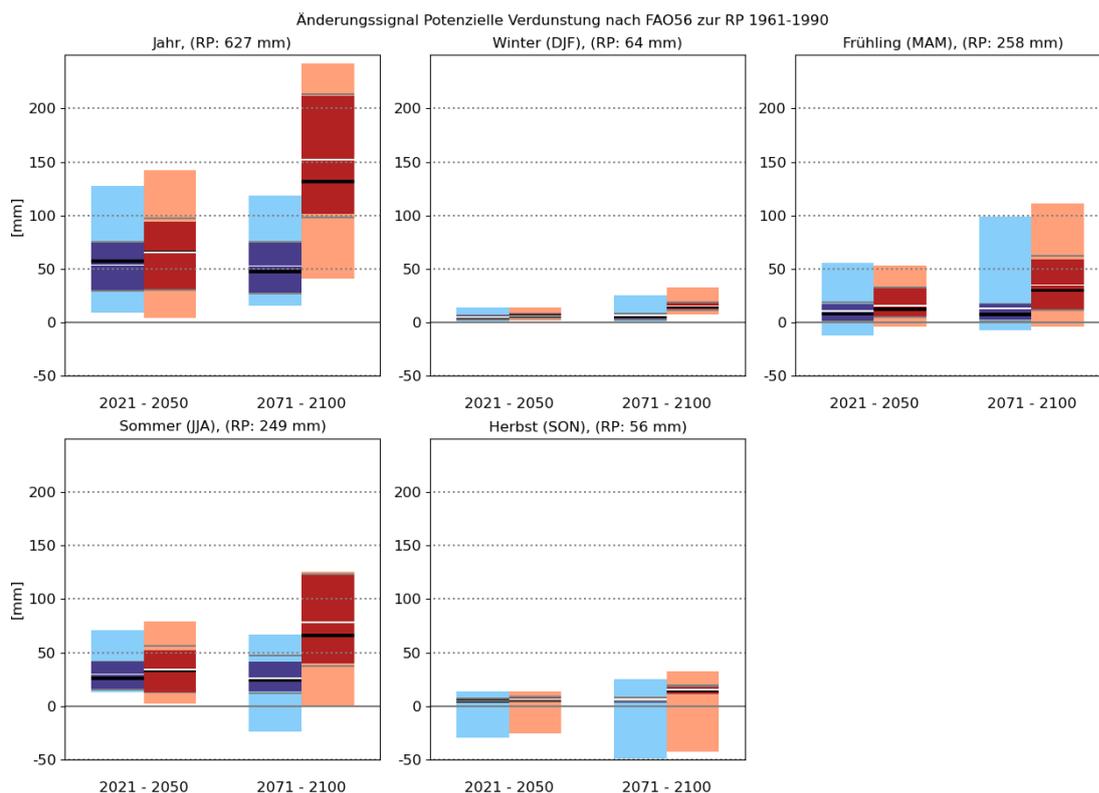


Abbildung 4.38: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale potentielle Verdunstung gegenüber der RP nach Penman-Monteith (FAO56).

Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden. Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

In der Gesamtschau lässt sich in Bezug auf die KWB festhalten, dass im RCP2.6 eine deutliche Abnahme erfolgt, die sich jedoch zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht weiter verschärft. Unter Annahme des RCP8.5 ist die Abnahme deutlich stärker ausgeprägt und verschärft sich mit zunehmender Änderungsrate in der fernen Zukunft. Die Änderungssignale der KWB werden verursacht durch die erhöhte Verdunstung im Sommer, welche sich wiederum aus höheren Temperaturen und damit erhöhten Sättigungsdefiziten speist.

4.8 Weitere Niederschlagskenngrößen

Vermehrte Dürren wie in den Jahren 2018 bis 2020 stehen ebenso wie häufigere und heftigere Starkregenereignisse im Fokus der Aufmerksamkeit, wenn es um die Folgen des Klimawandels geht. Untersuchungen zu diesem Thema für den bereits stattfindenden Klimawandel kommen je nach angewandter Methodik, Bezugsregion und Bezugszeitraum zu unterschiedlichen Schlüssen. Die naheliegende Schlussfolgerung, dass höhere Temperaturen und damit größere Mengen an Wasserdampf und Energie für höhere und stärkere Niederschläge sorgen, ist an die Annahme geknüpft, dass die dynamischen Parameter der Wetterlagen sich nicht wesentlich verändern, was aber schwerlich anzunehmen ist, wenn sich Klimazonen polwärts verschieben. In Abbildung 4.39 wurde die starke Niederschlagsmenge (RR95), die extreme Niederschlagsmenge (RR99), der durchschnittliche maximale Tagesniederschlag, das 95. Perzentil des 5-Tagesniederschlages, das 99. Perzentil und das durchschnittliche Maximum

des 5-Tagesniederschlages (v.o.l.n.u.r.) ausgewertet. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft. Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert. Die Änderungssignale des RCP2.6 schließen für alle Parameter die 0 ein und dies trifft auch für den wahrscheinlichen Bereich um den Median zu. Mittelwert und Median sind für das RCP2.6 immer nahe der 0 und nie größer als +/- 2 %. Für das RCP8.5 ist in der nahZ eine leichte und in der fernZ eine etwas deutlichere Verschiebung der Bandbreite zu stärkeren Starkniederschlägen zu erkennen, wenn auch festgestellt werden muss, dass sowohl die gesamte als auch die wahrscheinliche Bandbreite immer die 0 einschließt (Abb. 4.39). Für die starke Niederschlagsmenge beträgt im RCP8.5 die Änderung im Mittel und Median etwa +9 mm in der nahen und +18 mm in der fernen Zukunft. Für die extreme Niederschlagsmenge kann in der nahZ im RCP8.5 keine nennenswerte Änderung im Mittel festgestellt werden, während in der fernZ Median und Mittelwert bei etwa +7 mm oder +11 % liegen (Abb. 4.39). Die Intensität des stärksten Tagesniederschlages steigt im RCP8.5 in der nahZ noch nicht an, während in der fernen Zukunft der Median bei +1,5 und dem Mittelwert bei +2 mm liegen. Das 95. Perzentil des 5-Tagesniederschlages steigt für das RCP8.5 im Mittel um +1 mm in der nahen und +2 mm in der fernen Zukunft. Das 99. Perzentil dieser Größe nimmt im RCP8.5 gegenüber der RP im Mittel um +1,5 mm zu in der nahen und +6 mm oder etwa +14 % in der fernen Zukunft (Abb. 4.39). Das Maximum der 5-Tagesniederschlagssumme steigt in der nahen Zukunft zunächst kaum, während es in der fernZ im RCP2.6 ebenfalls keine Änderung, im RCP8.5 aber eine Zunahme von +3 mm oder +6 % aufweist.

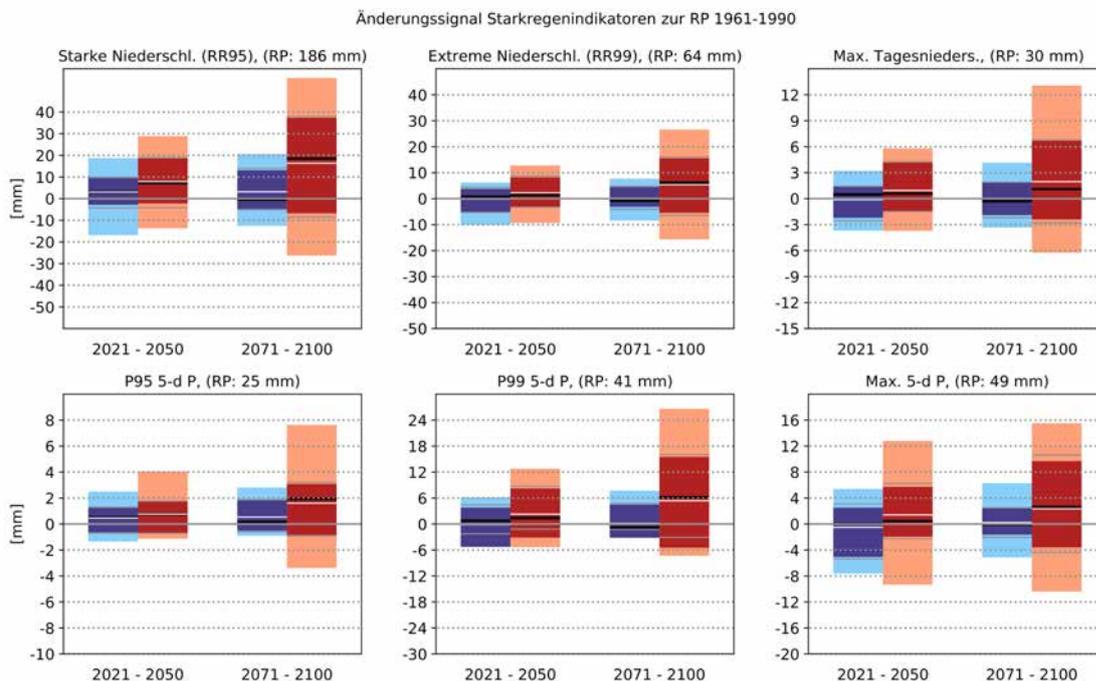


Abbildung 4.39: Bandbreite der Änderungssignale für Starkregenindikatoren.

In der Gesamtschau lässt sich in Bezug auf die Intensität von Starkniederschlägen feststellen, dass im RCP2.6 keine wesentlichen Änderungen zu erwarten sind, während im RCP8.5 eine Zunahme der Intensität von etwa +5-+10 % wahrscheinlich erscheint. Aufgrund der großen Bandbreiten mit auch negativen Werten im wahrscheinlichen Band um den Median herum, sind diese Aussagen aber ohne weitere Forschung und das Hinzuziehen weiterer Datenquellen und methodischer Ansätze wenig belastbar.

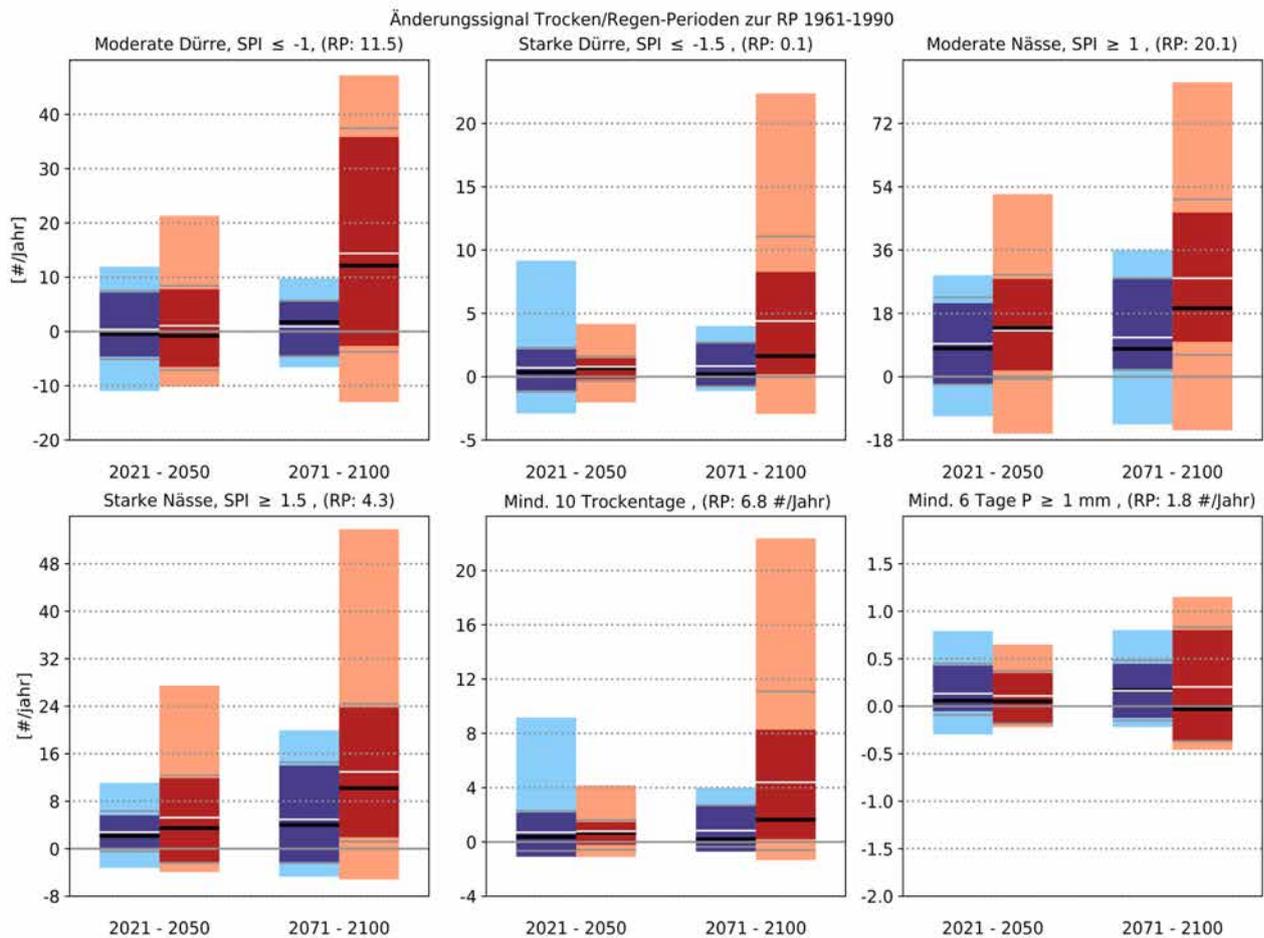


Abbildung 4.40: Bandbreite der Änderungssignale für Trocken- und Regenperioden.

In Abbildung 4.40 wurden der SPI_{90} für Tage mit Werten ≤ -1 und $-1,5$ sowie Werte ≥ 1 und $1,5$ und außerdem die Anzahl an jährlichen Trockenperioden mit mindestens 10 Tagen bzw. Regenperioden mit mindestens 6 Tagen in Folge < 1 mm bzw. ≥ 1 Tagesniederschlag (v.o.l.n.u.r.) ausgewertet. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft. Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

Angesichts der wahrscheinlichen Zunahme winterlicher Niederschlagstage und -mengen, ist es schlüssig, dass die Anzahl von Tagen mit einem erhöhten SPI_{90} zunehmen (Abb. 4.40). Die Tage mit moderater bis starker Nässe, also $SPI_{90} \geq 1$ nehmen im RCP2.6 um etwa $+8 - +10$ im Mittel zu, während im RCP8.5 diese Zahl um etwa $+15$ Tage in der nahen und $+25$ Tage in der fernen Zukunft zunehmen. Diese Erhöhung stellt eine erhebliche Zunahme gegenüber dem Mittelwert der RP von 20 Tagen dar. Die wahrscheinliche Bandbreite des RCP8.5 liegt im positiven Bereich, während die des RCP2.6 etwas darunter liegt. Sehr nasse Tage mit $SPI_{90} \geq 1,5$ nehmen ebenfalls zu, im RCP2.6 etwas weniger stark als im RCP8.5. Die Bandbreite der Szenarien ist groß und schließt die 0 mit ein (Abb. 4.40). Eine Zunahme von längeren Perioden mit aneinandergereihten Niederschlagstagen mit mindestens 1 mm Niederschlag ist anhand der Änderungssignale in Abbildung 4.66 kaum abzuleiten, auch wenn die Mittelwerte der Szenarien in der fernen Zukunft geringfügig im positiven Bereich liegen und die Bandbreite etwas zu positiven Werten hin verschoben ist. Insgesamt ist die Bandbreite für diesen Parameter aber auf beiden Seiten der 0 zu finden und damit ist kein nennenswertes Änderungssignal festzustellen.

Für Perioden mit moderater und starker Trockenheit, also $SPI_{90} \leq -1,0$ oder $-1,5$ ist

festzustellen, dass im RCP2.6 keine Änderung signalisiert wird, während im RCP8.5 zunächst keine Änderung feststellbar ist, aber in der fernen Zukunft der Median bei +12 bzw. +2 Tagen oder +100 % bzw. +2000 % liegt (Abb. 4.40). Die Bandbreite des RCP8.5 für die Änderung von moderater und starker Trockenheit in der fernen Zukunft ist groß, jedoch deutlich zu einer Zunahme von Dürreperioden verschoben, zumal der SPI₉₀ als reiner Niederschlagsindex die Verdunstung nicht berücksichtigt. Die gleiche Schlussfolgerung kann für die Zunahme von Trockenperioden getroffen werden. Während in der nahen Zukunft keine Änderung feststellbar ist, ist in der fernen Zukunft im RCP8.5 eine Zunahme wahrscheinlich, (Abb. 4.40). Im Mittel nimmt für diesen Zeitraum im RCP8.5 die Häufigkeit von Trockenperioden mit mindestens 10 Tagen mit Niederschlägen unter 1 mm um +4 solcher Perioden oder etwa 58 % zu. Dies entspricht einer Zunahme von +40 trockenen Tagen in Form von Trockenperioden. Insgesamt stehen die Ergebnisse zur Betrachtung des Starkregenpotentials in deutlichem Kontrast zu den Ergebnissen der Vorgängerstudie zum Konvektionspotential (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017), welche zum Ergebnis kommt, dass sich das Gefährdungspotential durch konvektive Wetterlagen insbesondere in erheblich größeren Starkregenfällen niederschlagen wird. Mögliche Ursachen für diese Diskrepanzen sind die Unterschiede in angewandter Methodik und der breiteren Datenbasis. Die vorliegende Studie wurde nicht unter Verwendung eines numerischen Modells erstellt, welches hinreichend hoch aufgelöst ist, um hochreichende Konvektion explizit berechnen zu können. Dies bedeutet, dass die impliziten Methoden der unterschiedlichen Klimaprojektionen sich auf die Ergebnisse niederschlagen. Außerdem wurde die Vorgängerstudie lediglich mit einem GCM angetrieben, was dazu führt, dass die durch den Klimawandel induzierte Variabilität der Großwetterlagen und deren Auswirkungen auf das Auftreten von Starkniederschlägen in (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017) keine Berücksichtigung findet. Eine Berücksichtigung und Erfassung der Änderung der Wetterlagentypen sowie deren Variabilität innerhalb der Klimaprojektionen ist jedoch sicherlich von großem Interesse. Die Ergebnisse der Studie von (Ahrens, Herzog, Brisson, & Purr, 2017) finden sich im Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie sicherlich im oberen Drittel der projizierten Änderungssignale wieder.

4.9 Weitere Klimakenngrößen

Auch andere Klimakenngrößen sind dem Klimawandel unterworfen. Allgemein ist durch eine Erwärmung eine Erhöhung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes zu erwarten aufgrund höherer Verdunstungsraten, wie auch schon weiter oben für Sachsen-Anhalt festgestellt. In einigen Vorarbeiten wurde aufgrund dieser höheren Feuchtigkeitswerte ein Anstieg der Stürme in den Mittelbreiten erwartet, während andere Vorarbeiten aufgrund schwächerer meridionaler Temperaturunterschiede zwischen arktischer Kaltluft und subtropischer Warmluft eine Abnahme der für Sachsen-Anhalt relevanten atlantischen Sturmtiefs ableiten (Kinkeldey, Nöth, & Adler, 2015).

Wie bereits angedeutet und durch höhere Verdunstungsraten indiziert, findet durch den Klimawandel eine Erhöhung der spezifischen Feuchte, also des Wasserdampfgehaltes pro Massenanteil Luft, statt (Abb. 4.41). Im RCP2.6 beträgt diese Erhöhung +0,05 g kg⁻¹ und für das RCP 8.5 im Mittel +0,06 g kg⁻¹ in der nahen und +0,14 g kg⁻¹ in der fernen Zukunft. Die Zunahme im RCP8.5 entspricht einer Zunahme von +1 % in der nahen und +2,4 % in der fernen Zukunft.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990 Spez. Feuchte, Jahr

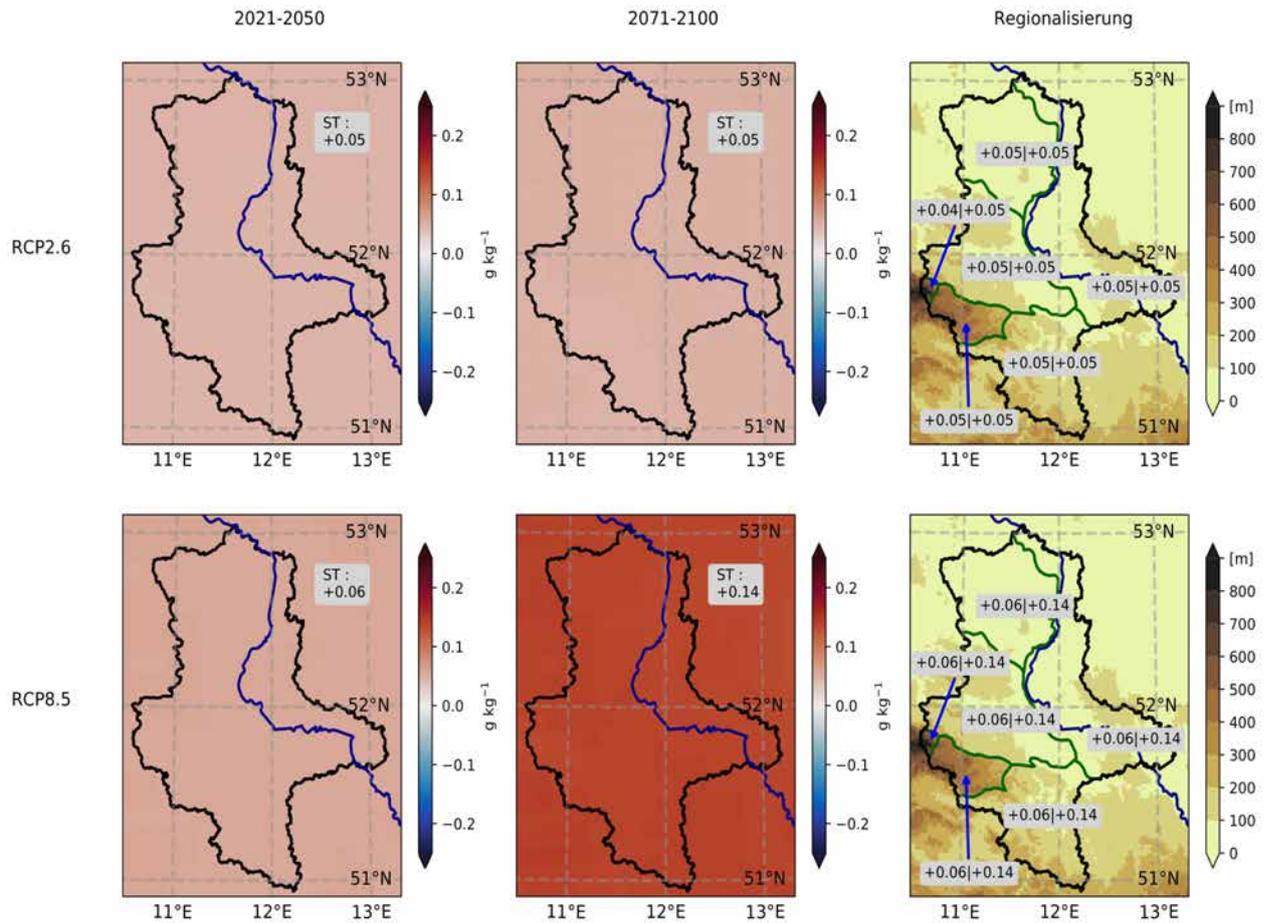


Abbildung 4.41: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die spezifische Luftfeuchtigkeit.

Für die Windgeschwindigkeit kann im Jahresmittel keine nennenswerte Änderung festgestellt werden, weshalb in Abbildung 4.44 die jahreszeitliche Aufschlüsselung dargestellt ist. Für das RCP2.6 gruppieren sich die Änderungssignale im Referenzensemble grundsätzlich um 0 herum für alle Jahreszeiten, was bedeutet, dass das Referenzensemble keine Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit aufzeigt. Im RCP8.5 ist im Frühjahr ebenfalls keine Änderung für beide Zukunftsperioden feststellbar, während in den anderen Jahreszeiten eine Tendenz zu einer mit der Zeit stärkeren Änderung besteht. Im Sommer wird dabei von den Projektionen des RCP8.5 in der nahZ keine Änderung und in der fernZ eine Abnahme des Mittelwindes von etwa $-0,1 \text{ m s}^{-1}$ im Mittel mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 0 bis $-0,3 \text{ m s}^{-1}$ gezeigt. Im Herbst und Winter deuten die Klimaprojektionen des RCP8.5 möglicherweise auf eine Verstärkung des Mittelwindes hin in der fernen Zukunft mit Zunahmen von im Mittel $+0,2 \text{ m s}^{-1}$ in der fernZ in beiden Jahreszeiten, was etwa einer Zunahme von +6 % entspricht.

