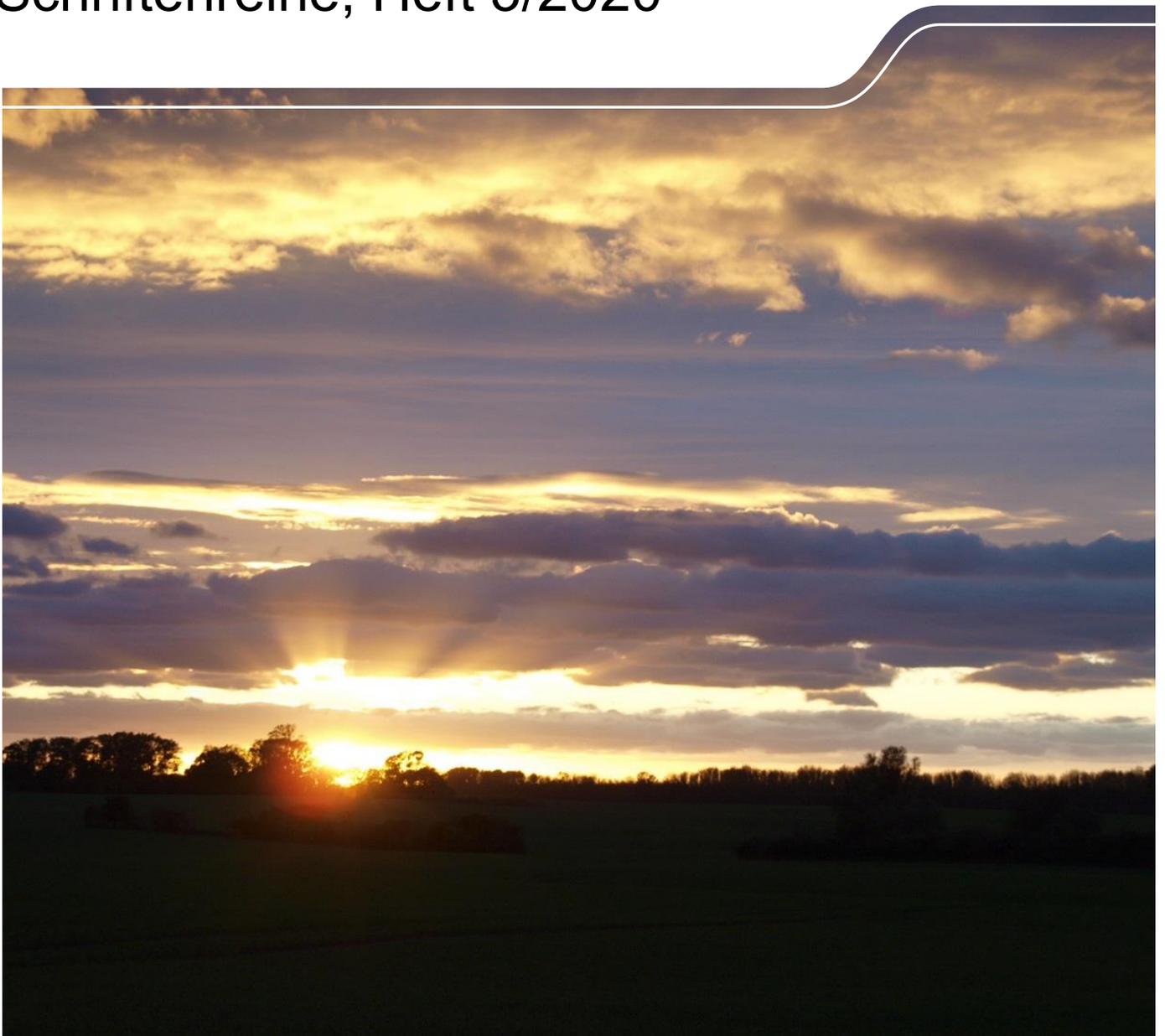




Regionale Klimaprojektionen für Sachsen

Schriftenreihe, Heft 3/2020



WMSax2.0

Bereitstellung eines Ensembles regionaler
Klimaprojektionen für Sachsen

Arne Spekat, Dr. Wolfgang Enke

1	Einleitung	7
1.1	Kontext	7
1.2	Statistische Klimamodellierung und Extreme	8
1.3	Die Empirisch-Statistische Regionalisierungsmethode WETTREG/WEREX – Kurzdarstellung	9
1.4	Das Verfahren KlaMuKo – Kurzdarstellung	10
1.5	Zu diesem Bericht	14
2	Daten.....	15
2.1	Obere Atmosphäre	15
2.2	Regionales Klima in Bodennähe	16
2.2.1	Klimaregionen	18
2.2.2	Niederschlagsräume	19
3	WMSax2.0 – WEREX und KlaMuKo	24
3.1	Gemeinsamkeiten und Unterschiede	24
3.2	Neuartige Nutzung von Reanalysedaten in den regionalisierten Projektionen	27
3.3	Besondere Beachtung von Trends	28
3.4	Zur Plausibilisierung von Klimaprojektionen	29
4	Ausgeführte Arbeiten in Projektphase II.....	31
4.1	WEREX VI – Ensembleuntersuchungen	31
4.1.1	Ergebnisse Temperatur	31
4.1.2	Ergebnisse Niederschlag	35
4.2	KlaMuKo – Anwendungsbeispiele	41
4.2.1	Beispiel 1: Maximumtemperatur im Sommer	41
4.2.2	Beispiel 2: Maximumtemperatur im Winter	44
4.2.3	Beispiel 3: Schwellwertüberschreitungen der Temperatur	47
4.2.4	Beispiel 4: Niederschlag im Sommer	50
4.2.5	Beispiel 5: Schwellwerte des Niederschlags	52
4.2.6	Entwicklungen über die Zeit, Beispiele mit dem Modell MPI ESM Lauf 1 RCP8.5	53
4.2.7	Gegenüberstellung von Niederschlagstrends in Klimaregionen und Klimaräumen	64