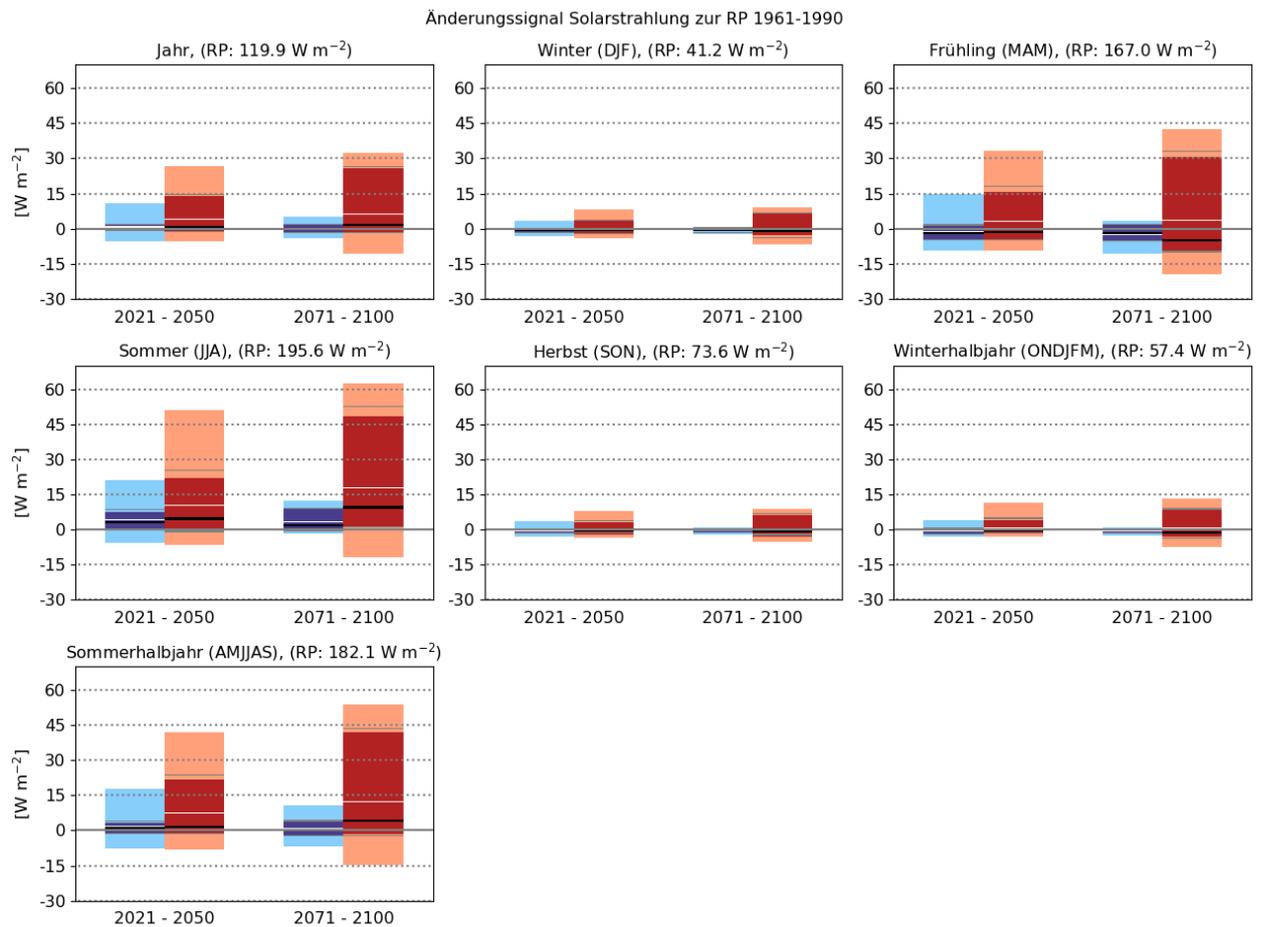


Abbildung 4.42: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale Mittelwerte der Solarstrahlung. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden.

Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft. Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

Die Änderungssignale der Solarstrahlung sind in den Abbildungen 4.42 und 4.43 dargestellt. Für das RCP2.6 zeigen die Projektionen des Referenzensembles keine wesentliche Änderung gegenüber der RP. Für das RCP8.5 ergibt sich eine mit der Zeit verstärkende Zunahme der Solarstrahlung in Frühling und Sommer, während im Herbst und Winter eine signifikante Änderung unwahrscheinlich ist (Abb. 4.42). Im Frühling liegen Mittelwert und Median jedoch jeweils auf unterschiedlichen Seiten der 0, sodass auch hier von keiner wesentlichen Änderung der solaren Strahlung ausgegangen werden kann. Für den Sommer liegen Median und Mittelwert im positiven Bereich, für die nahe Zukunft bei +5 bzw. +10 und in der fernen Zukunft bei +12 bzw. +17 $W m^{-2}$ im RCP8.5. Die wahrscheinliche Ursache erhöhter Strahlungswerte ist eine Erhöhung von wolkenarmen Tagen bzw. der Sonnenscheindauer. Dies wirkt sich entsprechend auf die KWB und womöglich auch auf das energetische Potential der Solarenergie in Sachsen-Anhalt aus.

Mittleres Änderungssignal zur RP 1961-1990 Solarstrahlung, Jahr

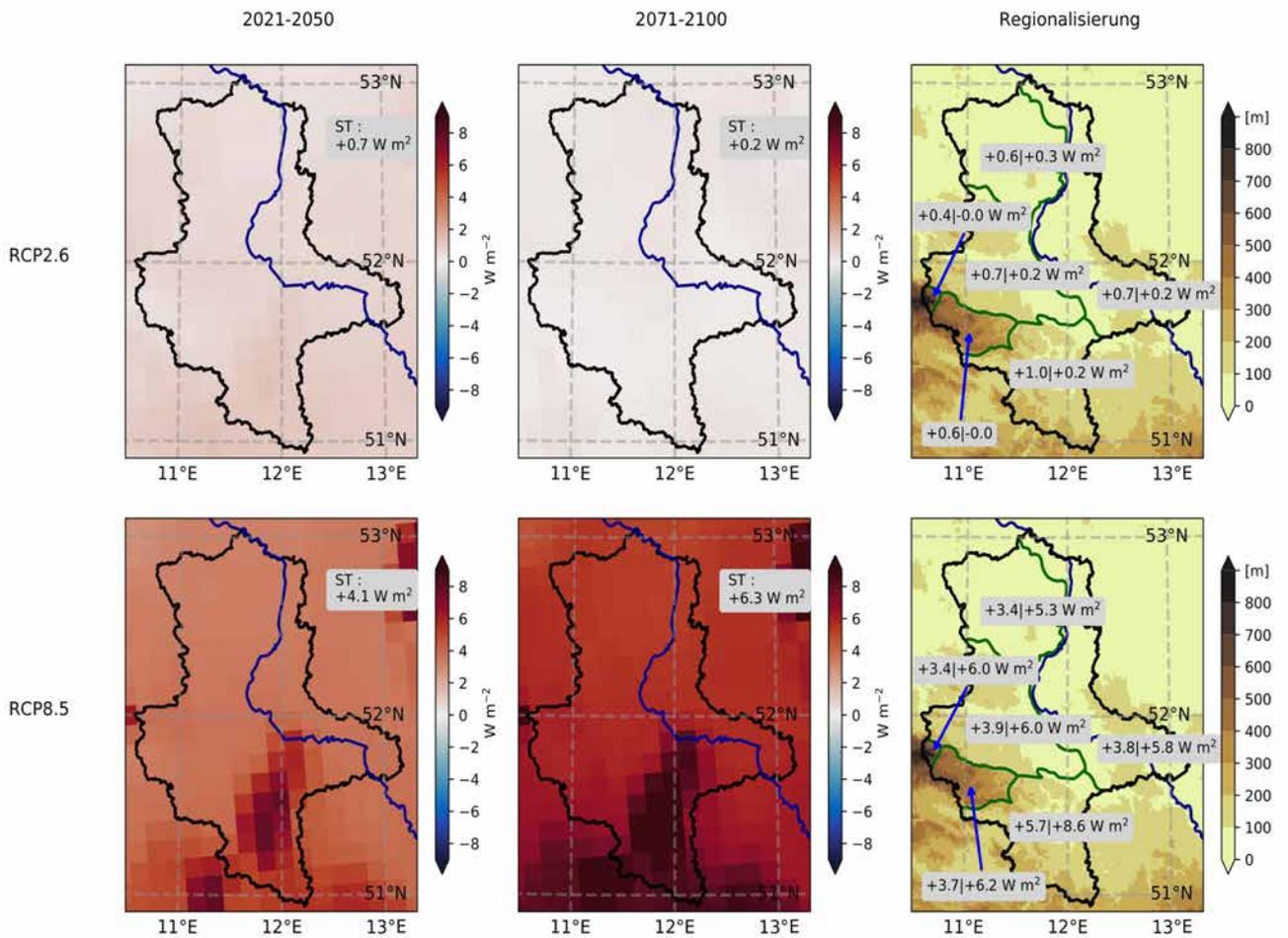


Abbildung 4.43: Mittleres Änderungssignal gegenüber der RP für die Solarstrahlung

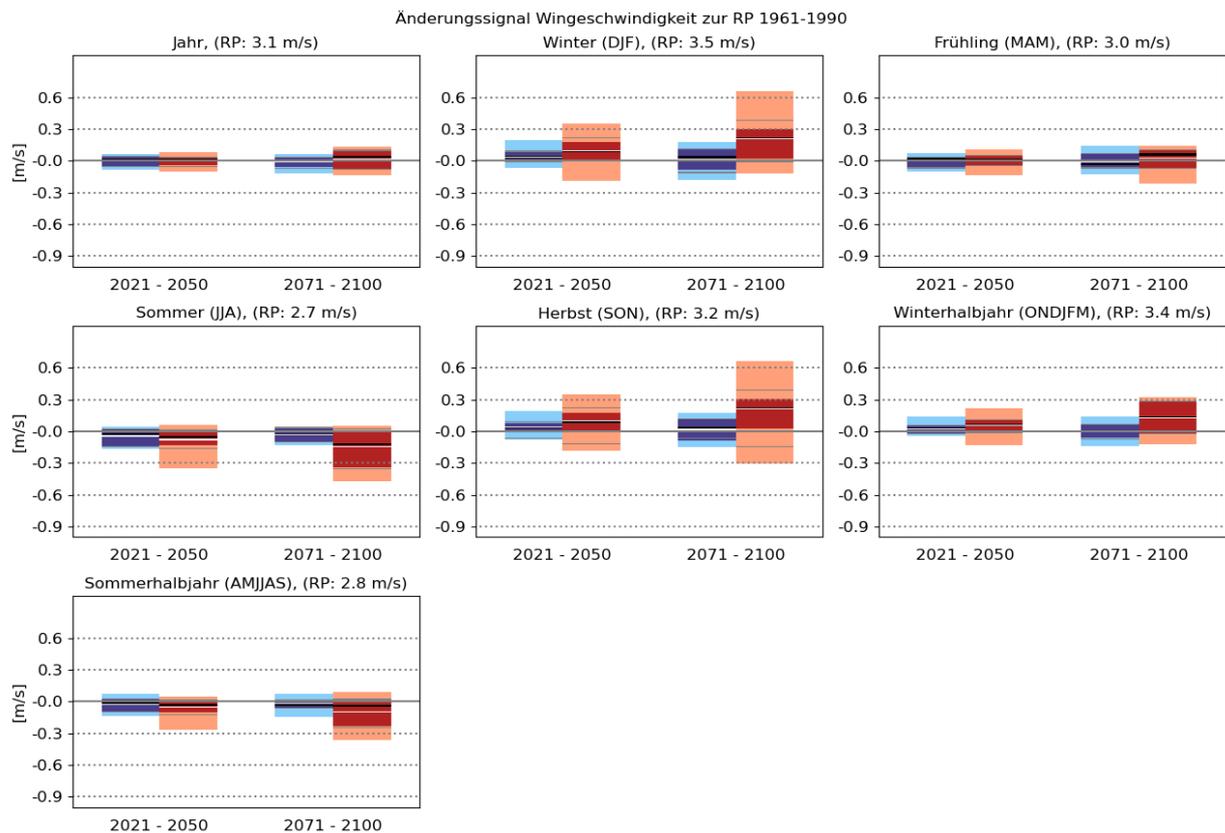


Abbildung 4.44: Bandbreite der Änderungssignale für jährliche und saisonale Mittelwerte der Windgeschwindigkeit.

Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 sowie beide Zukunftsperioden. Jeweils für RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) sowie nahe und ferne Zukunft. Die jeweils linke vertikale Achse der Diagramme zeigt das Änderungssignal und die jeweils rechte vertikale Achse zeigt den tatsächlichen, projizierten Wert.

Insgesamt sind Fragen nach Anpassungsbedarfen für Sturmereignisse oder Energiegewinnung aus diesen Daten nur schwer zu beantworten, jedoch lässt sich durch die größere spezifische Luftfeuchte darauf schließen, dass Hitzebelastung durch Schwüle und konvektives Gefahrenpotential im Falle auftretender Gewitter ansteigen dürfte, insbesondere unter Annahme des RCP8.5 oder einer Änderung, die zwischen RCP2.6 und RCP8.5 liegt. Bezüglich der Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung ergeben sich nur für das RCP8.5 ein nennenswertes Änderungssignale mit einer Zunahme der Strahlung und einer Abnahme der Windgeschwindigkeit im Sommer, sowie einer Zunahme der Windgeschwindigkeit im Herbst und Winter jeweils in der fernen Zukunft.

5 Signifikanz- und Robustheitsbetrachtungen

Die quantitative Auswertung der Änderungssignale im vorhergehenden Kapitel wird ergänzt durch die Untersuchung auf statistische Signifikanz und Robustheit dieser Änderungssignale. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für das gesamte mitteldeutsche Referenzensemble diskutiert, wobei der Bezug in den Darstellungen auf dem Landesmittel für Sachsen-Anhalt liegt. Die Ergebnisse der Regionalisierung sowie für die Betrachtung des Klimawandels gegenüber der BP finden sich in separaten Dateianhängen. Signifikanzbetrachtungen werden zur Untersuchung der Konsistenz der Ergebnisse durchgeführt und die Robustheitsanalyse gibt Aufschluss darüber, ob die festgestellten Änderungssignale in Bezug auf den Antrieb der Änderung - die erhöhten Konzentrationen der Treibhausgase - als deren Folge interpretiert werden können. Die Zusammenschau aus Signifikanz- und Robustheitsbetrachtung ermöglicht eine Plausibilitätsüberprüfung der Ergebnisse. Die im Endberichten präsentierten Ergebnisse zur Signifikanz und Robustheit der Änderungssignale stellen nicht alle in den Tabellen 2.2-2.5 bezeichneten Kenngrößen dar, weil viele der Kenngrößen auf den Hauptkenngrößen wie Temperatur und Niederschlagsmengen beruhen. Die entsprechenden Darstellungen befinden sich in separaten Dateianhängen.

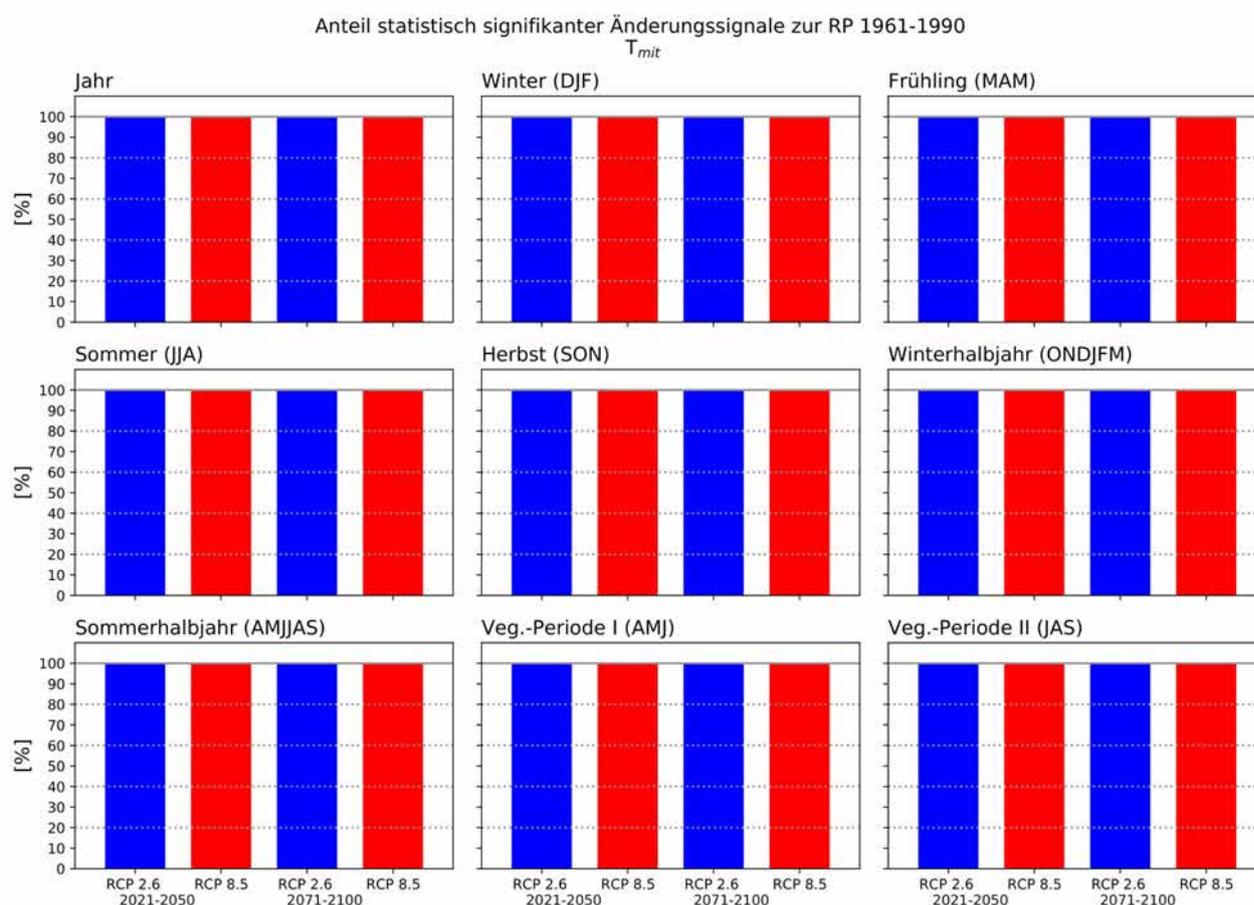


Abbildung 5.1: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für die Mitteltemperatur. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

5.1 Signifikanzbetrachtung

Statistische Signifikanz bedeutet, dass der Unterschied zwischen zwei Mengen oder Teilmengen sehr wahrscheinlich nicht auf zufällige Schwankungen innerhalb dieser Teilmengen zurückzuführen sind. Für dieses Projekt werden die Verteilungen der Werte der untersuchten Größe, wie z.B. der Mitteltemperatur, jeder Projektion des Referenzensembles für verschiedene Zeiträume mittels Signifikanztests gegenübergestellt. In diesem Projekt kommen der Welch-Test und der KS-Test zur Anwendung, wie es für die Untersuchung von Klimaänderungssignale empfohlen wird (Hennemuth, et al., 2013). Der Welch-Test ist besonders sensitiv in Bezug auf Änderungen des Mittelwertes. Da Klimakenngrößen sich nicht nur im Mittelwert, sondern auch in der Art der Verteilung ändern können – mit mehr oder weniger häufigen Extremwerten – ohne, dass sich die Mittelwerte verändern, wird auch der KS-Test durchgeführt, der sensitiv für signifikante Änderungen auf der gesamten Spannweite der Verteilung ist. Die Durchführung der Signifikanztests führt zur Berechnung und Angabe der Wahrscheinlichkeit für den Fall, dass beide Teilmengen aus der gleichen Grundgesamtheit stammen, der sogenannten Null-Hypothese. Im Falle der Klimamodellauswertung kann die Null-Hypothese gleichgesetzt werden mit der Annahme, dass sich das Klima nicht systematisch, sondern nur durch natürliche Schwankungen verändert. Die Angabe der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der Null-Hypothese wird als P-Wert bezeichnet. Liegt der P-Wert unterhalb einer festgelegten Grenze, wird ein Änderungssignal als statistisch signifikant bezeichnet. Für diese Klimamodellauswertung wird diese Grenze auf 0,01 oder 1 % festgesetzt. Es besteht also eine Wahrscheinlichkeit von 99 % oder höher, dass das jeweils betrachtete Änderungssignal durch den menschengemachten Klimawandel hervorgerufen wird. Für dieses Projekt wird ein Änderungssignal als statistisch signifikant bewertet, wenn der P-Wert unter 1 % liegt für das Ergebnis sowohl des Welch-Tests als auch des KS-Tests.

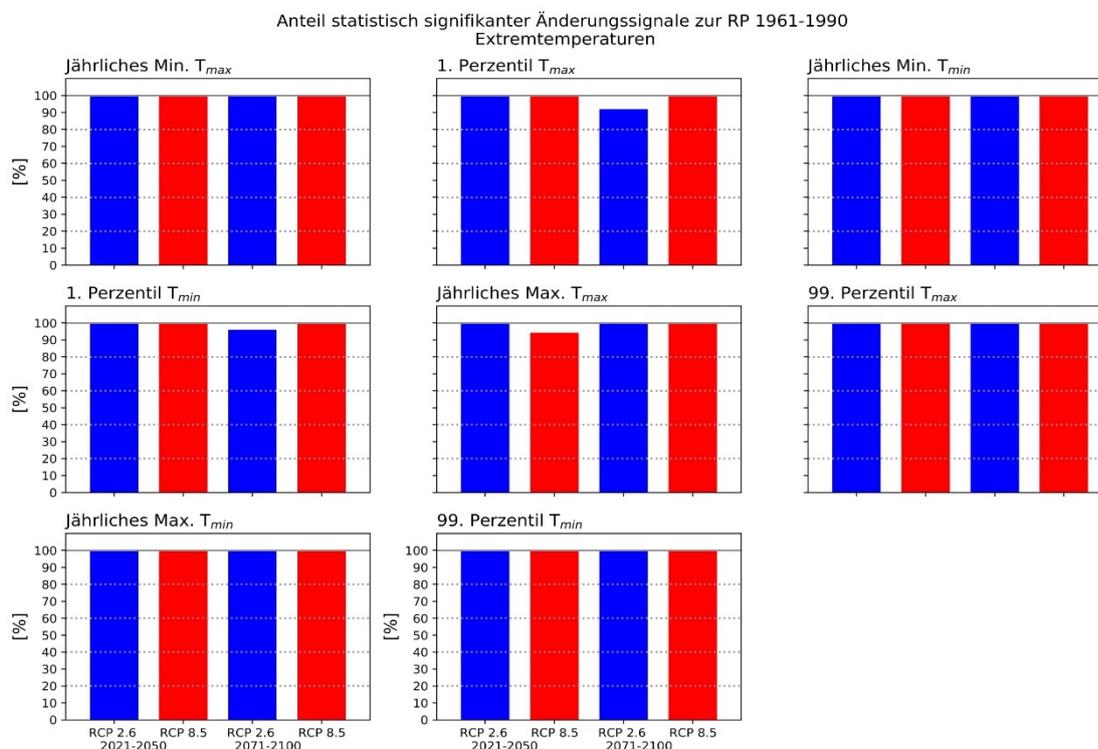


Abbildung 5.2: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für die Extremwerte der Temperatur. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

5.1.1 Temperatur

In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse der Signifikanzbetrachtung für die Mitteltemperatur dargestellt. Ausnahmslos alle Simulationen des RCP2.6 und des RCP8.5 weisen statistisch signifikante Änderungssignale auf für alle Jahreszeiten. In sehr guter Übereinstimmung ist die Änderung der Mitteltemperatur damit dem anthropogenen Klimawandel zuzuordnen. Die Ergebnisse der Signifikanzbetrachtung für T_{\max} und T_{\min} führen zum gleichen Ergebnis, die entsprechenden Graphiken und Tabellen sind Teil der separaten Dateianhänge. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass natürliche Schwankungen als Ursache der festgestellten Temperaturänderungen in Frage kommen liegt in allen Projektionen und für beide Szenarien bei unter 1 %, weshalb die in Abbildung 5.71 dargestellten Balken alle 100 % erreichen. Angesichts der Tatsache, dass sich die Energiebilanz der Atmosphäre durch die menschengemachte Erhöhung der THG-Konzentration verändert und der physikalische Mechanismus sowie dessen Auswirkungen bekannt sind, ist dies nicht verwunderlich. Außerdem zeigen die Ergebnisse aus Abb. 5.1, dass mögliche Änderungen der Zirkulation und Wetterlagen in Sachsen-Anhalt den Effekt der Erwärmung nicht maskieren.

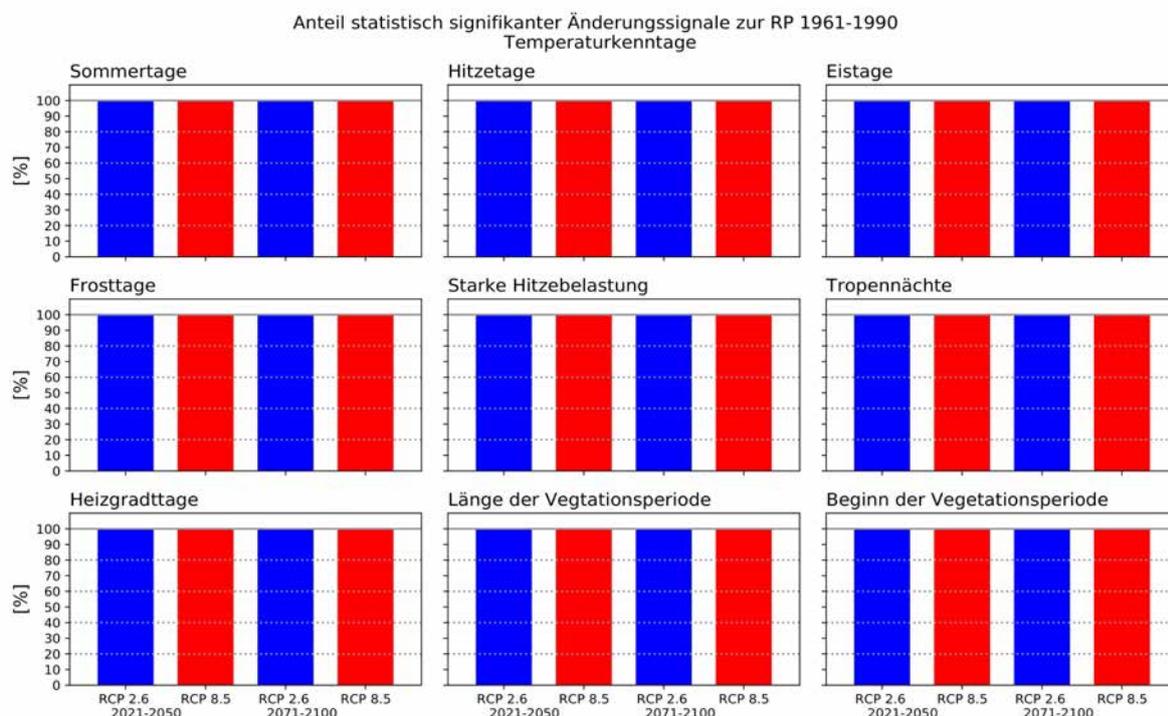


Abbildung 5.3: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für die Temperaturkenntage. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

Auch für die Änderung der Extremwerte der T_{\max} und T_{\min} (Abb. 5.2) zeigt sich im Wesentlichen das gleiche Bild. Für das RCP2.6 kann in der fernZ für das 1. Perzentil von T_{\max} und T_{\min} jedoch nur in etwa 90-95 % der Projektionen von einer signifikanten Änderung gesprochen werden. Dies trifft auch für die höchsten Temperaturen zu in der nahZ des RCP8.5. Die in Abbildung 5.2 feststellbaren leichten Abweichungen der Ergebnisse von denen der Mitteltemperaturen lässt darauf schließen, dass die Veränderung der Extremwerte zu einem geringeren Grad an Sicherheit festgestellt werden kann, als die Veränderung der Mitteltemperaturen. Jedoch ist aufgrund der überwältigenden Mehrheit der signifikanten Änderungssignale für die Extremwerte der Temperatur keine grundsätzlich abweichende Deutung für die Änderung der

Extremtemperaturen möglich: Auch die Extremwerte der Temperatur verändern sich signifikant zum Klimazustand der RP.

5.1.2 Temperaturkenntage

Die Ergebnisse der Signifikanzbetrachtung für die Änderungssignale der Kenntaggrößen der Temperatur zeigen, dass ausnahmslos alle diese Änderungssignale statistisch signifikant sind (Abb. 5.3). Angesichts der im vorherigen Kapitel gezeigten engen Bündelung der Projektionen und der deutlichen Änderungssignale dieser Größen, verursacht durch den Temperaturanstieg, sind die Ergebnisse der Signifikanzbetrachtung wenig verwunderlich.

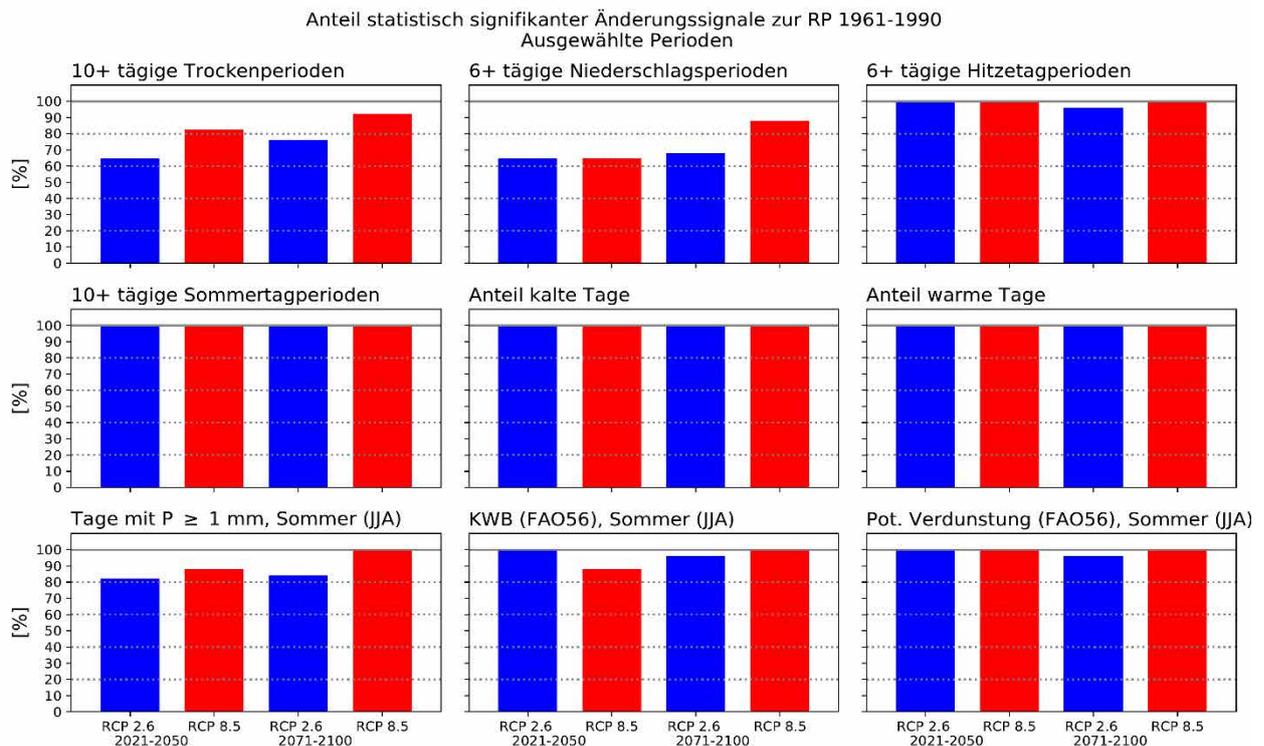


Abbildung 5.4: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für Indikatoren für Dürre- und Hitzebewertung. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

Wie in Abbildung 5.4 dargestellt ist, sind auch die Änderungssignale für den Anteil kalter Tage (starke Abnahme) und den Anteil warmer Tage (starke Zunahme), sowie die Zunahme von Hitzetageperioden mit mindestens 6 Tagen und Sommertageperioden mit mindestens 10 Tagen Dauer statistisch signifikant in mindestens 95 % der Projektionen. Abbildung 5.4 enthält auch die Anteile statistisch signifikanter Projektionen für Kenngrößen mit hoher Relevanz für den Wasserhaushalt und Dürre. Für die Anzahl der Trockenperioden mit mindestens 10 Tagen Dauer liegen die Anteile statistisch signifikanter Änderungssignale im Referenzensemble bei 60 % für den Zeitraum 2021-2050 und 75 % für den Zeitraum 2071-2100 im RCP2.6 und bei 80 bzw. 90 % im RCP8.5. Für Perioden mit mindestens 6 Niederschlagstagen mit mindestens 1 mm Niederschlag liegt der Anteil der statistisch signifikanten Änderungssignale bei 60 bis 65 % und bei etwa 85 % im RCP8.5 für die fernZ. Die Reduktion der Anzahl der Niederschlagstage mit mindestens 1 mm in den Sommermonaten ist statistisch signifikant in 80 bis 85 % der Projektionen des Referenzensembles und in allen Projektionen des RCP8.5 in der fernZ. Die Änderungssignale der KWB und der potentiellen Verdunstung sind in mindestens 85 % bzw. 95

% der Projektionen statistisch signifikant. Eine Zunahme der Dürreereignisse ist damit sehr wahrscheinlich, insbesondere im RCP8.5 und in der fernZ, jedoch ist die Vertrauenswürdigkeit der Aussagen geringer als die zur statistischen Signifikanz der Änderungssignale der Temperatur.

5.1.3 Niederschläge

Die Ergebnisse der Signifikanzbetrachtung zu den saisonalen, jährlichen und halbjährlichen Niederschlagssummen sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Im Gegensatz zu Aussagen zum Themenfeld Temperatur sind die Anteile signifikanter Änderungssignale in den Projektionen des Referenzensembles deutlich niedriger und nicht homogen über das gesamte Jahr verteilt. Grundsätzlich ist der Anteil statistisch signifikanter Änderungssignale in der fernZ etwas größer als in der nahZ, besonders für das RCP8.5. Die Zunahme des statistisch signifikanten Anteils von Änderungssignalen von nahZ zur fernZ ist für das RCP8.5 deutlicher als für das RCP2.6. Die Abnahme der Niederschläge im Sommer und die Zunahme im Winter bewirken eine Reduktion der Signifikanz der Änderungssignale für das Gesamtjahr. Winter (Zunahme) und Sommer (Abnahme) weisen die größten Anteile statistisch signifikanter Änderungssignale auf, während das Gesamtjahr und der Herbst geringere Anteile statistisch signifikanter Änderungssignale aufweisen.

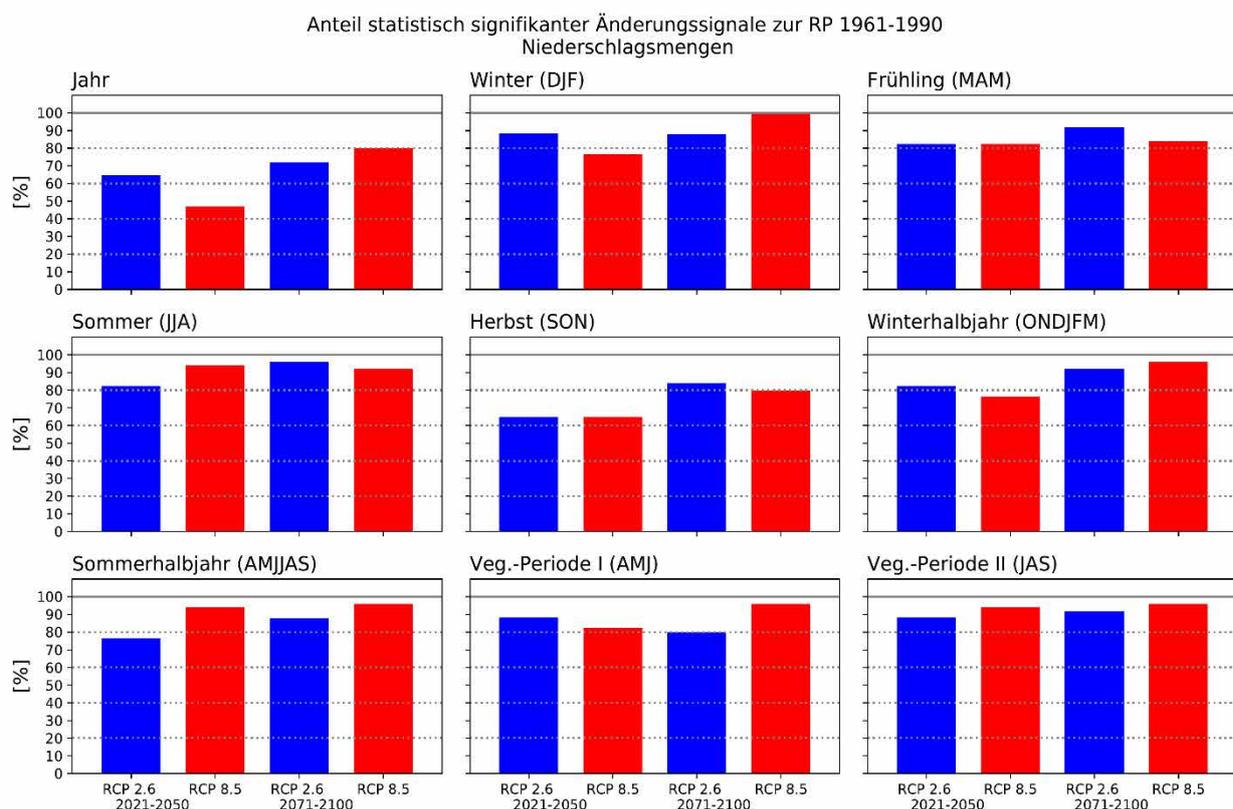


Abbildung 5.5: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Niederschlagsmengen. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

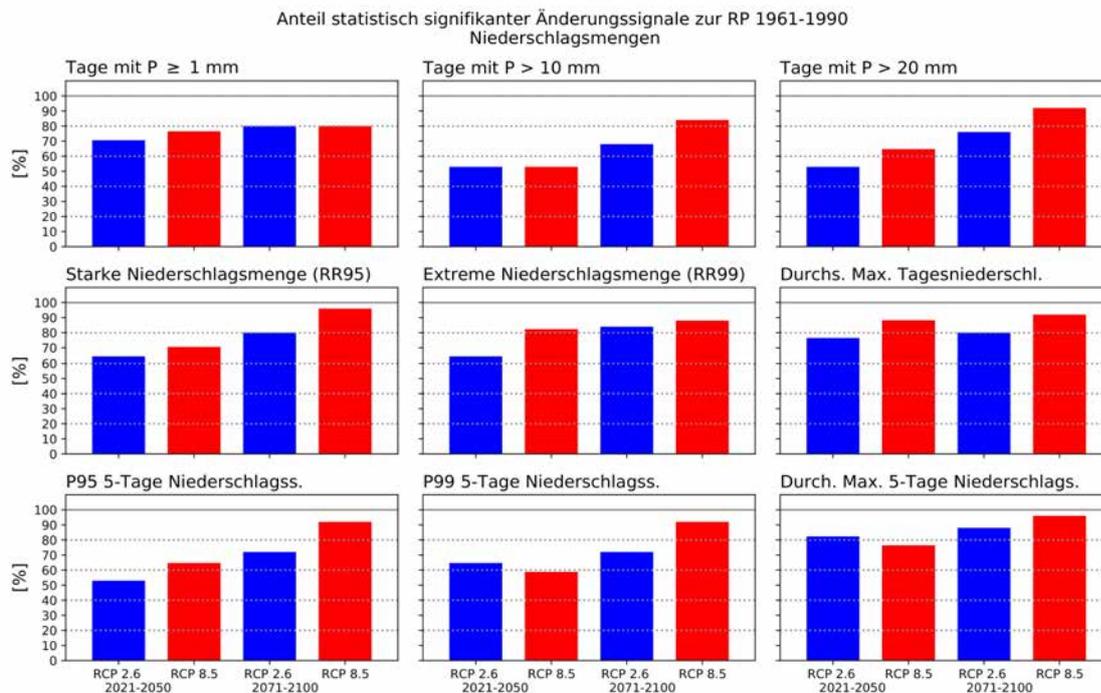


Abbildung 5.6: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für Kenntagindikatoren zum Themenfeld Niederschlag. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

Für die statistische Signifikanz der Änderungssignale der Kenntaggrößen des Themenfeldes Niederschlag ergibt sich ein ähnliches Bild wie für die Niederschlagsmengen (Abb. 5.6). Generell nimmt die Anzahl der statistisch signifikanten Projektionen von der nahen zur fernen Zukunft zu und der Zuwachs ist im RCP8.5 stärker ausgeprägt als im RCP2.6. Besonders hohe Anteile statistisch signifikanter Änderungssignale sind für die Kenngrößen RR95, RR99 und den durchschnittlichen maximalen Tagesniederschlag feststellbar. Im RCP8.5 in der fernZ sind mindestens 80 % aller Änderungssignale für alle in Abb. 5.6 dargestellten Parameter statistisch signifikant.

In der Gesamtschau zeigt die Signifikanzbetrachtung der Änderungssignale zum Parameterfeld Niederschlag einen großen Anteil signifikanter Änderungssignale. Jedoch ist aus der Betrachtung der Bandbreite der Änderungssignale im vorherigen Kapitel ersichtlich, dass die statistisch signifikanten Änderungssignale in beide Richtungen weisen können. Deshalb ist es notwendig, dass die Signifikanzbetrachtung um eine Robustheitsbetrachtung ergänzt wird, um die Aussagen zu den einzelnen Kenngrößen besser interpretieren zu können, insbesondere, da die Betrachtung der statistischen Signifikanz die Richtung der Änderung außer Acht lässt.

5.1.4 Klimatische Wasserbilanz

Die Änderung der KWB setzt sich aus der Änderung des Niederschlages und der Verdunstung zusammen. Durch die Erhöhung der Temperatur wird in allen Jahren eine höhere Verdunstung registriert. Die Anteile signifikanter Änderungssignale für die potentielle Verdunstung liegen bei über 90 % im Referenzensemble, insbesondere für das RCP8.5 (Abb. 5.7 und Abb. 5.8). Die Änderung der KWB ist im Sommer sowie im Sommerhalbjahr am deutlichsten und dies schlägt sich auch in der Signifikanzbetrachtung nieder mit einem Anteil von mindestens 85 % an statistisch signifikanten Änderungssignalen. Im Winterhalbjahr sind die Anteile von statistisch signifikanten Änderungssignalen mit 60 bis 80 % deutlich geringer. Dies wird durch die

gegensätzliche Wirkung von zunehmenden Niederschlägen im Winter und höherer Verdunstungsraten durch höhere Temperaturen bewirkt.

Die Betrachtung der KWB zeigt erneut, dass die Änderung der Temperaturen, die sich in erhöhten Verdunstungsraten zeigt, von den Projektionen besser und mit höherer Sicherheit erfasst wird, als die Änderung der Niederschläge. Dies beeinflusst die Änderung der KWB derart, dass die statistische Signifikanz der Änderungssignale der KWB etwas höher ist als die der Niederschläge. Die Anteile der signifikanten Änderungssignale in den Projektionen des Referenzensembles für den Parameter Niederschlag sind jedoch auch aus dem Grund kleiner, da die natürliche Variabilität des Niederschlages deutlich größer ist als beim Parameter Temperatur.

5.1.5 Weitere Klimakenngößen

Die Kenngrößen Wind und Solarstrahlung sind insbesondere für nachhaltige und umweltfreundliche Energieerzeugung wichtig, die im Rahmen von Klimaschutzmaßnahmen eine immer größere Rolle spielt. In Abbildung 5.9 sind die Anteile statistisch signifikanter Änderungssignale für die mittlere Windgeschwindigkeit in den Jahreszeiten dargestellt. Grundsätzlich sind die Änderungssignale für die mittlere Windgeschwindigkeit gering und weisen auch nur geringe Anteile statistisch signifikanter Projektionen auf. Lediglich im Sommer (Abnahme) und im Winter (Zunahme) zeigen sich bis zu über 80 % signifikante Änderungssignale in der fernen Zukunft im RCP8.5. Grundsätzlich sind sowohl die Beträge als auch die statistische Signifikanz der Änderungssignale der Windgeschwindigkeit im RCP8.5 höher als im RCP2.6 und in der fernen Zukunft höher als in der nahen Zukunft. Welche Änderungen sich für die Energieerträge ergeben ist jedoch aus der einfachen hier angestellten Betrachtung nicht möglich. Dafür müssten weitere Untersuchungen zum Klimaelement Wind durchgeführt werden.

Die Betrachtung der Solarstrahlung in Abbildung 5.10 zeigt höhere Anteile statistisch signifikanter Projektionen, mit Anteilen von teils mehr als 80 % der Projektionen des Referenzensembles. Im Winterhalbjahr sind diese Anteile etwas geringer. Die Erhöhung der solaren Strahlung im Sommerhalbjahr ist auf geringere Bewölkungsanteile und damit höhere Sonnenscheindauer zurückzuführen. Dies wurde zwar nicht untersucht ist jedoch angesichts der Tatsache, dass sich die extraterrestrische solare Strahlung, welche direkt von der Sonne zur Erde emittiert wird und mit der Solarkonstante erfasst wird, innerhalb von 100 Jahren nicht wesentlich ändert, die einzig mögliche Ursache. Die Änderung der Bewölkungsverhältnisse ist wiederum Folge und Indikator von Änderungen der atmosphärischen Zirkulation, welche in diesem Projekt nicht untersucht worden sind.

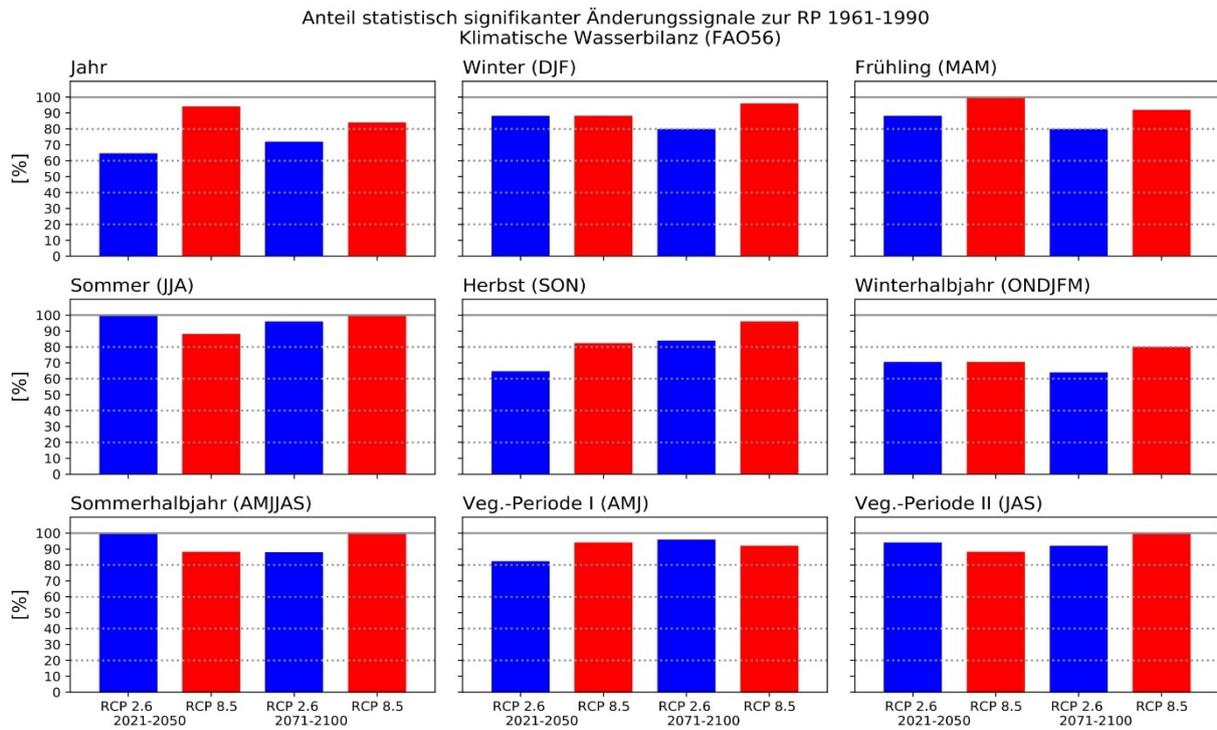


Abbildung 5.7: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Werte der KWB. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

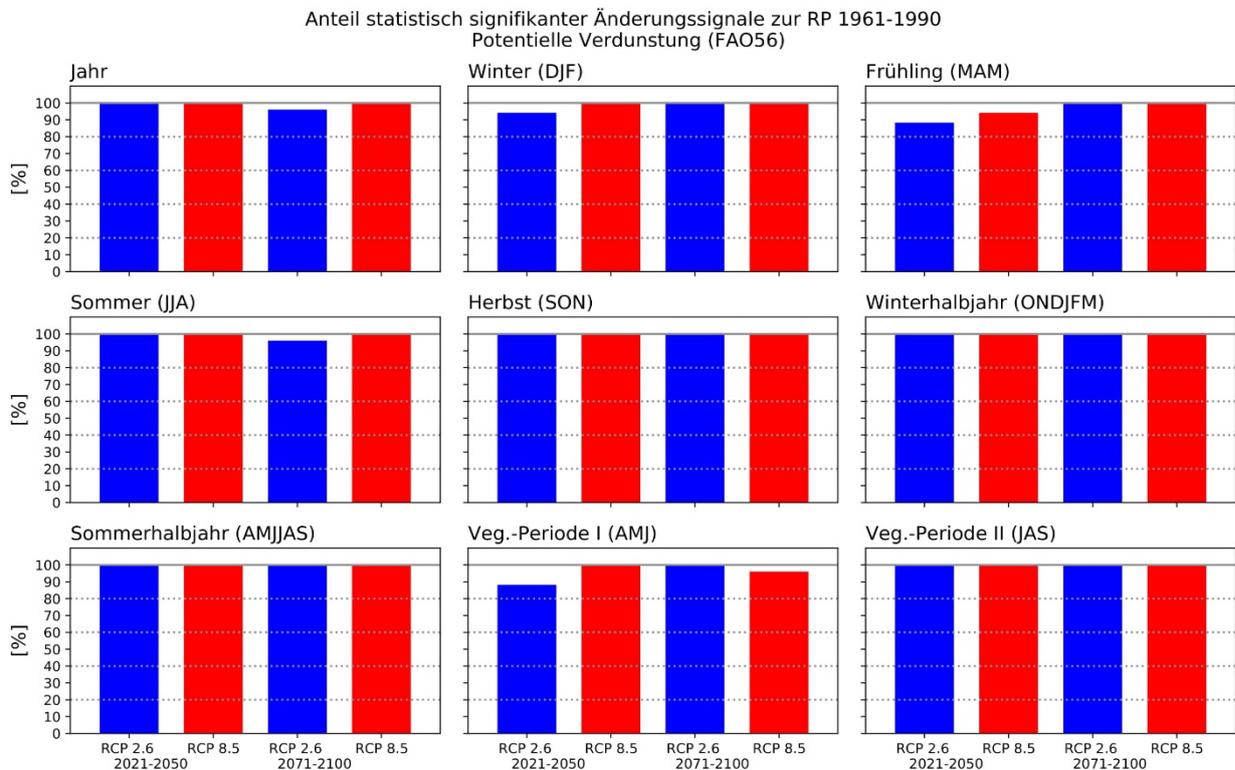


Abbildung 5.8: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Werte der potentiellen Verdunstung. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

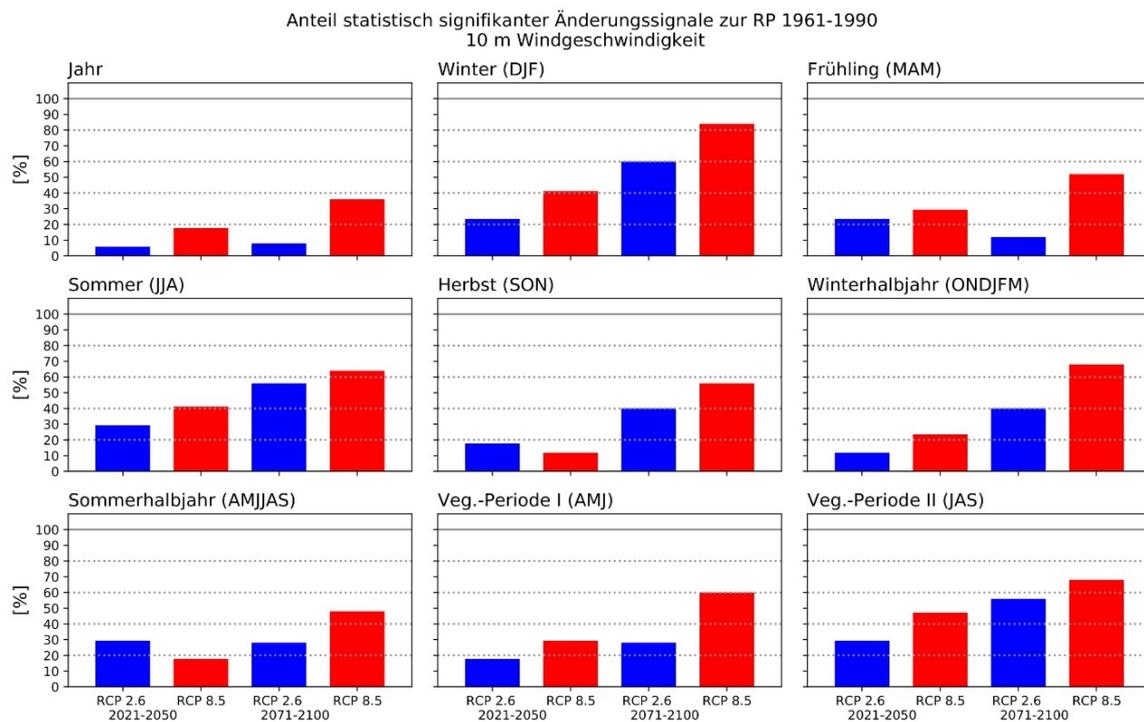


Abbildung 5.9: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Windgeschwindigkeiten. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

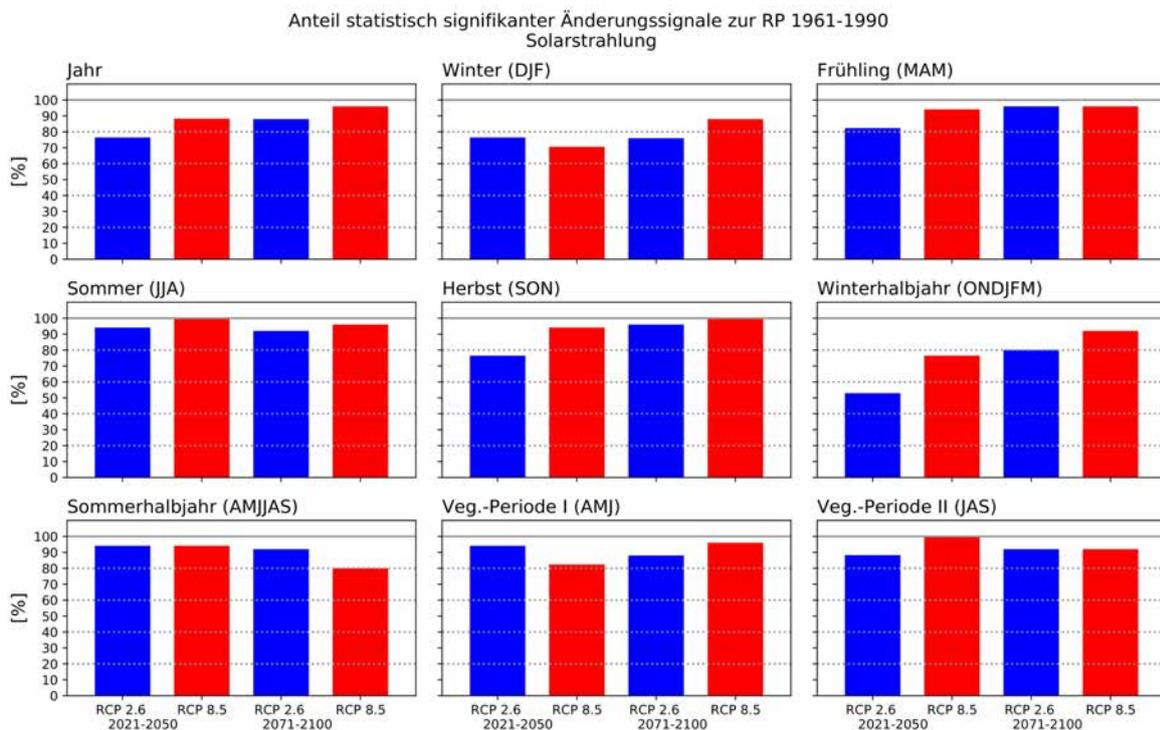


Abbildung 5.10: Ergebnis der Signifikanzbetrachtung für saisonale Werte der Solarstrahlung. Signifikant ist ein Änderungssignal dann, wenn der P-Wert sowohl für den Welch-Test als auch den KS-Test unter 1 % liegt. Dargestellt sind die Anteile an Projektionen des Referenzensembles mit statistisch signifikanten Änderungssignalen.

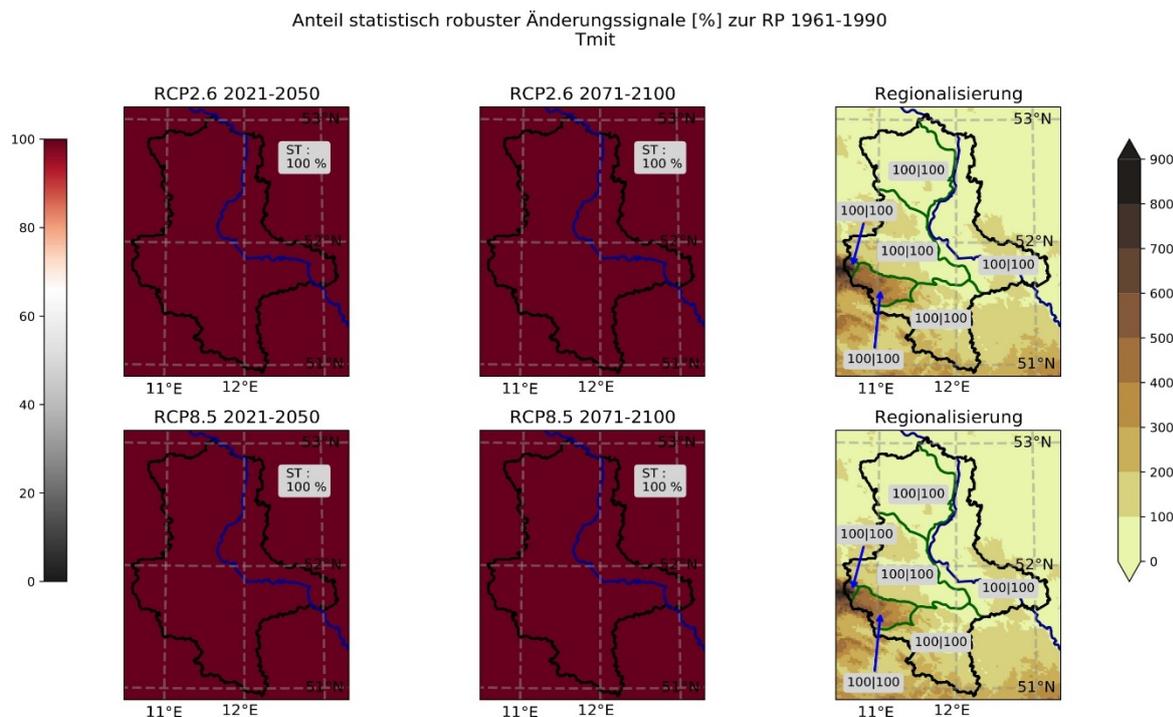
5.2 Robustheitsbetrachtung

Die Betrachtung der *Robustheit* eines Änderungssignales ist ein in der Klimawissenschaft angewandter Ansatz zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Änderungssignals sowie dessen Stärke. Das Änderungssignal eines Parameters wird in einer Projektion dann als robust eingeschätzt, wenn es drei Stufen der Testung durchläuft und die jeweiligen Kriterien erfüllt. Ein einzelnes Änderungssignal erfüllt dann die Kriterien der Robustheit, wenn es in eine Richtung weist, statistisch signifikant ist und nicht stark abhängig von der Auswahl der Referenzperioden ist. Letzteres wird in diesem Projekt geprüft, indem zunächst die höchsten zwei Jahreswerte des Parameters aus der Zeitserie mit den erhöhten Werten entfernt werden und die gleiche Prozedur für die zwei tiefsten Jahreswerte aus der Zeitreihe mit den niedrigeren Werten durchgeführt. Im Anschluss wird das Änderungssignal erneut berechnet und mit dem vorherigen Wert verglichen. Falls das Änderungssignal sich nicht um mehr als 25 % verringert, wird es als robust eingestuft. Erfüllen für einen bestimmten Parameter mindestens 66 % der Projektionen ein Änderungssignal auf, das die Kriterien für Robustheit erfüllt, dann wird das Änderungssignal des gesamten Ensembles als robust eingestuft. In diesem Kapitel wird die Robustheitsbetrachtung für das gesamte Referenzensemble diskutiert.

5.2.1 Temperatur

Die Änderungssignale für den Parameter Temperatur sind ausnahmslos als robust einzustufen. Repräsentativ ist in Abbildung 5.11 der Anteil der Projektionen für die Jahresmitteltemperatur dargestellt, die die Kriterien für Robustheit erfüllen. Das Entscheidungskriterium von mindestens 66 % robuster Änderungssignale im Referenzensemble ist durch die Farbskala anhand der roten Färbung sehr leicht auszumachen. Graue Farben implizieren einen Anteil von weniger als 66 % der Projektionen, die die Kriterien zur Robustheit erfüllen.

Abbildung 5.11: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die Mitteltemperatur. Robust sind projizierte



Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Die Ergebnisse für die saisonalen Änderungssignale und weitere Temperaturparameter sind in den Anhängen aufzufinden, welche auch ausnahmslos robuste Änderungssignale sind. In der Gesamtschau kann die Änderung der Temperatur, im Falle des anthropogenen Klimawandels die Erwärmung der Temperatur, als sehr robust eingeschätzt werden. Dies bedeutet, dass die Sicherheit, dass eine Erwärmung stattfinden wird, sehr groß ist unter der Annahme der Szenarien RCP2.6 (günstigste Annahmen) und RCP8.5 (business-as-usual). Auch der Betrag der Änderung ist nicht stark abhängig von der Auswahl bzw. der Verschiebung der Referenzperiode um wenige Jahre und damit kann gefolgert werden, dass die Änderungssignale weit über den Beträgen der natürlichen Variabilität liegen. Die Bandbreite der Änderungssignale ist hoch und das deutet darauf hin, dass neben der veränderten Energiebilanz der Atmosphäre durch den Eintrag von Treibhausgasen auch die Veränderung der Wetterlagenmuster, Bewölkungsverhältnisse und Luftmassentransporte wichtige Faktoren der Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt sind und deshalb weitere Untersuchungen notwendig sein werden, um diese Änderungen und deren Auswirkungen genauer beschreiben zu können.

5.2.2 Niederschläge

Im Gegensatz zu den eindeutigen Aussagen zur Temperatur, sind die Änderungssignale der jährlichen Niederschlagsmengen nicht robust. In den Abbildungen 5.12, 5.13 und 5.14 sind die Anteile der die Kriterien zur Robustheit erfüllenden Änderungssignale an den Projektionen des Referenzensembles abgebildet für die Niederschlagssummen im Gesamtjahr, Winter und Sommer. An den grauen Farben und den Landes- und Regionalmittelwerten zwischen 35 und 60 % ist klar abzuleiten, dass das Kriterium zur Robustheit für die jährlichen Niederschlagsmengen nicht erfüllt wird.

Die Änderungssignale der Niederschläge im Sommer sind im RCP2.6 für das Referenzensemble mit Anteilen von 64 bzw. 66 % robuster Änderungssignale in der nahen bzw. fernen Zukunft gerade unterhalb des Schwellwerts der Robustheit angesiedelt (Abb. 5.13). Für das RCP8.5 ist das Änderungssignal im Referenzensemble in der nahen Zukunft auf Landesebene robust mit einem Anteil von 69 %. Regional betrachtet ist dieses Änderungssignal besonders in den mittleren Gebieten des Landes robust. In der fernen Zukunft des RCP8.5 liegt der Anteil robuster Änderungssignale bei 80 % und damit ist das Änderungssignal des Referenzensembles insgesamt als robust einzustufen.

Für die in Abbildung 5.14 dargestellten Änderungssignale der Niederschläge im Winter ergeben sich robuste Änderungssignale für alle Zeiträume und Szenarien. Im RCP2.6 erfüllen etwa 80 % der Änderungssignale die Kriterien und diese Anteile sind regional gleichmäßig verteilt. Im RCP8.5 liegt der Anteil robuster Änderungssignale bei 84 % in der nahZ und 97 % in der fernZ. Dabei fällt auf, dass in einem Streifen von der Magdeburger Börde nach Südosten bis in das Burgenland die Anteile von robusten Änderungssignalen etwa 20 % niedriger sind als in den anderen Regionen, in denen dieser Anteil gleichmäßig verteilt ist. In diesen südlichen Regionen berechnen einzelne Projektionen der Modellkette CCCma-CAN-ESM2 weniger starke Änderungssignale als in den anderen Regionen. Insgesamt ist also die Änderung der saisonalen Niederschlagsmengen insbesondere im RCP8.5 und insbesondere im Winter und verstärkt in der fernZ als robust einzuschätzen. Aufgrund der gegensätzlichen Signale mit Zunahme im Winter und Abnahme im Sommer, ergeben sich für die jährlichen Niederschlagsmengen keine robusten Änderungen. Die Auffälligkeit der regionalen Unterschiede in den Projektionen des CCCma-CAN-ESM2 machen deutlich, dass die Auswahl der Modelle und das Verständnis der Ursachen der Änderungen der Niederschlagsmengen innerhalb der Projektionen des Referenzensembles wichtig sind, um die Entwicklung der

Niederschlagsmengen und damit in Zusammenhang stehender Parameter wie Starkregeneignisse und Dürren verstehen zu können.

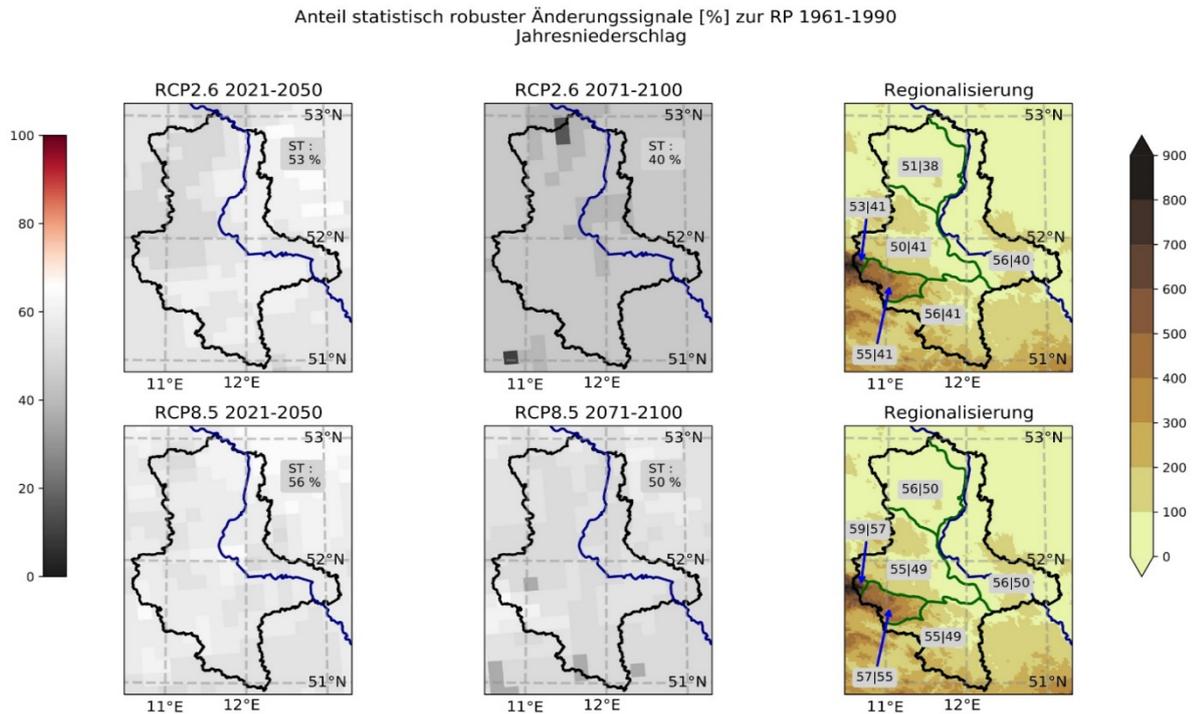


Abbildung 5.12: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die jährliche Niederschlagsmenge. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

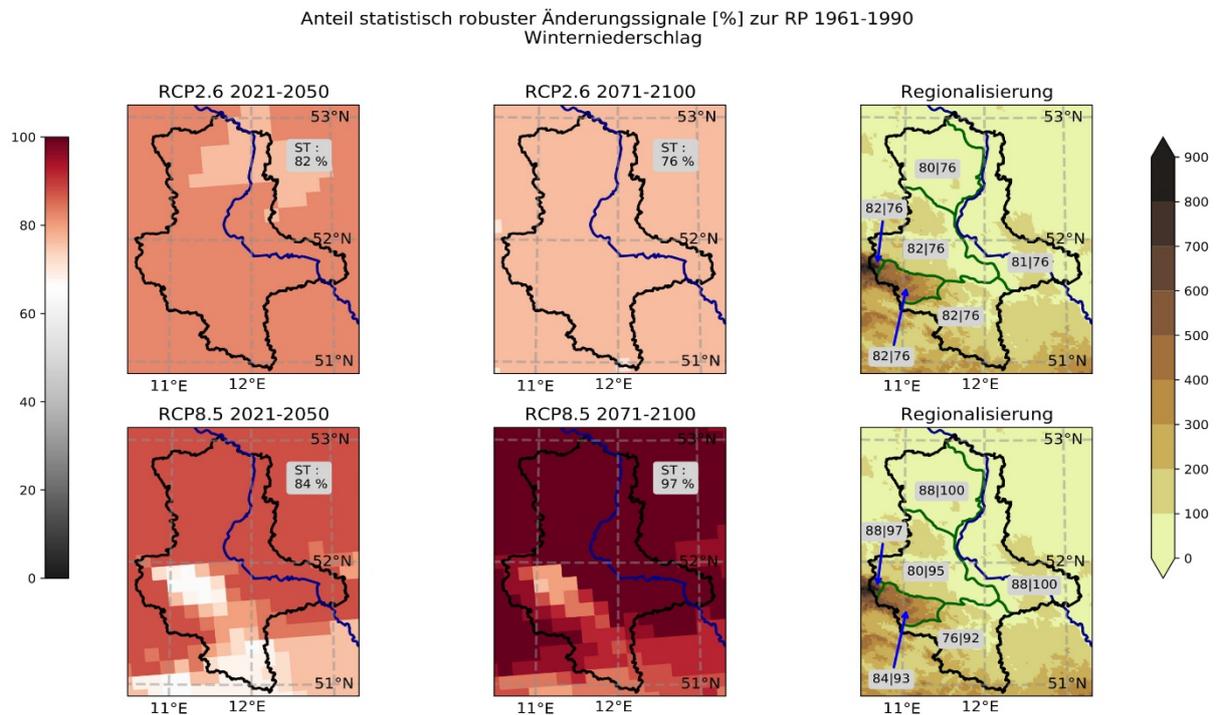


Abbildung 5.13: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die winterliche Niederschlagsmenge. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Anteil statistisch robuster Änderungssignale [%] zur RP 1961-1990
Sommerniederschlag

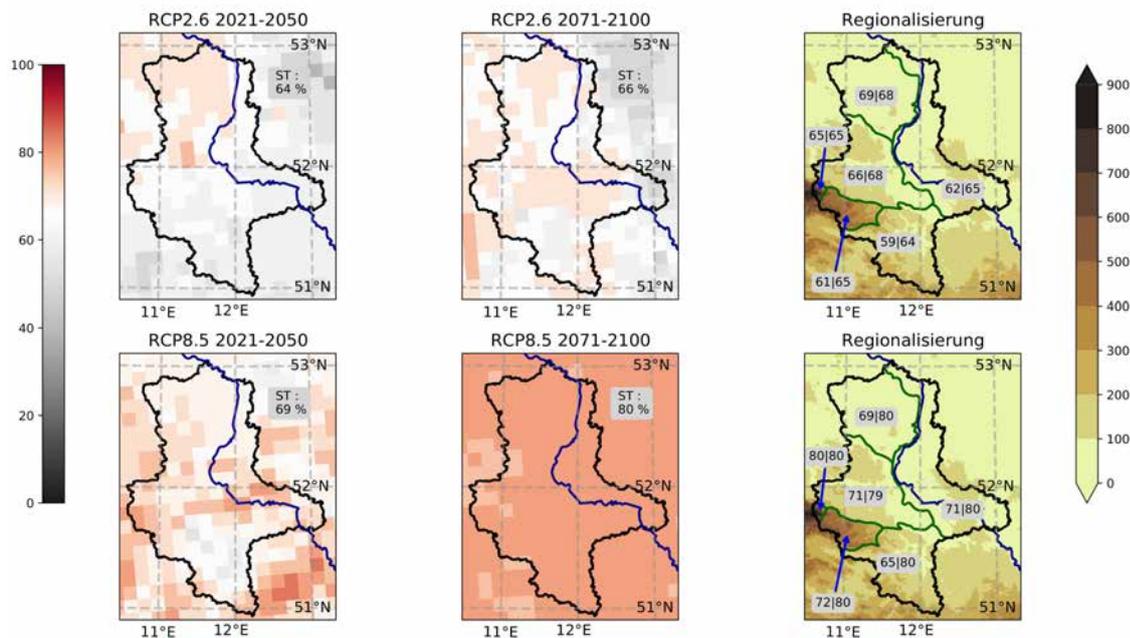


Abbildung 5.14: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die sommerliche Niederschlagsmenge. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

5.2.3 Klimatische Wasserbilanz

Die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für die KWB ist in den Abbildungen 5.15, 5.16 und 5.87 für das gesamte Jahr, Winter und Sommer dargestellt. Für das Gesamtjahr sind die Änderungssignale der KWB im RCP2.6 nicht robust, auch wenn der Anteil der robusten Änderungssignale in den zentralen Regionen Sachsen-Anhalts mit örtlich etwa 70 % in der fernZ am größten ist und nach Norden und Westen hin deutlich abnimmt (Abb. 5.15). Im RCP8.5 ist das jährliche Änderungssignal der KWB in der nahen Zukunft landesweit nicht robust und in der fernen Zukunft ebenfalls auf Landesniveau knapp nicht robust. Regional liegen im südlichen und östlichen Sachsen-Anhalt jedoch robuste Änderungssignale vor. Nach Nordwesten nimmt auch im RCP8.5 der Anteil robuster Änderungssignale ab.

Die winterlichen Änderungssignale der KWB sind im nördlichen Sachsen-Anhalt sowie im Oberharz statistisch robust, während dies in den südlichen Regionen überwiegend nicht der Fall ist und in allen Zeiträumen und Szenarien die Anteile der robusten Änderungssignale von Norden nach Süden abnehmen. Im RCP2.6 sind im Landesmittel die Änderungen des winterlichen Niederschlags als robust einzustufen, auch wenn das Kriterium von 66 % Änderungssignale, die die Kriterien erfüllen, nur knapp überschritten wird. Im südlichen Sachsen-Anhalt sind die Änderungssignale des RCP2.6 nicht robust (Abb. 5.16). Das Änderungssignal des RCP8.5 ist im bereits erwähnten Streifen von der Magdeburger Börde bis zum südlichen Sachsen-Anhalt nicht robust, in diesem Falle jedoch nicht aufgrund der geringen Änderungssignale der Projektionen der Modellkette des CCCma-CAN-ESM2. Die Zunahme der KWB im Winter ist wahrscheinlich an häufigere oder feuchtere Westwetterlagen geknüpft, die in den südlichen Bereichen von Sachsen-Anhalt östlich des Harzes oft ohne markante Niederschläge auftreten, während weiter westlich und nördlich höhere Niederschlagssummen auftreten. Diese Vermutung muss jedoch durch weitere Arbeiten bestätigt werden.

Anteil statistisch robuster Änderungssignale [%] zur RP 1961-1990
Klimatische Wasserbilanz (FAO56)

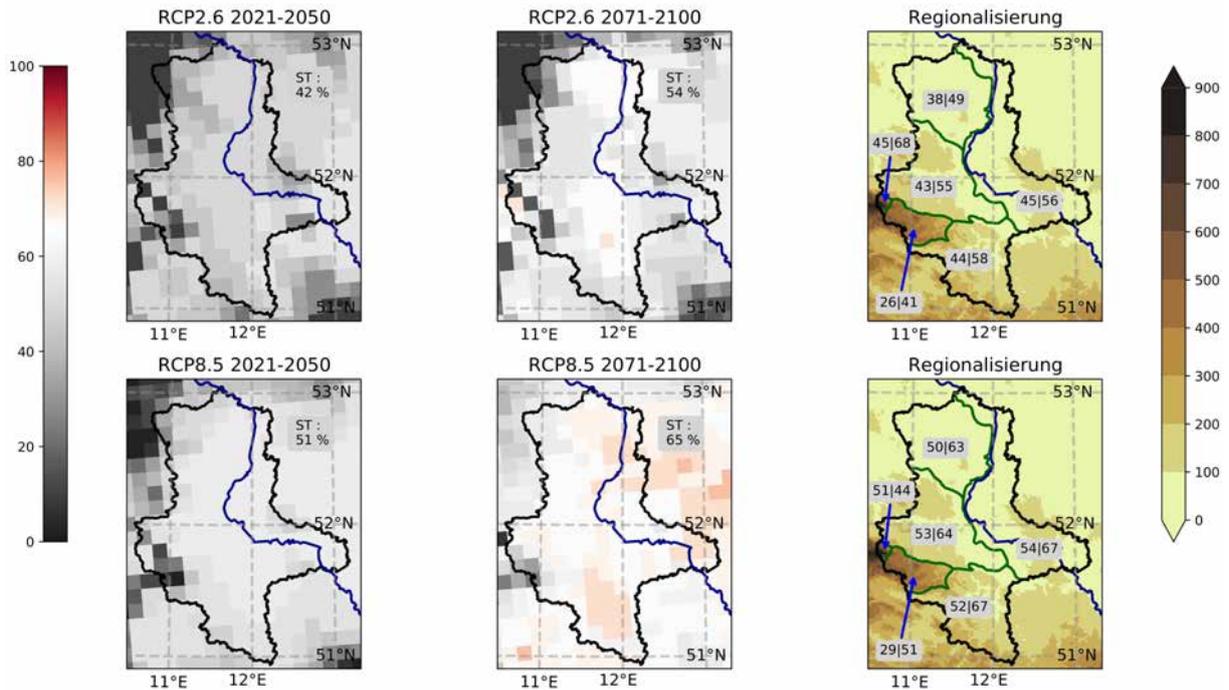


Abbildung 5.15: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die jährliche KWB. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Anteil statistisch robuster Änderungssignale [%] zur RP 1961-1990
Klimatische Wasserbilanz (FAO56), Winter (DJF)

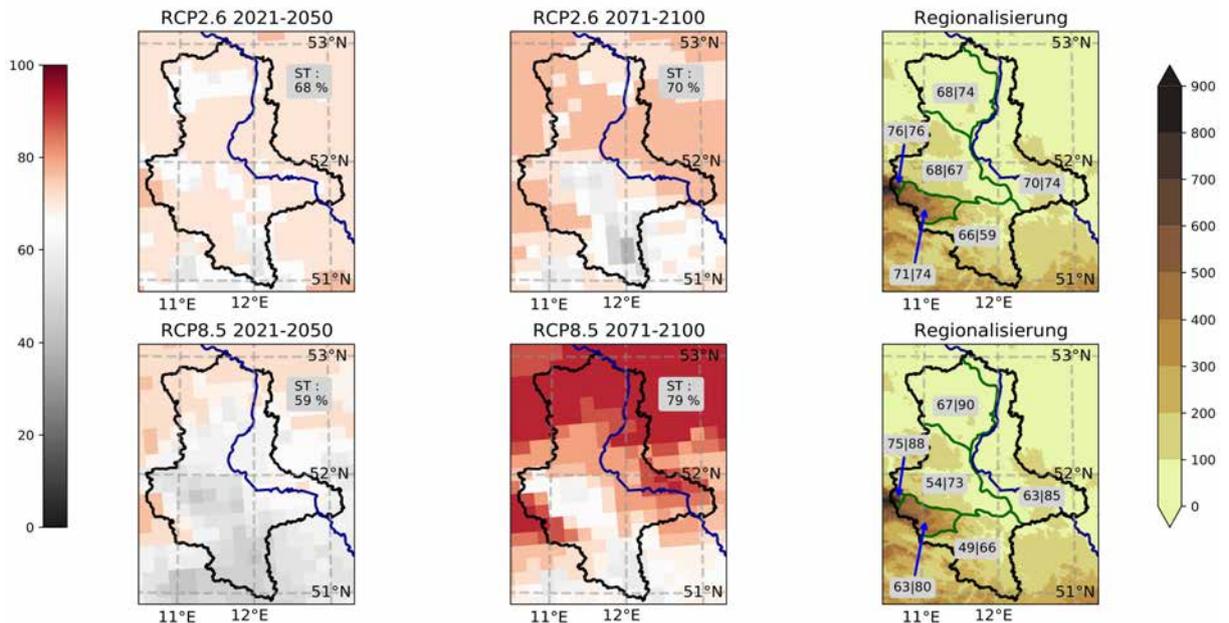


Abbildung 5.16: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die winterliche KWB. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Die regionale Verteilung der Robustheit der Änderungssignale der KWB des Referenzensembles im Sommer zeigt das gegenteilige Bild des Winters. Zunächst sind alle Änderungssignale der beiden Zeiträume und Szenarien als robust einzustufen, außer im Oberharz. Für die nahe Zukunft weist das RCP2.6 mit 90 % und für die ferne Zukunft das

RCP8.5 mit 92 % besonders hohe Anteile robuster Änderungssignale auf. Im RCP2.6 ist die regionale Verteilung außerhalb des Oberharzes relativ einheitlich. Für Projektionen des RCP8.5 ist der Anteil der robusten Änderungssignale im Süden von Sachsen-Anhalt bis zu 10 % höher als im Landesmittel (Abb. 5.17). Insgesamt können die Änderungssignale der KWB im Sommer aufgrund der konstruktiven Überlagerung von zunehmender Verdunstung durch zunehmende Temperaturen und Solarstrahlung sowie abnehmende Niederschlagsmengen als sehr robust eingeschätzt werden.

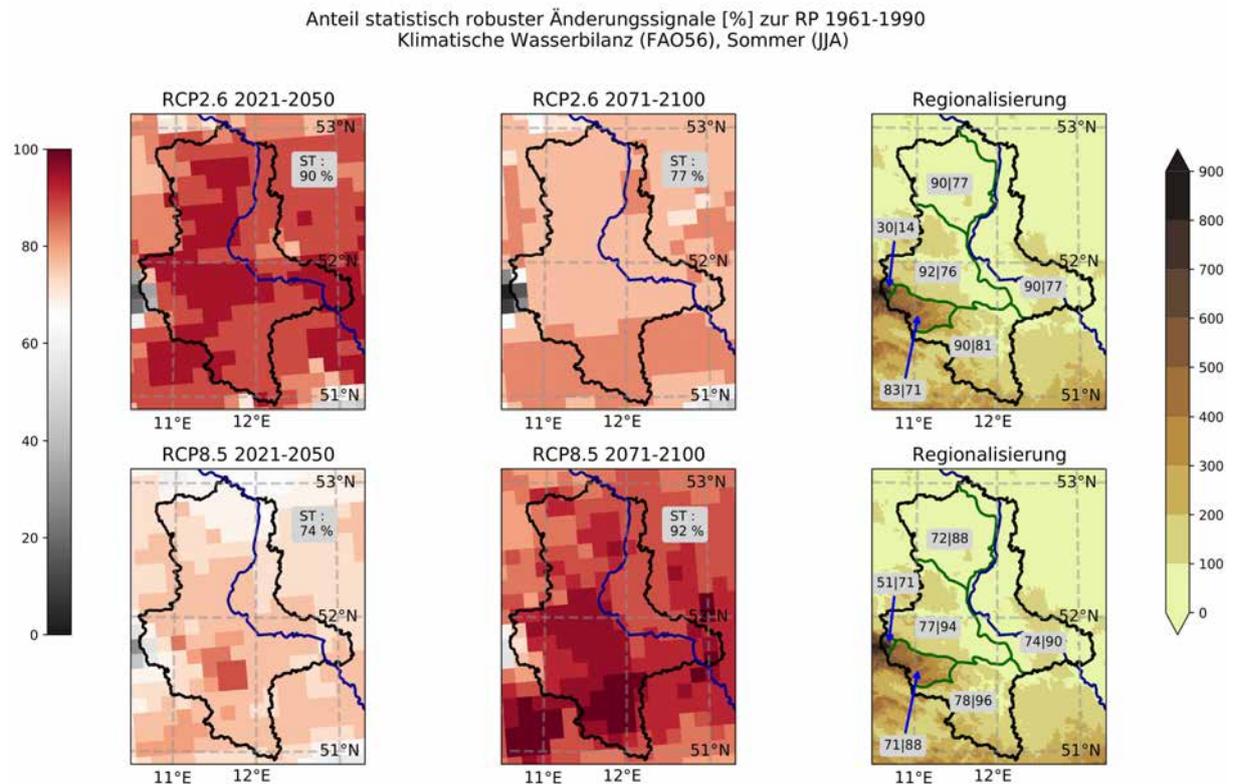


Abbildung 5.17: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die sommerliche KWB. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

5.2.4 Weitere Klimakenngößen

Die Änderungssignale von Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Bei der Betrachtung der Windgeschwindigkeit ist offensichtlich, dass die Änderungssignale im RCP2.6 weder im Sommer noch im Winter robust sind (Abb. 5.18, 5.19). Die Projektionen des RCP8.5 zeigen Änderungssignale, die in der nahen Zukunft nicht robust sind, während die Änderungssignale in der fernen Zukunft sowohl im Winter als auch im Sommer robust sind. Bezüglich der regionalen Verteilung des Anteils der Projektionen, die die Kriterien für Robustheit erfüllen, ergeben sich kaum regionale Unterschiede. Jedoch fällt eine Region um Halle an der Saale auf, die für die winterlichen Windgeschwindigkeiten im RCP8.5 einen geringeren Anteil an robusten Projektionen aufweist als in der Umgebung (Abb. 5.18). Die Detailbetrachtung der einzelnen Projektionen liefert dabei keinen Aufschluss, ob diese Besonderheit durch die Modellkonfiguration eines bestimmten Modells verursacht wird.

Anteil statistisch robuster Änderungssignale [%] zur RP 1961-1990
Winterliches (DJF) Mittel der Windgeschwindigkeit

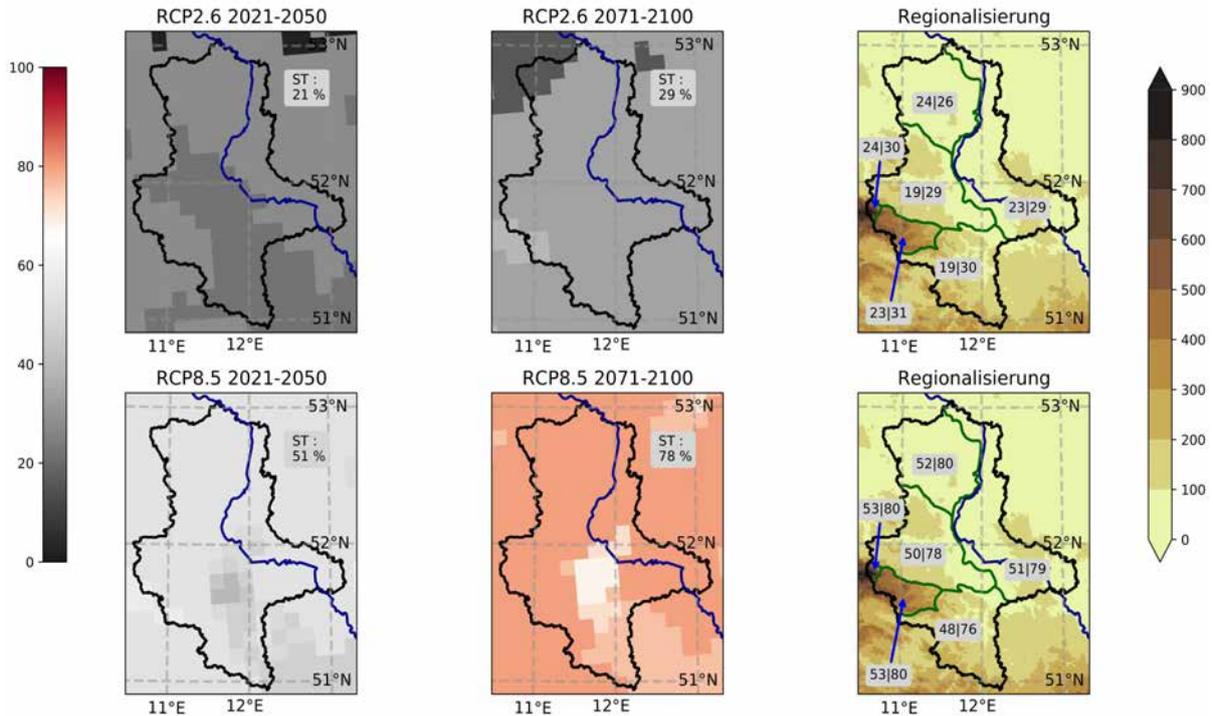


Abbildung 5.18: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Anteil statistisch robuster Änderungssignale [%] zur RP 1961-1990
Sommerliches (JJA) Mittel der Windgeschwindigkeit

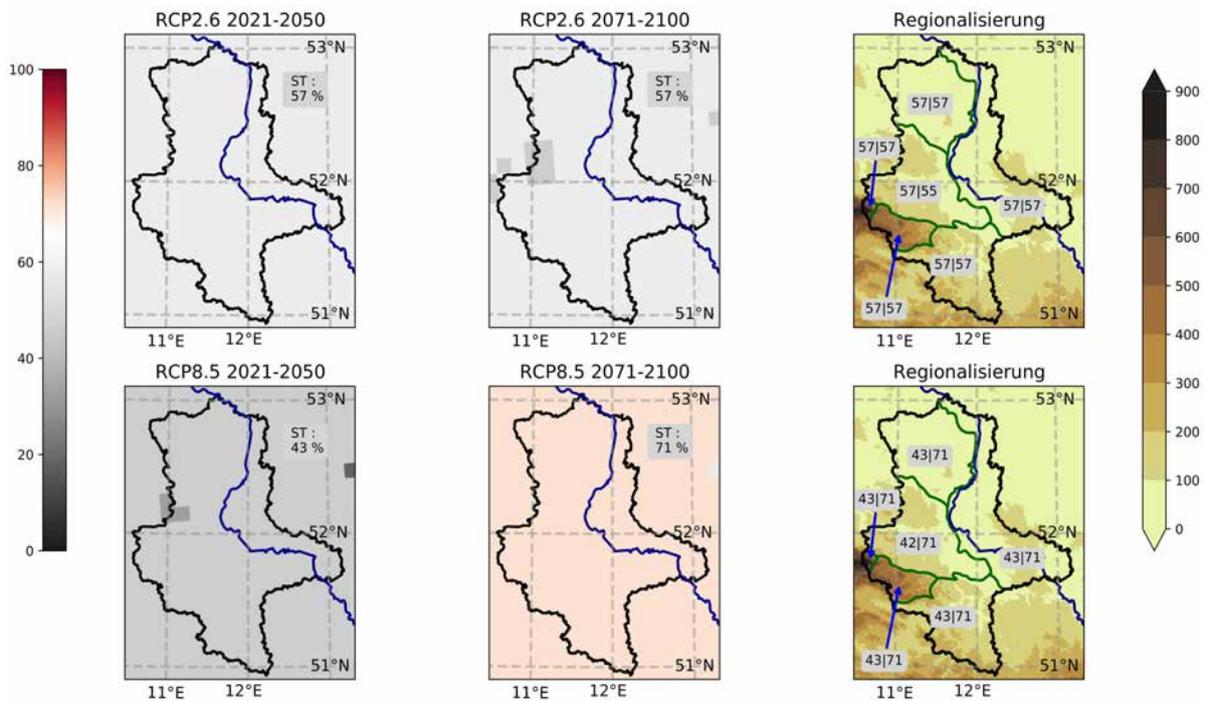


Abbildung 5.19: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Windgeschwindigkeit im Sommer. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Abbildungen 5.20 und 5.21 zeigen die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für die winterliche und sommerliche mittlere Solarstrahlung. Im Winter tritt kein robustes Änderungssignal auf, während im Sommer sowohl RCP2.6 als auch RCP8.5 in beiden Zukunftsperioden robuste Änderungssignale aufweisen. Tendenziell nimmt dabei der Anteil der Projektionen, die die Robustheitskriterien erfüllen, von Norden nach Süden zu. In beiden Szenarien müssen also die Bewölkungsdichte ab- und die Sonnenscheindauer zunehmen. Dies dürfte durch Veränderungen der Zirkulation und vermutlich eine Zunahme an ruhigen Hochdruckwetterlagen im Sommer verursacht werden. Diese Vermutung lässt sich in diesem Projekt nicht final bestätigen, jedoch ist die Tatsache, dass auch für die sommerliche mittlere Windgeschwindigkeit eine robuste Abnahme zu verzeichnen ist ein Hinweis auf die Zunahme windarmer Hochdrucklagen.

Insgesamt kann aus diesen Robustheitsbetrachtungen geschlussfolgert werden, dass das Potenzial für die Energieausbeute von solarbetriebenen Energieträgern wahrscheinlich zunehmen wird. Die Betrachtung der mittleren Windgeschwindigkeit hingegen ist nicht geeignet, Aussagen über Energieerträge oder Sturmgefahren zu treffen. Jedoch besteht die Vermutung, dass im RCP8.5 in der fernen Zukunft die Gefahr stärkere Sturmereignisse im Winter zunehmen könnte, auch wenn für diese Vermutung in diesem Projekt keine weiteren Belege hervorgebracht werden können. Zudem zeigt die robuste Zunahme der Solarstrahlung und Abnahme der Windgeschwindigkeit im Sommer, dass wahrscheinlich hochdruckgeprägte, ruhige Wetterlagen zunehmen werden, insbesondere unter den Voraussetzungen des RCP8.5. Die robusten Änderungen der Windgeschwindigkeit im RCP8.5 im Sommer und Winter zeigen, dass sich Eigenschaften und/oder die Häufigkeitsverteilung des Auftretens von typischen Wetterlagen ändern dürften.

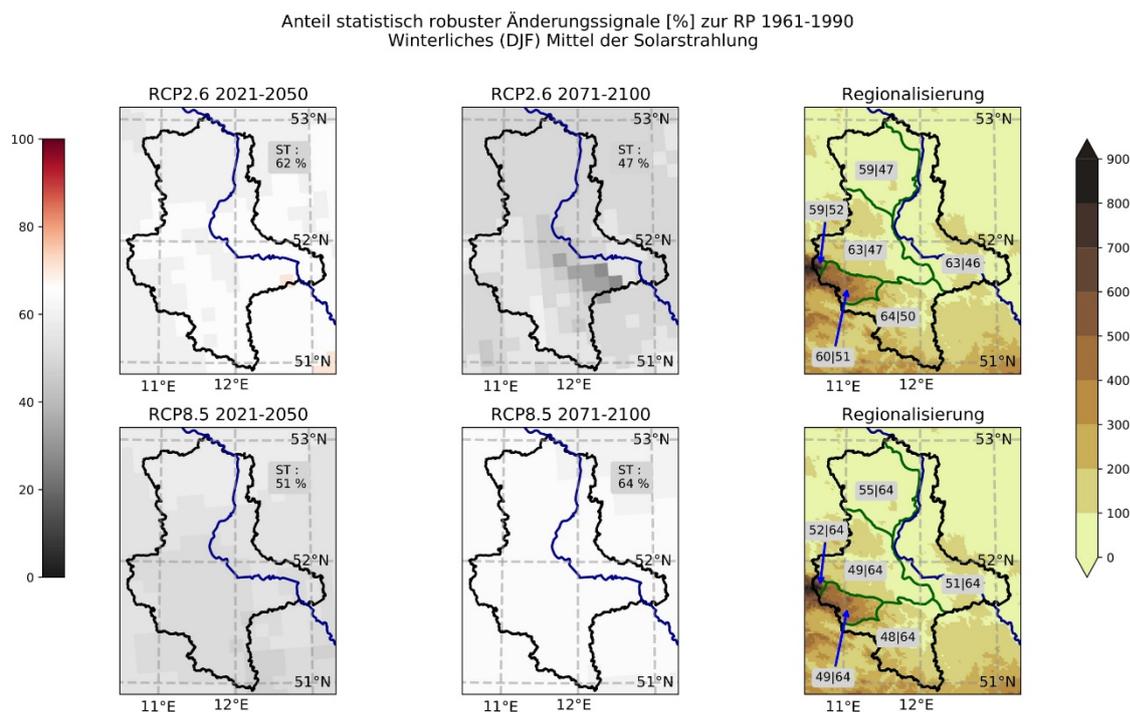


Abbildung 5.20: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Solarstrahlung im Winter. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

Anteil statistisch robuster Änderungssignale [%] zur RP 1961-1990
Sommerliches (JJA) Mittel der Solarstrahlung

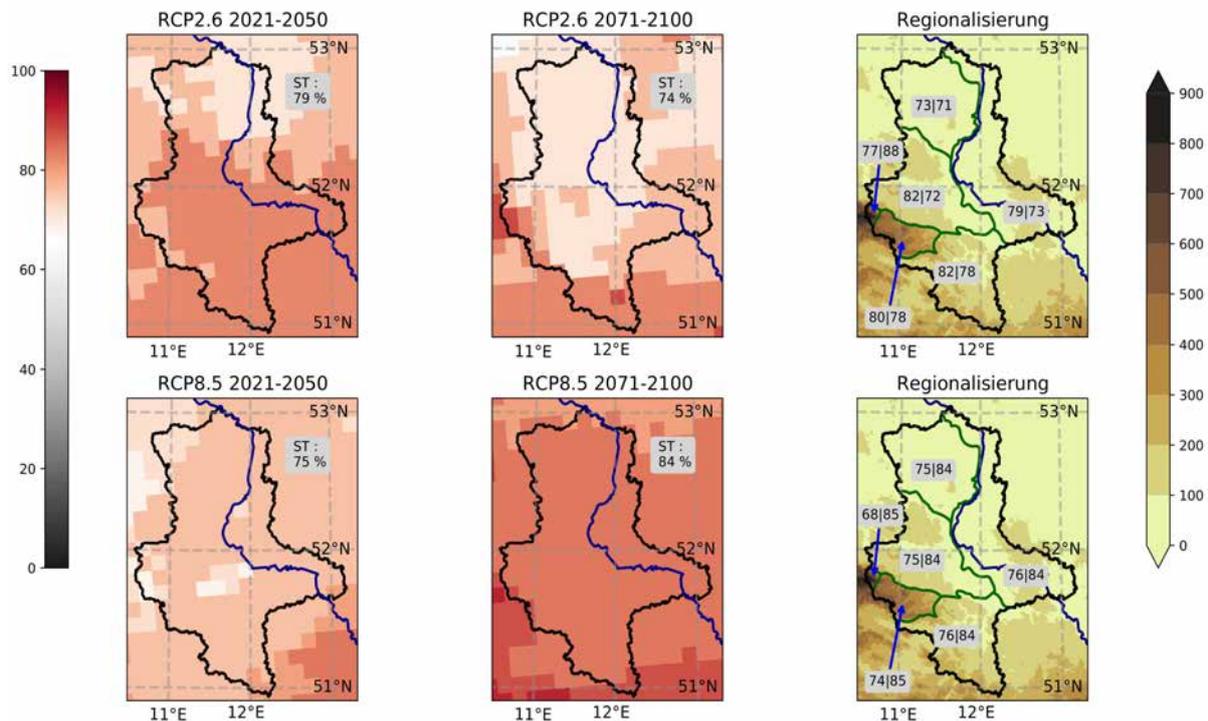


Abbildung 5.21: Ergebnis der Robustheitsbetrachtung für die mittlere Solarstrahlung im Sommer. Robust sind projizierte Klimaindikatoren dann, wenn mindestens 66 % der Änderungssignale das Robustheitskriterium erfüllen.

5.3 Zusammenfassung

Die Betrachtung von Signifikanz und Robustheit dient dazu, die Änderungssignale auf Konsistenz innerhalb des Referenzensembles zu bewerten und die Sicherheit der Aussagen über die Änderungssignale in Bezug auf die Abgrenzung von natürlicher Variabilität und den Auswirkungen anthropogener Aktivitäten bewerten zu können. Bezüglich der in diesem Projekt betrachteten Klimakenngrößen können alle Variablen in der Parameterfamilie Temperatur als robust bezeichnet werden mit Anteilen statistisch signifikanter Änderungssignale von generell über 90 %. Die Änderungen durch den menschengemachten Klimawandel sind deutlich größer als durch natürliche Variabilität zu erklären wäre. Im Umfeld des Parameters Niederschlag schlägt sich die große natürliche Bandbreite des Klimas in Sachsen-Anhalt nieder und zeigt sich in geringeren Anteilen statistisch signifikanter Änderungssignale. Die saisonale Betrachtung bestätigt, dass im RCP8.5 größere Änderungen zu erwarten sind als im RCP2.6 und diese mit der Zeit auch einen höheren Grad an Robustheit erlangen. Im Winter besteht eine Tendenz zu höheren Niederschlagsmengen, die auch robust ist. Aufgrund der großen Schwankungsbreite und gegensätzlicher Vorzeichen der Änderungssignale innerhalb des Referenzensembles, sind die Änderungssignale des sommerlichen Niederschlags weniger robust. Die Tendenzen für das RCP2.6 und die Projektionen des RCP8.5 in der nahen Zukunft zeigen keine robusten Änderungen, jedoch liegen der Tendenz der Abnahme der Sommerniederschläge in der fernen Zukunft in beiden Klimaszenarien robuste Änderungssignale des Referenzensembles zugrunde. Die Auswirkungen der Änderungen von Temperatur und Niederschlag auf die KWB resultiert in einer robusten Abnahme der KWB im Sommer, welche im Süden des Landes stärker ausgeprägt ist als im Norden. Im Winter zeigen die Änderungssignale im Norden des Landes

und in den Mittelgebirgen eine robuste Zunahme der KWB, während die Änderungssignale im unmittelbaren Regenschatten des Harzes nicht robust sind. Das Änderungssignal der jährlichen KWB ist nicht robust, jedoch nimmt das Defizit der KWB in der Wachstumsperiode der Vegetation deutlich zu. Die Änderung der Solarstrahlung ist im Sommer als robust anzusehen. Aus diesen Änderungen kann der Schluss gezogen werden, dass im Zuge der Erwärmung eine Änderung der Zirkulationsmuster erfolgen wird, die höhere Sonnenscheindauern bewirken wird. Wie genau diese zukünftigen Zirkulationsmuster aussehen und welche möglichen weiteren Auswirkungen dies auf das Klima in Sachsen-Anhalt haben könnte, kann nur mit weitergehenden Untersuchungen festgestellt werden. Die Abnahme der sommerlichen und Zunahme der winterlichen Windgeschwindigkeit ist in der fernZ des RCP8.5 zwar jeweils gering, jedoch innerhalb der Projektionen für dieses Szenario und den fernen Zukunftszeitraum konsistent und wird als robust eingeschätzt, während dies für die nahZ und das RCP2.6 aufgrund der geringen um den Wert 0 gestreuten Änderungssignale nicht der Fall ist.

6 Ensemblevergleich

Die bereits beschriebene Reduktionsmethode in (Dalelane, Früh, Steger, & Walter, 2018) hat zur Auswahl einiger Projektionen aus dem Referenzensemble geführt, die als Kernensemble bezeichnet werden. Dabei liegt der Fokus der Methode darauf, die Anzahl der Projektionen soweit zu verringern, dass die Bandbreite des Referenzensembles bei Indikatoren zu Niederschlag und Temperatur möglichst weitreichend erhalten bleibt. Die Reduktion von 25 bzw. 17 auf nur noch 7 Projektionen hat zum Zweck, die notwendigen Ressourcen zur Klima- und Wirkmodellierung einzusparen, ohne erhebliche Verluste in der Qualität und der Treffsicherheit der Aussagen hinnehmen zu müssen. Dass die Datenbasis durch dieses Vorgehen verringert wird und damit die statistische Aussagekraft wie z.B. die Ermittlung des wahrscheinlichen Bereichs, des Mittelwertes und der starken und schwachen Wandel, leidet, wird somit ebenfalls in Kauf genommen. Für den Vergleich der Referenz- und Kernensemble gibt es keine einheitliche, objektivierte Methode, weshalb in diesem Projekt eine Vergleichsmethode entwickelt wurde. Diese Methode vergleicht zunächst die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für ausgewählte Indikatoren für beide Ensembles. Falls die Ergebnisse dieser Betrachtung zwischen beiden Ensembles übereinstimmen, wird in diesem Kriterium für die ausgewählten Klimakenngrößen eine Vergleichbarkeit angenommen. Im zweiten Schritt des Vergleichs, wird festgestellt, ob das Kernensemble zwei wesentlich Kriterien bezüglich der statistischen Auswertung erfüllt:

1. Die gesamte Bandbreite der Änderungssignale im Kernensemble hüllt sowohl den schwachen Wandel (15. Perzentil) als auch den starken Wandel (85. Perzentil) des Referenzensembles ein.
2. Die wahrscheinliche Bandbreite (66 % um den Median) des Kernensembles hüllt sowohl Median als auch Mittelwert des Referenzensembles ein.

Wenn das Kernensemble diese Kriterien für eine große Mehrheit der ausgewählten Indikatoren und die besonders relevanten Indikatoren erfüllt, kann grundsätzlich von einer Gleichwertigkeit ausgegangen werden. Bestehen jedoch wesentliche Unterschiede zwischen Referenz- und Kernensemble ist grundsätzlich weiterhin die Anwendung des Referenzensembles zu empfehlen.

6.1 Temperatur

Wie bereits bei der Betrachtung von Signifikanz und Robustheit gezeigt, sind die Klimakenngrößen im Umfeld der Temperatur sehr eindeutig durch das Referenzensemble beschrieben und alle Projektionen stimmen in ihren grundsätzlichen Ergebnissen zum Anstieg der Temperatur überein. Die Gegenüberstellung von Referenzensemble und Kernensemble wird für verschiedene Kenngrößen durchgeführt und deren Robustheitsbetrachtung verglichen. Dafür wurden vor allem Kenngrößen ausgewählt, die nicht direkt die Basis der Reduktionsmethode darstellen und für die Bewertung von Klimaeinflüssen wie z.B. Hitzebelastung besonders relevant sind. Wie in Tabelle 6.1 zu erkennen ist, stimmen die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für diese Kenngrößen gut überein.

Tabelle 6.14: Auflistung der Anteile in % robuster Änderungssignale im Referenzensemble (normale Schrift) und Kernensemble (kursive Schrift) für ausgewählte Indikatoren im Parameterumfeld Temperatur. Für alle Änderungssignale, bei denen Kern- und Referenzensemble nicht das gleiche Ergebnis der Robustheitsbetrachtung aufweisen, sind die Werte in roter Schrift gekennzeichnet.

Variable	RCP2.6				RCP8.5			
	nahZ		fernZ		nahZ		fernZ	
	RCP2.6				RCP8.5			
	Ref.	Kern	Ref.	Kern	Ref.	Kern	Ref.	Kern
T _{mit}	100	100	100	100	100	100	100	100
Heatind.>39 °C	56	57	57	60	60	59	95	94
Hitzeper.	33	36	39	41	48	43	90	90
Heizgradt.	100	100	100	100	100	100	100	100
Max. T _{max}	100	100	100	100	92	86	100	100
Max. T _{min}	100	100	100	100	93	86	100	100
P99 T _{max}	100	100	100	100	92	86	100	100
P99 T _{min}	100	100	100	100	93	86	100	100
P01 T _{max}	100	100	100	100	92	86	100	100
P01 T _{min}	100	100	100	100	93	86	100	100
Min. T _{max}	100	100	100	100	100	100	100	100
Min. T _{min}	100	100	98	100	100	100	100	100

In den Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.3 sind die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen zum Ensemblevergleich abgebildet. Das Referenzensemble (Kernens.) ist in roter (blauer) Farbe links in den Einzelabbildungen dargestellt. Der dunkelrote Bereich steht dabei für die Schwankungsbreite zwischen schwachem Wandel und starkem Wandel (15. und 85. Perzentil). Die weiße (schwarze) Linie markiert den Mittelwert (Median) des Referenzensembles. Der dunkelblaue Bereich umfasst den wahrscheinlichen Änderungsbereich des Kernensembles. Für die jährliche Mitteltemperatur sind alle Vergleichskriterien erfüllt. Dies ist nicht der Fall für das Änderungssignal der starken Hitzebelastung. Im RCP2.6 sowie in der fernZ im RCP8.5 umschließt der wahrscheinliche Bereich des Kernensembles nicht den jeweiligen Mittelwert (weiß in Abb. 6.1) und Median (schwarz in Abb. 6.1). In der fernZ im RCP2.6 umschließt die Bandbreite des Kernensembles ebenfalls nicht den starken und schwachen Wandel des Referenzensembles und die Abdeckung ist mit 61 % auch sehr gering. Der Ensemblevergleich für die Änderung der Anzahl der Tage in Hitzeperioden zeigt für das RCP2.6 in der nahen und das RCP8.5 in der fernen Zukunft Schwächen, da Median und Mittelwert des Referenzensembles nicht beide im wahrscheinlichen Bereich der Bandbreite des Kernensembles enthalten sind. Im RCP8.5 ist zusätzlich das Kriterium (1) nicht erfüllt in der fernZ. Das Kriterium (2) zur Umfassung des Median und des Mittelwertes des Referenzensembles ist für die Änderung der Heizgradtage in keinem Szenario und keiner Zukunftsperiode durch den wahrscheinlichen Bereich des Kernensembles abgedeckt (Abb. 6.1). Das Kernensemble zeigt einen deutlichen negativen Bias für diesen Parameter auf, also erheblich stärkere Änderungssignale als das Referenzensemble.

Interessant ist, dass das Kernensemble sowohl eine geringere Hitzebelastung projiziert als auch eine größere Reduktion der Aufwendungen für Heizenergie. Dies bedeutet, dass im

Kernensemble die Tendenz zu stärkerer Erwärmung des Sommers weniger ausgeprägt und im Gegenzug eine stärkere Erwärmung im Winter als im Referenzensemble projiziert wird.

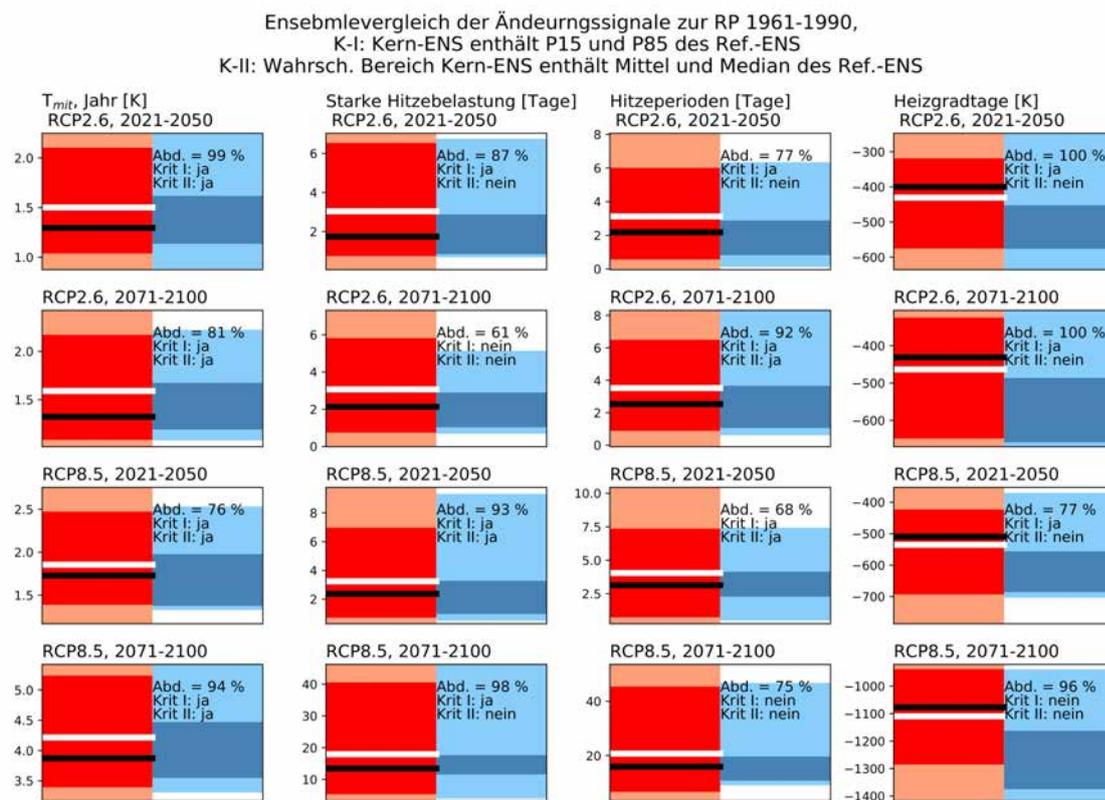


Abbildung 6.1: Ergebnis des Ensemblevergleichs für verschiedene Änderungssignale von Temperaturkenngrößen. V.l.n.r.: Jährliches T_{mit} , Anzahl Tage mit starker Hitzebelastung (NOAA-Hitzeindex > 39 °C, Anzahl an Tagen in Hitzeperioden mit mindestens 5 Hitzetagen sowie Heizgradtagen.

Der Ensemblevergleich für die Änderungen der oberen Extremwerte wie des durchschnittlichen maximalen T_{min} und T_{max} sowie des 99. Perzentils sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Nur vereinzelt wie für das durchschnittliche maximale T_{max} sowie dessen 99. Perzentil in der nahZ des RCP8.5 und der durchschnittlichen maximalen T_{min} in der fernZ des RCP2.6 werden die Vergleichskriterien nicht eingehalten. Dabei wird für diese Indikatoren das erste Kriterium zur Umfassung des starken und schwachen Wandels des Referenzensembles verfehlt, was gleichbedeutend ist mit einer zu geringen Abdeckung der Bandbreite. In allen Fällen ist das untere Ende der Bandbreite nicht im Kernensemble abgebildet.

Ensemblevergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

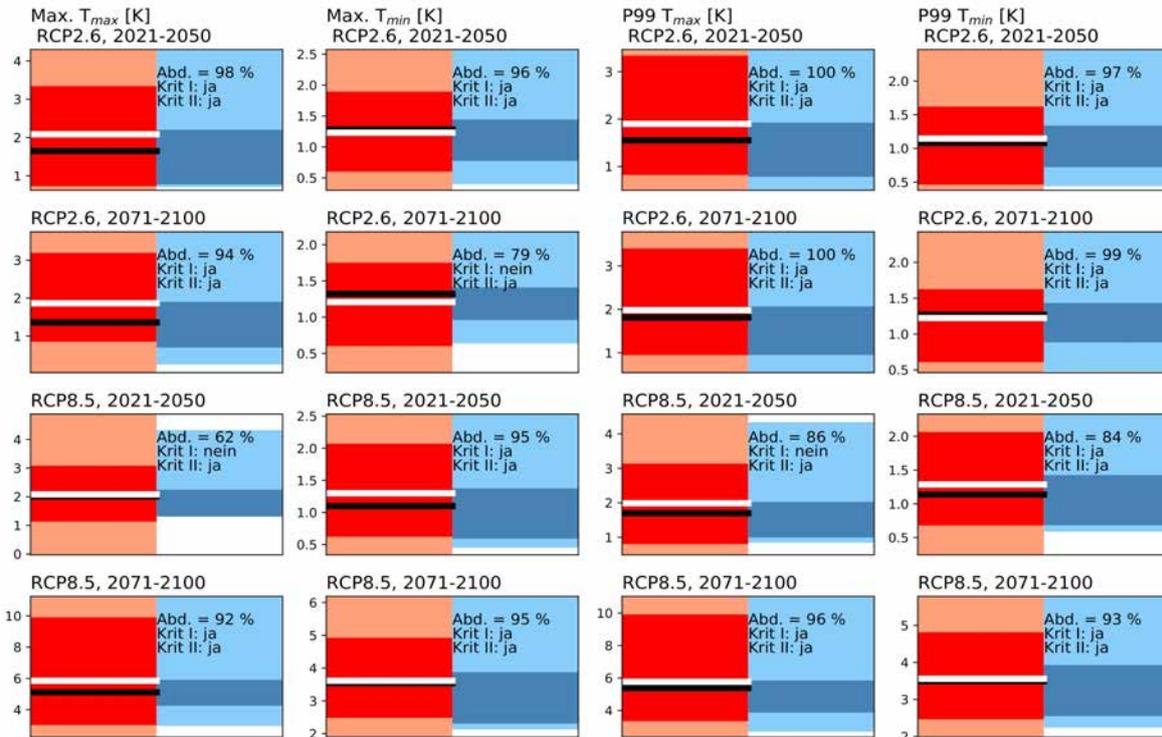


Abbildung 6.2: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von weiteren Temperaturkenngrößen, v. l. n. r.: Durchschnittliches jährliches Maximum T_{max} , T_{min} und 99. Perzentil T_{max} , T_{min} .

Ensemblevergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

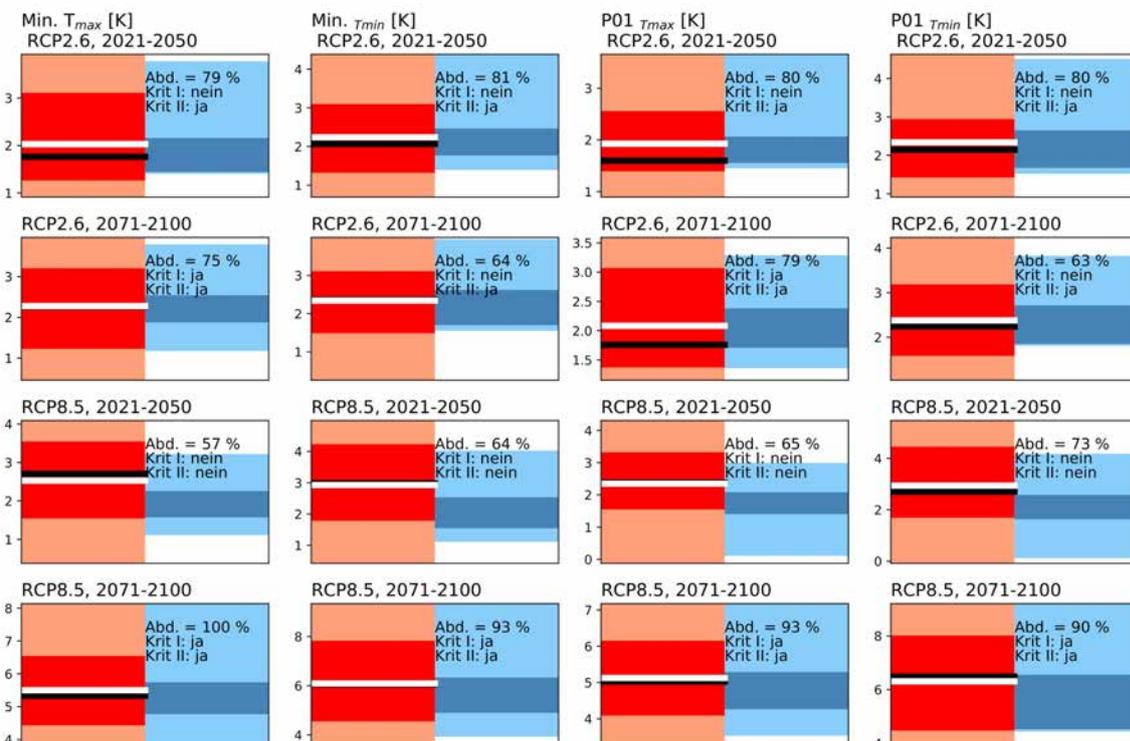


Abbildung 6.3: Wie Abbildung 6.2, für Änderungssignale von weiteren Temperaturkenngrößen, v.l.n.r.: Durchschnittliches jährliches Minimum T_{max} , T_{min} und 1. Perzentil T_{max} , T_{min} .

In Abbildung 6.3 sind die Ergebnisse des Ensemblevergleichs für die Änderungen der unteren Extremwerte des Temperaturspektrums abgebildet. Für die nahe Zukunft kann in beiden Szenarien die Bandbreite des Referenzensembles nicht hinreichend durch das Kernensemble abgebildet werden, während dies für die Änderungssignale in der fernen Zukunft besser gelingt. Auch hier wird durch das Kernensemble der untere Rand der Änderungssignale in der nahen Zukunft nicht hinreichend abgebildet. Ein Bias kann aufgrund der Tatsache, dass Mittelwert und Median der Änderungssignale des Referenzensembles immer im wahrscheinlichen Bereich des Kernensembles enthalten sind, nicht abgeleitet werden.

Der Vergleich von Kern- und Referenzensemble für das Klimaelement Temperatur fällt insgesamt positiv aus für die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung. Bei genauer Betrachtung des Spektrums der Änderungssignale fällt jedoch auf, dass insbesondere für die tiefen Extremwerte der Temperatur in der nahen Zukunft das untere Ende des Spektrums der Änderungssignale nicht hinreichend abgebildet wird. Die Änderungssignale für die Hitzebelastung und die Anzahl und Dauer der Hitzeperioden wird nicht hinreichend abgebildet. Es ist ein negativer Bias des Kernensembles, also schwächere Zunahme der Hitzebelastung als im Referenzensemble, erkennbar. Ein negativer Bias ist auch für die Heizgradtage erkennbar, was bedeutet, dass der Energiebedarf für das Heizen durch das Kernensemble möglicherweise unterschätzt wird.

6.2 Niederschlag

Die Änderung des Klimaelements Niederschlag ist grundsätzlich weniger robust als dies für die Temperaturkenngrößen der Fall ist. Dies dürfte durch unterschiedliche Mechanismen und Änderungen der Zirkulation zu erklären sein, welche jedoch in diesem Projekt nicht eingehend betrachtet werden können, aber ein Erklärungsansatz für die Ursache der großen Divergenz der Änderungssignale der Kenngrößen im Themenfeld Niederschlag sind. Wie anhand der roten Schrift in Tabelle 6.15 erkennbar ist, stimmen die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für einige Kenngrößen nicht überein zwischen Kern- und Referenzensemble. Dies trifft zu auf das Änderungssignal der winterlichen Niederschlagsmengen im RCP2.6 in der fernZ, in der sich für das Kernensemble keine robuste Änderung feststellen lässt. Auch für die Änderung der sommerlichen Niederschlagsmenge im RCP2.6 unterschieden sich die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für das Kernensemble und das Referenzensemble. Die Änderung der sommerlichen KWB ist in der nahen Zukunft im RCP8.5 nicht robust im Kernensemble, während das Referenzensemble ein robustes Änderungssignal aufweist. Weiterhin sind, wenn auch nur knapp, die Bewertungen der Robustheit für Indikatoren zum Starkregen und Trockenperioden in der fernen Zukunft im RCP8.5 robust im Kernensemble, aber nicht für das Referenzensemble.

Tabelle 6.15: Auflistung der Anteile in % robuster Änderungssignale im Referenzensemble (normale Schrift) und Kernensemble (kursive Schrift) für ausgewählte Indikatoren im Parameterumfeld Niederschlag. Für alle Änderungssignale, bei denen Kern- und Referenzensemble nicht das gleiche Ergebnis der Robustheitsbetrachtung aufweisen, sind die Werte in roter Schrift gekennzeichnet.

Variable	RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5	
	nahZ	fernZ	nahZ	fernZ	nahZ	fernZ	nahZ	fernZ
	Ref.	Kern	Ref.	Kern	Ref.	Kern	Ref.	Kern
P_{Jahr}	53	43	40	40	56	41	50	57
P_{Winter}	82	86	76	57	84	80	97	94
P_{Sommer}	64	76	66	64	69	73	80	71
KWB_{Jahr}	42	46	54	50	51	50	65	56
KWB_{Winter}	68	69	70	68	59	43	79	72
KWB_{Sommer}	90	83	77	73	74	58	92	91
$P_{5d,max}$	47	61	48	58	54	63	60	68
Tage $P > 10$ mm	41	49	36	38	53	61	65	70
6+d $P \geq 1$ mm	50	53	55	57	44	41	40	46
Tage $P < 1$ mm	59	56	55	63	53	44	40	38
10+d $P < 1$ mm	62	62	60	64	61	54	61	71
RR95	62	62	60	64	61	54	61	71

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse des zweiten Schrittes des Ensemblevergleiches dargestellt für die jährlichen und saisonalen Niederschlagsmengen sowie die durchschnittliche maximale jährliche 5-Tagessumme des Niederschlages. Es ist erkennbar, dass bei letzterem Parameter die Abdeckung des Referenzensembles durch das Kernensemble teilweise deutlich unter 70 % liegt. In den meisten Fällen wird das zweite Kriterium zur Erfassung der Mittel- und Medianwerte durch den wahrscheinlichen Bereich des Kernensembles nicht erfüllt, für die Niederschlagssummen ergibt sich ein gewisser negatives Bias des Kernensembles gegenüber dem Referenzensemble. Am besten ist die Übereinstimmung der Bandbreiten für den Zeitraum 2071-2100 im RCP8.5. Für das RCP2.6 hingegen, kann das Kernensemble die Bandbreite des Referenzensembles für die Niederschlagssummen nicht hinreichend wiedergeben.

Ensemblevergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

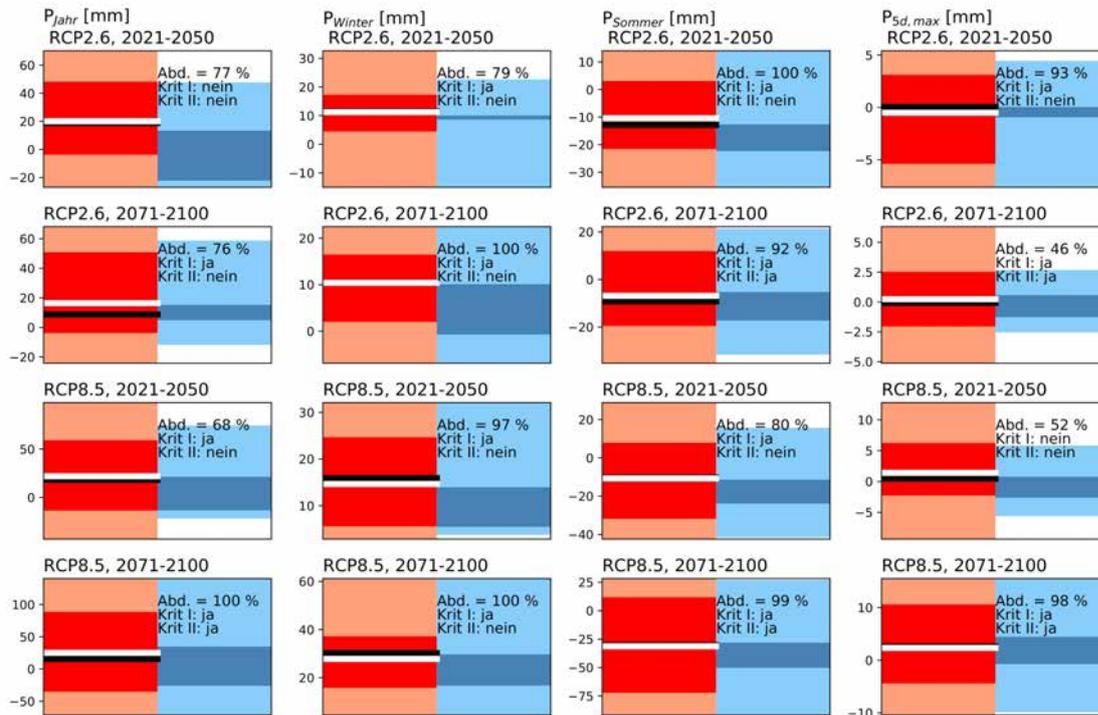


Abbildung 6.4: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen, v.l.n.r.: Niederschlagssummen von Jahr, Winter und Sommer sowie durchschn. jährliche maximale 5-Tages Niederschlagssumme.

Für die KWB des Gesamtjahres werden die Kriterien für die Vergleichbarkeit der beiden Ensembles nicht erfüllt. Für die meisten Projektionszeiträume und -szenarien umfasst das Kernensemble nicht den Median und Mittelwert des Referenzensembles (Abb. 6.5). In der fernZ des RCP2.6 ist dieses Kriterium zwar erfüllt, jedoch wird der untere Rand der Änderungssignale der KWB nicht hinreichend repräsentiert. Die mangelhafte Übereinstimmung speist sich aus den Unstimmigkeiten zur jahreszeitlichen Verteilung der Änderungssignale der KWB zwischen Referenzensemble und Kernensemble. Die Änderungssignale der winterlichen KWB werden vom Kernensemble nicht hinreichend abgebildet. Interessant ist, dass die Bündelung der Änderungssignale im RCP2.6 in der nahen Zukunft sehr eng ist. Die Änderungssignale der sommerlichen KWB werden in Bezug auf die Abdeckung der Bandbreite des Referenzensembles gut durch das Kernensemble abgebildet, jedoch liegt der wahrscheinliche Bereich der Änderung der KWB im Kernensemble zumeist unterhalb der Median- und Mittelwerte des Referenzensembles (Abb. 6.5). Daran wird erneut sichtbar, dass die Verwendung des Kernensembles unter Umständen zu systematischen Unterschieden zur Verwendung des Referenzensembles führen könnte. Für die Anzahl der Tage mit mindestens 10 mm Tagesniederschlag werden die Kriterien zu den Bandbreiten der Änderungssignale durch das Kernensemble erfüllt, jedoch kommt wie bereits oben beschrieben die Robustheitsbetrachtung für das RCP8.5 in der fernen Zukunft zu einem jeweils gegenteiligen Ergebnis.

Ensemblevergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

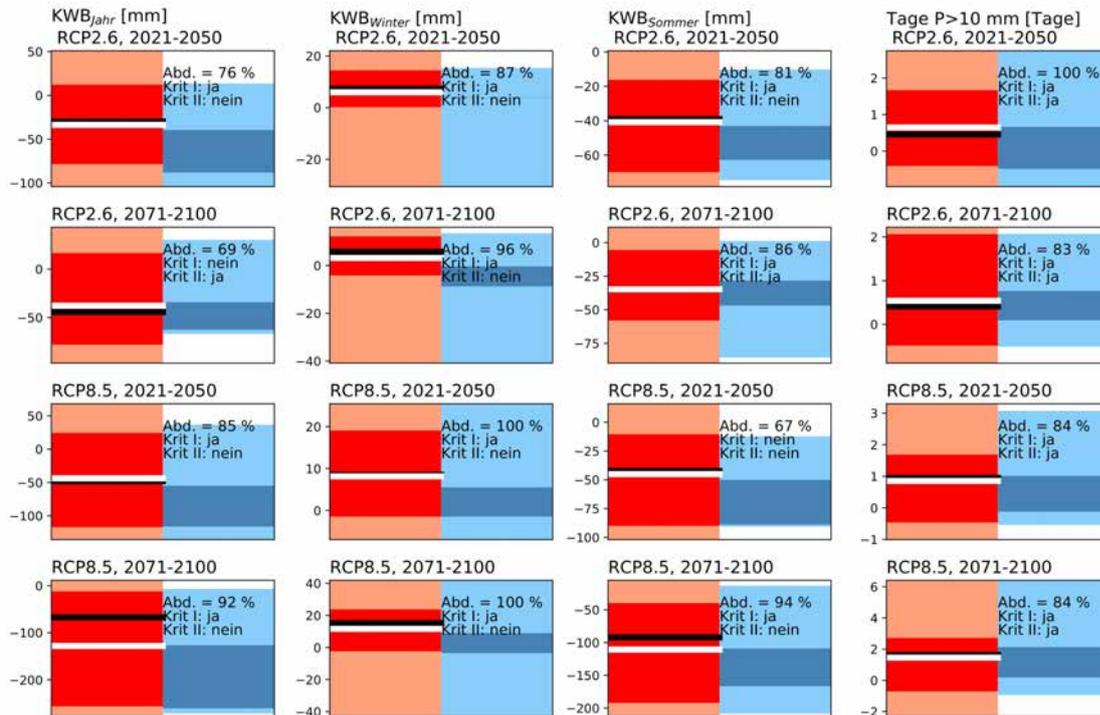


Abbildung 6.5: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen, v.l.n.r.: KWB von Jahr, Winter und Sommer sowie Anzahl von Tagen mit P > 10 mm.

Für die Abbildung 6.6 gezeigten Parameter zur Bewertung von Trockenperioden und Starkregeneignissen, zeigt die Auswertung der Bandbreiten der Änderungssignale, dass in mindestens einem Projektionszeitraum und Szenario die Kriterien für die Vergleichbarkeit nicht erfüllt werden. Bei der Anzahl der längeren Regenperioden ist ein leichter negativer Bias auszumachen und die Abdeckung des Referenzensembles im RCP2.6 und in der nahZ des RCP8.5 mit maximal 73 % nicht ausreichend. Für die Anzahl der Trockenperioden mit mindestens 10 trockenen Tagen mit $P < 1$ mm ist die Abdeckung der Änderungssignale im RCP2.6 in der nahZ nicht ausreichend und das untere Spektrum der Änderungssignale wird nicht hinreichend erfasst. Der gleiche Sachverhalt trifft auch auf die Anzahl der trockenen Tage insgesamt zu. Für das RR95 ist die Abdeckung der Bandbreite des Referenzensembles durch das Kernensemble hinreichend, jedoch ist der wahrscheinliche Bereich der Bandbreite derart eng, dass in der fernZ im RCP2.6 der Median des Referenzensembles nicht im wahrscheinlichen Bereich des Kernensembles enthalten ist.

Ensembelvergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

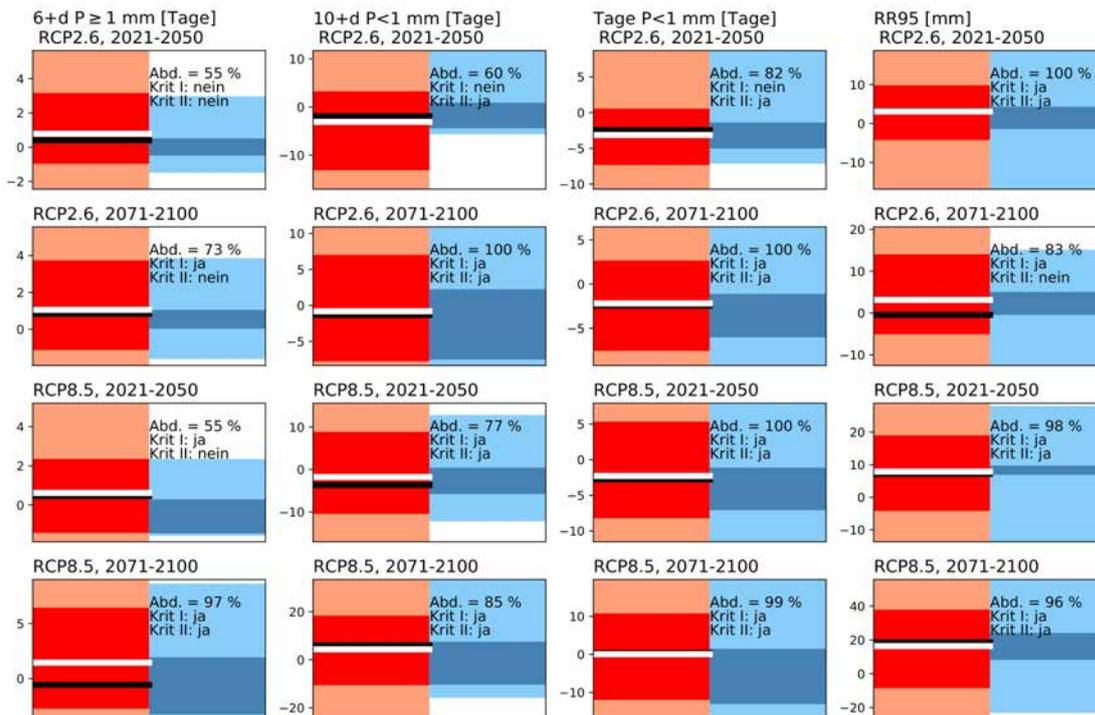


Abbildung 6.6: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale von Niederschlagskenngrößen, v.l.n.r.: Perioden mit mind. 6 Tagen $P \geq 1$ mm, mind. 10 Tagen $P < 1$ mm, Anzahl Tage mit $P < 1$ mm und Starke Niederschlagsmenge (RR95).

Für die Bewertung der Vergleichbarkeit der Referenz- und Kernensembles in Bezug auf Niederschlagsindikatoren fällt das Ergebnis weniger eindeutig aus als für die Temperatur. Bei den Niederschlagsmengen und der KWB ergeben sich besonders bei den Änderungssignalen im Sommer deutliche negative systematische Abweichungen des Kernensembles im Vergleich zum Referenzensemble. Unter Umständen ist dies in der großen Anzahl an Projektionen im Referenzensemble zu erklären, die mit GCM CCCma-CanESM2 angetrieben werden. Außerdem wird der obere Bereich des Spektrums der Änderungssignale der Niederschlagsmengen und KWB durch das Kernensemble weniger gut abgebildet. Bei den Indikatoren zum Themenfeld Starkregen und Trockenheit erfüllt das Kernensemble immer mindestens eines der zugrunde gelegten Kriterien für die Vergleichbarkeit.

6.3 Weitere Kenngrößen

Die Unterschiede der Robustheitsbetrachtung zwischen Kern- und Referenzensemble sind für die Parameter Wind und Solarstrahlung in Tabelle 6.16 dargestellt. Für die Betrachtung der Jahresmittel stimmen die Ergebnisse der Robustheitsbetrachtung für beide Ensemble überein, während dies für die Jahreszeiten Winter und Sommer nicht der Fall ist. Die winterliche Windgeschwindigkeit wird im RCP2.6 übereinstimmend als nicht robust bewertet, jedoch ergibt die Betrachtung der Robustheit im RCP8.5 in der nahen Zukunft ein robustes Änderungssignal für das Kernensemble, welches im Referenzensemble nicht als robust bewertet wird. Die Änderung der sommerlichen Windgeschwindigkeit ist grundsätzlich nicht robust, für das Kernensemble kommt die Betrachtung jedoch in der fernen Zukunft im RCP8.5 zum Ergebnis, dass ein robustes Änderungssignal vorliegt. Die Änderung der winterlichen Solarstrahlung ist im Kernensemble robust für die nahZ des RCP2.6 und die fernZ des RCP8.5, während diese Änderung nicht robust ist für das Referenzensemble. Die Änderung der sommerlichen Solarstrahlung ist nicht robust im Kernensemble für das RCP2.6 in der fernen Zukunft, während

diese Änderung für die sonstigen Perioden und Szenarien grundsätzlich in beiden Ensembles robust ist.

Tabelle 6.16: Auflistung der Anteile in % robuster Änderungssignale im Referenzensemble (normale Schrift) und Kernensemble (kursive Schrift) für ausgewählte Indikatoren im Parameterumfeld Wind und Strahlung. Für alle Änderungssignale, bei denen Kern- und Referenzensemble nicht das gleiche Ergebnis der Robustheitsbetrachtung aufweisen, sind die Werte in roter Schrift gekennzeichnet.

Variable	RCP2.6				RCP8.5			
	nahZ		fernZ		nahZ		fernZ	
	RCP2.6				RCP8.5			
	Ref.	Kern	Ref.	Kern	Ref.	Kern	Ref.	Kern
Wind (Jahr)	6	14	9	27	8	14	27	23
Wind (Winter)	21	14	29	22	51	68	78	82
Wind (Sommer)	29	57	41	57	52	43	64	71
Strahlung (Jahr)	52	57	46	57	53	59	56	58
Strahlung (Winter)	62	70	47	56	51	38	64	71
Strahlung (Sommer)	79	86	74	63	75	85	84	86

Für die jährliche, winterliche und sommerliche Windgeschwindigkeit ist das Ergebnis des Vergleichs der Bandbreiten der Änderungssignale zwischen Kern- und Referenzensemble in Abbildung 6.7 dargestellt. Für das Jahresmittel fällt ein im Betrag unbedeutender negativer Bias des Kernensembles auf, der obere Bereich des Spektrums der Änderungssignale wird nicht hinreichend dargestellt, was sich in entweder unzureichender Erfassung des starken Wandels oder der Median- und Mittelwerte des Referenzensembles zeigt. In Änderungssignalen für Sommer findet sich dieser Bias ebenfalls, insbesondere im Sommer.

Das Jahresmittel der mittleren Solarstrahlung erfüllt die Kriterien zu Vergleichbarkeit der Erfassung der Bandbreiten der Änderungssignale durch das Kernensemble (Abb. 6.8). Für Sommer und Winter ist dies im RCP8.5 immer noch der Fall, während im RCP2.6 teilweise das zweite Kriterium zur Erfassung von Median und Mittelwert nicht erfüllt wird.

In der Gesamtschau der Vergleiche zur Robustheit und Abdeckung der Änderungssignale kann sowohl für die mittlere Windgeschwindigkeit als auch die mittlere Solarstrahlung keine hinreichende Vergleichbarkeit von Kern- und Referenzensemble festgestellt werden.

Ensemblevergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

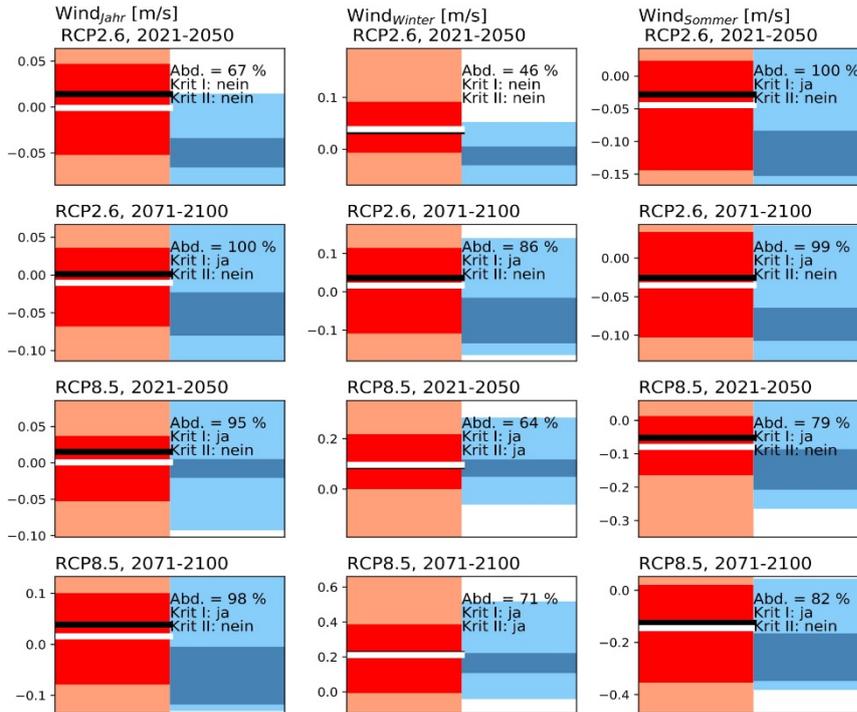


Abbildung 6.7: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale der Windgeschwindigkeit, v.l.n.r.: Durchschnittliche 10m-Windgeschwindigkeiten von Jahr, Winter und Sommer.

Ensemblevergleich der Änderungssignale zur RP 1961-1990,
 K-I: Kern-ENS enthält P15 und P85 des Ref.-ENS
 K-II: Wahrsch. Bereich Kern-ENS enthält Mittel und Median des Ref.-ENS

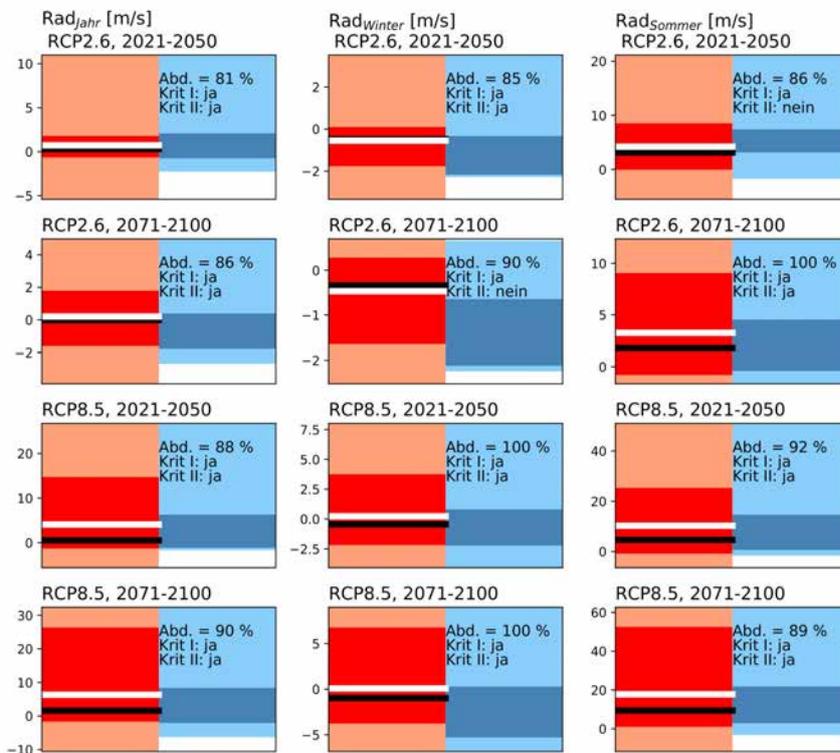


Abbildung 6.8: Wie Abbildung 6.1, für Änderungssignale der Solarstrahlung, v.l.n.r.: Durchschnittliche Solarstrahlung von Jahr, Winter und Sommer.

6.4 Zusammenfassung

Grundsätzlich ist das Mitteldeutsche Kernensemble zur Betrachtung temperaturbezogener Kenngrößen für das Kernensemble gut geeignet und bildet die Bandbreite der Änderungssignale des Referenzensembles gut ab. Jedoch sind gerade die Kenngrößen zur Bewertung der thermischen Belastung einer Wetterlage, wie der NOAA-Hitzeindex oder die Andauer von Hitzeperioden nicht optimal durch das Kernensemble abgedeckt. Für das Klimaelement Niederschlag ist der Ensemblevergleich sowohl für die Betrachtung der Robustheit als die Abdeckung der Bandbreite der Änderungssignale weniger zufriedenstellend. Die gesamte Bandbreite wird in der Regel gut dargestellt, jedoch weist das Kernensemble für einige Kenngrößen wie die Niederschlagsmenge einen negativen Bias auf und auch der wahrscheinliche Bereich der Änderungssignale ist im Kernensemble sehr eng gefasst, was aufgrund der großen natürlichen Schwankungsbreite des Parameters Niederschlag Zweifel aufwirft, ob das Kernensemble das richtige Instrument ist, die Änderung der Niederschlagsmengen darzustellen. Bei der Änderung der Solarstrahlung zeigt sich, dass die winterlichen Änderungssignale im RCP2.6 in der nahen und im RCP8.5 in der fernen Zukunft für das Kernensemble robust sind. Es ist also für diese Zeiträume und Szenarien im Kernensemble vermutlich mit einer einheitlicheren Änderung der Zirkulation zu rechnen, die für eine Änderung der Sonnenscheindauer sorgt.

7 Ergebnisdiskussion und Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die oben dargestellten Ergebnisse diskutiert und zusammengefasst. Hierbei wird auch beurteilt, inwieweit die verwendete Datenbasis für die durchgeführte Analyse geeignet ist und welche Limitationen bestehen. Außerdem werden Empfehlungen zu ergänzenden Untersuchungen gegeben. Die Auswertung der Klimamodelldaten für regionalisierte Klimamodelle stellt in jedem Fall für das Land Sachsen-Anhalt und dessen Entscheidungsträger eine wertvolle Quelle zur Information über mögliche Auswirkungen des Klimawandels dar, insbesondere, da frühere Studien sich in der Regel auf ein oder maximal zwei verschiedene Regionalisierungsmethoden bezogen haben. Somit ist die Datenbasis durch dieses Projekt verbreitert worden und stellt eine statistisch belastbare Grundlage für Wirkmodellierung und Entscheidungsträger dar.

7.1 Bewertung der Datengrundlage und Klimaprojektionen

Das Klima der RP wurde mit einem Rasterdatensatz (HYRAS) auf einem Gitter von 12,5 km Maschenweite ausgewertet. Diese Auswertung hat den klaren Vorteil, dass für die gesamte Fläche des Landes Sachsen-Anhalt Aussagen über das Klima getroffen werden können. Allerdings können die Auswertungen einzelner Gitterzellen und meteorologischer Stationen nicht direkt miteinander verglichen werden. Der HYRAS-Datensatz wurde in diesem Projekt verwendet um zum einen Basis-Datensatz mit gleicher horizontaler Auflösung wie die regionalisierten Klimaprojektionen für die Schwellwertanpassung zur Verfügung zu haben und andererseits, um die Landes- und regionalen Mittelwerte des Klimas der RP darstellen zu können. Der damit verbundene Verlust an Detailinformationen ist für die Aufgabenstellung dieses Projektes nicht abträglich, da der Fokus dieser Untersuchung auf der Ausarbeitung der Klimaänderungen sowie deren Bandbreite liegt. Deshalb ist es nicht förderlich, höher aufgelöste Daten als in der regionalen Klimamodellierung zu verwenden, da diese letztlich wieder auf das Gitter der Klimaprojektionen interpoliert werden müssten. Weiterhin ist anzumerken, dass der HYRAS-Datensatz für die Parameter Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung um Datensätze aus dem ERA-5 Projekt des ECMWF ergänzt wurde, da HYRAS diese Parameter nicht enthält. Dieses Vorgehen ist deshalb adäquat, da diese Datensätze für die Berechnung der KWB benötigt werden und ERA-5 ein qualitätsgeprüftes und vielfach angewandtes Reanalyseprodukt ist. Der mögliche Einwand hinsichtlich der Vergleichbarkeit zwischen aufgearbeiteten Messdaten bei HYRAS und Modellsimulationen auf Basis von Messdaten bei ERA-5 ist unbegründet. Zum einen ist auch die dem HYRAS-Datensatz zugrunde liegende Methodik eine numerische Modellierung, zum Anderen erfolgt die Modellierung für die Daten des ERA-5 Produktes auf der Basis der physikalischen Zusammenhänge, während beim HYRAS empirische Beziehungen zur Interpolation der Daten angewendet werden. Grundsätzlich sind physikalische Modelle den empirischen vorzuziehen. Empirische Modelle können dann Stärken aufweisen, wenn die empirischen Zusammenhänge wie z.B. Niederschlagsmenge und Geländehöhe für die jeweilige Region gut belegbar sind. Dies ist für den HYRAS-Datensatz der Fall. Aus diesen Gründen, wird die Ergänzung der HYRAS-Daten durch ERA-5 Daten als gangbar und wertvoll eingeschätzt, da ohne die Einbeziehung dieser Daten ein größerer Fehler in der Ermittlung der KWB gemacht werden würde, als der durch die methodischen Unterschiede der Datensätze eingeführte Fehler. Die KWB ist physikalisch abhängig von Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Strahlungsbilanz. In diesem Projekt wurde die FAO56 Methode nach Penman angewandt, die alle diese Daten einbezieht. Lediglich die Oberfläche wurde als Grasnarbe definiert, weshalb die Berechnung der KWB für unterschiedliche Untergründe gegebenenfalls wiederholt werden muss, falls dies im Rahmen von Wirkmodellierungen von Interesse ist.

Die diesem Projekt zugrunde gelegten Klimaprojektionen des RCP2.6 und RCP8.5 stellen ein Novum in der Betrachtung der Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt dar und verbessern die Aussagekraft und Qualität der Aussagen gegenüber vorherigen Untersuchungen deutlich. Dies wird sowohl durch den Fortschritt in der regionalen Klimamodellierung an sich dargestellt, aber auch durch die größere Datenbasis. Frühere Projekte haben ein oder zwei verschiedene Projektionen verwendet (Spekat, Einfalt, & Jackisch, Klimaanalyse Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1951-2014 auf Basis von Beobachtungsdaten, 2016), (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2012), während dieses Projekt 17 Projektionen für das RCP2.6 und 25 Projektionen für das RCP8.5 verwendet. Die Aussagen dieses Projektes beziehen sich grundsätzlich auf das gesamte Referenzensemble. Der Nachteil der Vielzahl an Projektionen ist die große benötigte Rechen- und Speicherkapazität bei der Durchführung von Untersuchungen zum Klimawandel. Der große Vorteil der großen Anzahl an verschiedenen Projektionen und auch der Einbeziehung von sowohl empirisch-statistischen Regionalisierungsmethoden als auch regionalen numerischen Klimamodellen liegt in der Möglichkeit, statistische Bandbreiten für die Änderungssignale erstellen zu können und ggf. Projektionen zu verwerfen, die un plausible Änderungen aufzeigen. Diese Vorteile überwiegen gegenüber den Nachteilen insbesondere deshalb, da die verfügbare Rechen- und Speicherkapazität in der heutigen Zeit rapide wächst.

7.2 Klima der Referenzperiode

Für die Auswertung des Klimas der RP ergeben sich im Vergleich von HYRAS und Stationsdaten keine nennenswerten Unterschiede zu anderen Vorarbeiten mit Auswertungen zum Klima der RP wie etwa dem Monitoringbericht des LAU (Unglaube. & Wollmert., 2020). Die allgemeine Beschreibung des Klimas der RP als 'Cfb' nach Köppen-Geiger (Köppen, 1936) ist für den HYRAS Datensatz ebenfalls zutreffend. In der RP liegt die Durchschnittstemperatur im Winter bei etwa 0 °C und im Sommer bei etwa 17 °C. Dabei ist der Süden und Osten des Landes von geringfügig höheren jahreszeitlichen Temperaturoegensätzen geprägt als der Nordwesten Sachsen-Anhalts. Dies unterstreicht die Randlage des maritim geprägten Mittelbreitenklimas zu mehr kontinental geprägtem Klima nach Osten mit zunehmender Meeresferne. Das Klima der BP 1971-2000 ist im Vergleich zur RP 1961-1990 um etwa 0,3 K wärmer. Bezüglich der Niederschlagsmengen und der KWB ist Sachsen-Anhalt als trockenstes Bundesland grundsätzlich auf die Zufuhr von Grund- und Oberflächenwasser durch Flüsse und Neubildung in regenreicheren Gebieten angewiesen. Mit Jahresniederschlägen von 470 bis 500 mm im Regenschatten östlich des Harzes - auch als *Mitteldeutsches Trockengebiet* bezeichnet - liegen die bundesweit trockensten Orte in Sachsen-Anhalt. Im Landesmittel fällt nicht besonders viel mehr Niederschlag, etwa 550 mm. Besonders heraus sticht jedoch der Oberharz mit über 1000 mm Jahresniederschlag. Aufgrund des geringen Flächenanteils von unter 1 % wirkt sich dies kaum auf das Flächenmittel des gesamten Landes aus. In den tiefen Lagen des Landes fallen die höchsten Niederschläge im Sommerhalbjahr, während der Winter die trockenste Jahreszeit ist. Im Oberharz ist der Winter am feuchtesten. Die relative Differenz zwischen den trockensten Orten im Mitteldeutschen Trockengebiet und im Oberharz ist im Sommer am geringsten und im Winter am größten. Starkregenereignisse treten im Klima der RP im Harz ganzjährig auf, während in den tiefen Lagen sich diese Ereignisse auf das Sommerhalbjahr beschränken. Die Gefahr durch Starkregenfälle ist mit dem täglich aufgelösten Datensatz nicht tiefgehend zu beantworten, da Starkregenereignisse oftmals nur wenige Stunden andauern und auch lokal auf sehr kleinen Raum begrenzt sind. Die in diesem Projekt ausgewerteten Kenngrößen lassen jedoch den Schluss zu, dass außerhalb des Harzes im Klima der RP keine erhebliche Gefährdung durch Starkregen ausgeht, während der Oberharz regelmäßig von intensiven Dauerniederschlägen betroffen sein kann. In der BP stellt sich das Niederschlagsklima nicht wesentlich anders dar. Die KWB ist im Landesmittel negativ und

positiv im Harz. Dies zeigt deutlich, dass der größte Teil des Landes auf die Zufuhr von Wasser angewiesen ist. Besonders starke negative Beiträge zur KWB werden durch die große potentielle Verdunstung im Frühling und Sommer verursacht. Dies bedeutet auch, dass die hiesige heimische Vegetation an einen gewissen Trockenstress gewöhnt ist und mit geringen oberflächlichen Wasserdargeboten zurechtkommt. In den letzten Jahren ist jedoch eine Verschärfung des Trockenstresses durch besonders trockene Sommerhalbjahre unverkennbar.

7.3 Änderungssignale durch den Klimawandel

Die Änderung des Klimas in Sachsen-Anhalt durch anthropogene Einflüsse ist eindeutig und gravierend. Für das Klimaschutzszenario RCP2.6 liegt die Zunahme der Mitteltemperatur bei etwa +1,6 K mit einer Bandbreite von wahrscheinlich +1,1 bis +2,1 K. Die Zunahme und auch die Bandbreite dieser Änderung bleibt über die beiden betrachteten Zukunftszeiträume hinweg relativ konstant. Dies bedeutet, die Erwärmung schreitet unter Annahme des RCP2.6 Szenarios nach 2050 nicht weiter fort. Das Änderungssignal der Temperatur ist im RCP2.6 jahreszeitlich gleich verteilt, wenn auch die Erwärmung des Frühlings um etwa 0,2 K schwächer und die des Sommers um etwa 0,2 K stärker ausfällt. Trotz der moderaten Temperaturerhöhung im RCP2.6, nimmt die Hitzebelastung deutlich zu, wenn auch nicht in einem Umfang, der nicht in den letzten Jahren bereits aufgetreten ist. Die Aufwendungen für Heizenergie werden sich um etwa -15 % reduzieren. Die thermische Vegetationsperiode verlängert sich um etwa einen Monat im Vergleich zur RP. Die oberen Schranken der Bandbreiten der Änderungssignale des Referenzensembles sind für das RCP2.6 in den heißen Sommern der letzten Jahre bereits überschritten worden. Diese Tatsache macht es schwierig daran zu glauben, dass das RCP2.6 ein realistisches Szenario darstellt, da die Reduktion der THG-Emissionen dafür bereits jetzt auf globalem Maßstab deutlich absehbar sein müsste gegenüber den letzten Jahren, was jedoch nicht der Fall ist. Deshalb ist das RCP2.6 weniger als realistischer Anhaltspunkt für die Entwicklung des Klimas anzusehen, als ein optimales Szenario, für das bereits jetzt absehbar ist, dass die Voraussetzungen nicht geschaffen worden sind.

Im RCP8.5 sind die Erhöhungen der Temperatur deutlich größer und wachsen in der Zukunft auch weiter an mit zunehmender Geschwindigkeit. Für den Zeitraum 2021-2050 projiziert das RCP8.5 einen Anstieg von +1,9 K (+1,5 bis +2,4 K) und für den Zeitraum 2071-2100 einen Anstieg von +4,2 K (+3,2 bis +5,2 K). Die Erwärmungsrate erhöht sich von der nahen bis in die ferne Zukunft. Die jahreszeitliche Erhöhung der Temperatur ist im Sommer und Winter am stärksten und im Herbst und Frühling am geringsten ausgeprägt. Dabei sind die Abweichungen vom Jahresmittel mit etwa 0,2 K überschaubar, wenn auch die Bandbreite des Änderungssignals im Sommer deutlich größer ist. Dies zeigt, dass die sommerliche Erwärmung möglicherweise sehr viel stärker ausfallen könnte mit Änderungssignalen oberhalb von +6 K. Für das Sommerhalbjahr wird auch eine Zunahme des thermischen Tagesganges um etwa +1 K gegenüber der RP im RCP8.5 projiziert. Die Zunahme der Hitzebelastung ist im RCP8.5 in der nahen Zukunft zunächst vergleichbar mit den Änderungssignalen des RCP2.6, steigt dieser Indikator in der fernen Zukunft noch weiter an.

In der Gesamtschau sind zum Klimatelement Temperatur eindeutige Feststellungen möglich. Das RCP2.6 kann aufgrund der gegenwärtigen Verzögerung von klimapolitischen Maßnahmen und der damit verbundenen Entwicklung der globalen THG-Emissionen, sehr wahrscheinlich als ein Szenario gewertet werden, dass den untersten Rand dessen darstellt, was selbst mit massiven Anstrengungen zur Mitigation des Klimawandels noch erreichbar ist. Das RCP8.5 hebt sich durch die beschleunigte und massive Erwärmung ab 2050 vom RCP2.6 ab. Auch das Eintreffen des RCP8.5 darf als unwahrscheinlich gewertet werden, da Klimaschutzmaßnahmen zwar verzögert durchgesetzt werden im Vergleich zum RCP2.6 Szenario, jedoch das RCP8.5

davon ausgeht, dass kein globaler Klimaschutz durchgeführt wird, was ebenfalls nicht der Fall ist. Wahrscheinlich ist, dass die Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt zwischen den beiden betrachteten Szenarien liegen werden, weshalb die Untersuchung eines der mittleren Szenarien, entweder RCP4.5 oder RCP6.0, in Ergänzung zu den hier durchgeführten Untersuchungen, sinnvoll ist. Der Klimazustand in Sachsen-Anhalt im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme der mittleren Änderungssignale beim Parameter Temperatur und Niederschlag entspräche nach der Klassifikation in (Köppen, 1936) der Klasse Cfa bzw. einem warmgemäßigtem Subtropenklima.

Die Auswertung zum Klimaelement Niederschlag unterliegt einer größeren Bandbreite. Tendenziell nehmen die Niederschläge im Winter etwas zu und im Sommer ab, sodass auch die negative KWB im Sommerhalbjahr durch die Temperaturerhöhung verschärft werden würde. Der Betrag und die Bandbreite der Änderungssignale im RCP8.5 sind deutlich größer als im RCP2.6. Beide Szenarien enthalten auch Änderungssignale, welche entgegen der allgemeinen Tendenz zu nasserem Wintern und trockenen Sommern genau das Gegenteil projizieren. Mit der vorhandenen Datenbasis ist eine Analyse von Starkregenindikatoren nur bedingt möglich. Tendenziell ist eine Zunahme von maximalen Tagesmengen und 5-Tagesmengen zu beobachten, die im RCP8.5 besonders ausgeprägt ist. Diese Signale sind jedoch aufgrund der Bandbreite nicht robust. Die Zunahme von Dürreereignissen ist sehr wahrscheinlich und die Änderungssignale des SPI₉₀ sowie der Trockenperioden sind auch signifikant. Dies trifft insbesondere auf die Projektionen im RCP8.5 zu.

Bezüglich des Windes, der Feuchte und Solarstrahlung werden im RCP2.6 keine signifikanten Änderungen erwartet. Im RCP8.5 nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit im Winter (Sommer) zu (ab), die spezifische Feuchte zu und die Solarstrahlung nimmt im Sommerhalbjahr wahrscheinlich zu. Die Änderungssignale für die Temperatur sind ausnahmslos robust, während dies für alle anderen Indikatoren aufgrund der großen Bandbreite nicht der Fall ist. Dies bedeutet, dass die Projektionen den physikalischen Mechanismus der Erwärmung umsetzen, jedoch die Folgen für die atmosphärische Zirkulation sich in den Projektionen massiv unterscheiden. Unter der Annahme eines wärmeren Klimas sind verschiedene Änderungen der globalen Zirkulation zu erwarten, wie z. B. eine Abschwächung des Golfstrom-Regimes (Chen, Wang, Xie, & Liu, 2019), eine Abschwächung der tropischen Monsunzirkulation und eine Intensivierung der mit dieser verbundenen Niederschläge, die mit großen Unsicherheiten behaftet ist (Seth, et al., 2019). Außerdem ist im Sommer eine Verbreiterung und Nordwärtsverlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels zu erwarten (Cherchi, et al., 2018), der direkte Auswirkungen auf die in Sachsen-Anhalt auftretenden Wetterlagen haben wird. Diese Änderungen könnten sich derart auf das Klima Sachsen-Anhalts auswirken, dass die Sommer wie unter derzeitigen Klimabedingungen im mediterranen Raum von persistenten Hochdruckwetterlagen geprägt sein könnten. Diese Interpretationen müssen jedoch durch Untersuchungen der Druckmuster belegt werden. Ohne eine Untersuchung zu den möglichen und wahrscheinlichen Änderungen der Witterungs- und Zirkulationsverhältnisse in Sachsen-Anhalt, ist eine Interpretation der Änderungen des Niederschlages, der Strahlung oder der Windgeschwindigkeit wenig zielführend. Die Datenbasis sollte daher weiter ausgebaut werden.

Möglicherweise entsteht durch die Verwendung statistisch-empirischer Regionalisierungsansätze auf der Basis der Korrelation mit Klimadaten der Vergangenheit eine systematische Fehleinschätzung des zukünftigen Klimas, da die empirischen Zusammenhänge möglicherweise im Klima der Zukunft nicht mehr anwendbar sind und sich verändern (siehe auch (Struve, et al., 2020)). Dies könnte z.B. durch veränderte vertikale Temperaturprofile durch höheren Wasserdampfgehalt eintreten oder geringe oder geringere Neigung zu Inversionswetterlagen bei winterlichen Hochdrucklagen aufgrund höherer Bodentemperaturen.

Aus den neuesten Studien zur Evaluation der verwendeten Ansätze EPISODES (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2013) und WETTREG (Kreienkamp, Spekat, & Enke, 2013) sind statistische Vergleiche zur Performance der ESD Methoden mit RCM-Regionalisierungen vorgenommen worden, die im Ergebnis eine gute Übereinstimmung zeigen. Jedoch wäre es aus unserer Sicht wertvoll und wünschenswert, eine detaillierte Plausibilitätsprüfung der in die Zukunft projizierten Zusammenhänge auf der Basis meteorologischer Begutachtung durchzuführen.

7.4 Ensemblevergleich und Bewertung Kernensemble

Die Auswahl eines Kernensembles ist darauf abgezielt, die Aufwendungen für die Durchführung der Projektionen zu verringern. Die in diesem Projekt durchgeführte Untersuchung hat ergeben, dass für das Klimatelement Temperatur eine solche Vorgehensweise durchaus zielführend ist, da das Kernensemble die Bandbreite des Referenzensembles gut abbilden kann. Jedoch ist dies für die Parameter Niederschlag, KWB, Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung, die ihrerseits für Wasserhaushalt und Energiegewinnung von Bedeutung sind, nicht praktikabel. Diese Einschätzung resultiert aus der Tatsache, dass die Ergebnisse der Robustheitsuntersuchung teilweise abweichend ausfallen und für viele Kenngrößen die Kriterien zur Erfassung der Bandbreite nicht erfüllt werden. Außerdem sind die Veränderungen der Zirkulation in Sachsen-Anhalt durch den Klimawandel bisher nicht bekannt und möglicherweise gehen Informationen über die Bandbreite und Art der möglichen Änderungen durch die Verwendung des Kernensembles verloren. Die Reduktionsmethode für die Erarbeitung des Kernensembles ist im Wesentlichen fokussiert auf die Bandbreite der Änderungen der Parameter Temperatur und Niederschlag. Um eine wirkungsvolle Reduktion des gesamten verfügbaren Pools an Klimaprojektionen durchführen zu können, müssten weitere spezifische Klimakenngrößen untersucht und in die Methode eingearbeitet werden. Bevor die Methode nicht auf die Anforderungen an die Qualität von Klimaprojektionen angepasst ist, insbesondere wenn das Wissen und Verständnis über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Zirkulation und die damit verbundenen Auswirkungen auf Klimakenngrößen abseits der Temperatur nicht hinreichend verstanden sind, wird empfohlen grundsätzlich die größtmögliche Datenbasis zu verwenden. Es ist also grundsätzlich empfehlenswert, weitere Forschung durchzuführen, die zur Erweiterung der entwickelten Methodik dienen kann.

7.5 Interpretation des Klimawandels in Sachsen-Anhalt

Der anthropogene Ausstoß von THG erzeugt eine Erwärmung der Atmosphäre. Abhängig von den unterschiedlichen Auswirkungen auf die Zirkulation ergeben sich regional unterschiedliche Auswirkungen auf das Klima. Unter Annahme des RCP2.6 ist von einer Temperaturerhöhung von etwa +1,6 K auszugehen, unter Annahme des RCP8.5 erhöht sich die Erwärmung in der fernen Zukunft auf etwa +4,2 K gegenüber der RP. Die Schwankungsbreiten der Änderungssignale sind im RCP8.5 deutlich größer. Die Hitzebelastung nimmt im RCP2.6 auf Ausmaße zu, wie sie in den letzten 10 Jahren bereits üblich geworden sind. Jedoch ist davon auszugehen, dass eine weitere Erwärmung stattfinden wird, da die Voraussetzungen für eine drastische und zeitnahe Reduktion der THG-Emissionen global nicht gegeben sind. Im RCP8.5 nimmt die Hitzebelastung auf Ausmaße zu, wie sie in Sachsen-Anhalt bisher nicht beobachtet worden ist. So sind jährlich im Durchschnitt etwa 5-mal so viele Hitzetage zu erwarten in der fernen Zukunft unter Annahme des RCP8.5. Die Schwankungsbreiten bei den Temperatur- und anderen Kenngrößen speist sich nicht aus Unsicherheiten über die Tatsache, dass die Emission von THG zu einer Erwärmung führen wird, sondern aus unterschiedlichen Ergebnissen zu den Änderungen der großräumigen Zirkulation. Diese Unsicherheiten zeigen sich auch in der Änderung der Niederschläge. Hierfür lassen sich lediglich Tendenzen ableiten. Diese Tendenzen weisen auf eine geringe Zunahme der Niederschlagsmengen im Winter und

eine möglicherweise deutliche Abnahme der Sommerniederschläge hin. Für das RCP8.5 sind die Mittelwerte dieser Tendenzen größer und nehmen auch in der fernZ zu im Vergleich zur nahZ. Jedoch ist auch die Schwankungsbreite der Änderungssignale im RCP8.5 deutlich größer. Aufgrund dieser Tendenzen und der deutlichen Zunahme der Temperatur, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass sich das Defizit der jährlichen KWB in Sachsen-Anhalt weiter verschärft. Die Beiträge der größeren Verdunstung stammen hauptsächlich aus der Erhöhung der Temperatur, aber auch die Tendenz zur Erhöhung der Solarstrahlung leistet einen Beitrag von etwa 5-10 %. Dürreperioden dürften besonders im RCP8.5 deutlich häufiger auftreten als in der RP. Dies ist besonders dann der Fall, wenn man zusätzlich zum SPI₉₀ auch die Erhöhung der Verdunstungsraten durch ansteigende Temperatur berücksichtigt. Im Gegenzug ist es auch wahrscheinlich, dass Starkregenfälle im RCP8.5 zunehmen werden. Dies wird hauptsächlich durch die Zunahme der Niederschlagsintensität verursacht. Dies ist plausibel, da durch die Zunahme der Temperatur auch die spezifische Feuchte und der Wasserdampfgehalt der Troposphäre zunehmen. Die Unsicherheit dieser Aussagen ist jedoch groß und weitere Arbeiten sind zum Verständnis der Klimaänderungen notwendig. Außerdem fehlen Angaben zu stündlichen Niederschlagsraten und eine Untersuchung zu Parametern relevant für konvektive Wetterereignisse. Die konvektive Aktivität und Gefährdung durch bestimmte Wetterlagen lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht einschätzen, da konvektive Ereignisse auf kleineren zeitlichen und räumlichen Skalen stattfinden und die vertikale Schichtung in dieser Studie nicht untersucht worden ist. Die Erhöhung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit erzeugt eine größere potenzielle Energie in der Atmosphäre, was es auch plausibel macht anzunehmen, dass die Gefährdung durch konvektive Ereignisse zunimmt. Dies sollte jedoch durch entsprechende Untersuchungen belegt werden. Die mittlere Windgeschwindigkeit nimmt im RCP8.5 im Winter geringfügig zu, während sie im Sommer etwas abnimmt. Letzteres ist konsistent mit Erkenntnissen anderer Untersuchungen zur Nordwärtsverlagerung der subtropischen Hochdruckgebiete im Sommer. Die Erhöhung der winterlichen Windgeschwindigkeit ist nicht konsistent mit der beobachteten und vorhergesagten Nordwärtsverlagerung der Zyklonenzugbahnen über dem Nordatlantik, jedoch ist ein genaueres Ursachenverständnis durch Untersuchung der Änderungen der Zirkulationsmuster unerlässlich. Die Erhöhung der Solarstrahlung im RCP8.5 lässt auf höhere Sonnenscheindauern schließen. Für den Winter kann dies möglicherweise aus der Reduktion von Inversionswetterlagen oder der Zunahme von Wetterlagen mit südwestlichen Winden rühren, oder einer Kombination. Für den Sommer ist dieses Änderungssignal konsistent mit der Verlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels nach Norden.

In der Gesamtschau bringt der Klimawandel eine deutliche Erwärmung des Temperaturniveaus, eine Verlängerung der Vegetationsperiode und eine Erhöhung des Starkregenpotentials ebenso wie der Gefährdung durch Dürreereignisse. Auch wenn sich die Niederschlagsmengen insgesamt nicht wesentlich ändern, erhöht sich die Schwankungsbreite der Niederschlagsmengen mit vermehrten Trockenperioden auf der einen und heftigeren Starkregenfällen auf der anderen Seite. Geeignete Anpassungsmaßnahmen sind daher dringend notwendig und sollten durch entsprechende Wirkmodellierung der Klimafolgen erarbeitet werden. Die Entwicklung der letzten Jahre hat bereits gezeigt, dass die Gefährdung durch anhaltende Dürreperioden zugenommen hat und die Vegetation sowie die Wasserwirtschaft unter großen Trockenstress gestellt hat. Aber auch die Hochwasser in den Sommern 2002, 2010 und 2013 haben gezeigt, dass Starkregenfälle Teil der Auswirkungen des Klimawandels sind. Für die Anpassungsmaßnahmen sind speziellere Erkenntnisse über die Änderungen des Klimas in Sachsen-Anhalt notwendig, weshalb die Datenbasis dieses Projektes erweitert werden sollte und weitere Forschungsprojekte durchgeführt werden sollten unter Berücksichtigung sektorenspezifischer Indikatoren und Bedürfnisse.

8 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.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. e. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines. *for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56 Fao, Rome, vol. 300, no. 9*, S. D05109.
- Brewer, S., Guiot, J., Sánchez-Goñi, M., & Klotz, S. (2008). The climate in Europe during the Eemian: a multi-method approach using pollen data. *Quaternary Science Reviews, vol. 27, no. 25-26*, S. 2303-2315.
- BUND. (2020). *Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt, BUND-Gewässerpapier*. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND).
- Chen, C., Wang, G., Xie, S.-P., & Liu, W. (2019). Why does global warming weaken the gulf stream but intensify the kuroshio? *Journal of Climate, vol. 32, no. 21*, S. 7437-7451.
- 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, vol. 4, , vol. 4, , 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, vol. 57, no. 3*, S. 477-491.
- Engel, H. (2004). *La Houille Blanche, vol. 2004, no. 6*, S. 33-36.
- Frick, C., Steiner, H., Mazurkiewicz, A., Riediger, U., Rauthe, M., Reich, T., & Gratzki, A. (2014). Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift, vol. 23, no. 1*, S. 15-32.
- Haiden, T., Janousek, M., Bidlot, J., Buizza, R., Ferranti, L., Prates, F., & F. Vitart, F. (2018). *Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2018 upgrade*. European Centre for Medium Range Weather Forecasts.
- Hennemuth, B., Bender, S., Bülow, K., Dreier, N., Keup-Thiel, E., Krüger, O., . . . Schoetter, R. (2013). *Statistical methods for the analysis of simulated and observed climate data: applied in projects and institutions dealing with climate change impact and adaptation*. CSC.
- Hersbach, H., Dee, & J., D. (2016). ERA5 reanalysis is in production. *ECMWF newsletter, no. 7*, S. 5-6.
- Holldorb, C., Rumpel, F., Gerstengarbe, F.-W., Österle, H., & Hoffmann, P. (2016). *Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (klibet)*.
- Hübener, H. B., K. Fooker, C., Früh., B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., . . . al, e. (2017). *Reklies-De Ergebnisbericht*.
- IPCC, K., P. R., Allen, M. R., R., B. V., J., B., W., C., . . . Dasgupta, P. e. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Jacob, D. P., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., . . . al., e. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate. *Regional environmental change, vol. 14, no. 2*, S. 563-578.

- Kinkeldey, M. v., Nöth, G., & Adler, K. (2015). *120 Jahre Wetterbeobachtung auf dem Brocken (Harz): Eine Chronik der Wetterwarte und des Observatoriums*. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- Köppen, W. a. (1936). *Das geographische System der Klimate Handbuch der Klimatologie, vol. 1*.
- Kreienkamp, F., Paxian, A., Früh, B., Lorenz, P., & Matulla, C. (2019). *Climate dynamics, vol. 52, no. 1*, S. 991-1026.
- Kreienkamp, F., Paxian, A., Früh, B., Lorenz, P., & Matulla, C. (2019). Evaluation of the empirical-statistical downscaling method EPISODES. *Climate dynamics*, vol. 52, no. 1, S. 991-1026.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2012). *Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.1 und 1.2: Klima und Extreme*. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2013). The weather generator used in the empirical statistical downscaling method, *wettreg. Atmosphere, vol. 4, no. 2*, S. 169-197.
- Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie. (2019). *Klima- und Energiekonzept Sachsen-Anhalt (KEK)*. Magdeburg: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Vuuren, V., . . . al., e. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature, vol. 463, no. 7282*, S. 747-756.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., d. Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., . . . Kram, T. (2000). *Special report on emissions scenarios*.
- Rathjens, C. (1963). Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Hrsg. von E. MEYNEN und J. SCHMITHÜSEN (Book Review). *Geographische Zeitschrift, vol. 51, no.2*, S. 154.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., & Gratzki, A. (2013). *Meteorol. Z, vol. 22, no. 3*, S. 235-256.
- Rhodes, C. J. (2016). The 2015 Paris climate change conference: COP21. *Science progress, vol. 99, no. 1*, S. 97-104.
- Rockel, B., Will, A., & Hense, A. (2008). The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift, vol. 17, no. 4*, S. 347-348.
- Rubel, F., & Kotteck, M. (2010). *eteorologische Zeitschrift, vol. 19, no. 2*, S. 135.
- Schröder, H. (1997). *Die natürliche Umwelt Sachsen-Anhalts*. Gotha.
- Seth, A., Giannini, A., Rojas, M., Rauscher, S. A., Bordoni, S., Singh, D., & Camargo, S. J. (2019). Monsoon responses to climate changes – connecting past, present and future. *Current Climate Change Reports, vol. 5, no. 2*, S. 63-79.
- Spekat, A., Einfalt, T., & Jackisch, A. (2016). *Klimaanalyse Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1951 2014 auf Basis von Beobachtungsdaten*. (L. f. Sachsen-Anhalt, Hrsg.) Halle (Saale).
- Spekat, A., Enke, W., & Kreienkamp, F. (2007). *Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis*

von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ... Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes.

- Steadman, R. G. (1979). The assessment of sultriness, Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*(18), S. 861-873.
- Struve, S., Ehlert, I., Pfannschmidt, K., Heyner, F., Franke, J., Kronenberg, R., & Eichhorn, M. (2020). *Mitteldeutsches Kernensemble (MDK) zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten*. Dokumentation, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) Fachgebiet Klima, Erneuerbare Energie, Nachhaltigkeit, Umweltallianz, Geschäftsstelle AG Klima.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment. *Bulletin of the American meteorological Society*, S. 485-498.
- Unglaube., M., & Wollmert., A. (2020). *Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Monitoringbericht 2020*. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt.
- van Meijgaard, E., Van Ulf, L., Van de Berg, W., Bosveld, F., Van den Hurk, B., Lenderink, G., & Siebesma, A. (2008). *The KNMI regional atmospheric climate model RACMO, version 2.1*. Citeseer.
- Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., & Marx, A. (2016). The German drought monitor. *Environmental Research Letters*, vol. 11, no. 7, S. 074002.