4.2.8	Das KlaMuKo-Ensemble – Vergleich von Szenarios, Modellen und Modell-Läufen	65
4.3	WMSax2.0 – Variante der KlaMuKo-Methodik mit unteretzten NCAR-Daten	69
5	Zusammenfassung und Ergebnisse	73
5.1	Datensituation	73
5.2	WEREX VI	74
5.3	KlaMuKo	74
5.4	WMSax2.0	77
	Literaturverzeichnis.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Skizze der Aufgabenstellung von KlaMuKo	11
Abbildung 2:	Skizze der Auswahl	12
Abbildung 3:	Schematisches Beispiel für die Konstellationen der Prädiktoren	12
Abbildung 4:	Lage der ausgewählten Klimastationen	17
Abbildung 5:	Lage der ausgewählten Niederschlagsstationen	17
Abbildung 6:	Räumliche Darstellung der Clusterlösung mit 10 Klassen für die Zeitreihen monatlicher Niederschläge	18
Abbildung 7:	Relative Häufigkeit der 850-hPa-Werte für Geopotenzial, Temperatur und relative Feuchte am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume	25
Abbildung 8:	Relative Häufigkeit der Werte für die relative Feuchte 850 hPa, 700 hPa und 500 hPa am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume	26
Abbildung 9:	Jahresmitteltemperatur in Sachsen für das WEREX VI-Ensemble mit RCP85-Antrieb sowie die Klimamessungen	32
Abbildung 10:	Änderung der Jahresmitteltemperatur in Sachsen zwischen 1971-2000 und 2071-2100 für das WEREX VI-Ensemble	33
Abbildung 11:	Zeitlicher Verlauf der simulierten Jahresmitteltemperatur für die fünf Ensemblemitglieder mit dem Szenario RCP85 von 1951 bis 2100	34
Abbildung 12:	Änderung der Jahresmitteltemperatur in Sachsen als Mittel des Ensembles von fünf WEREX VI-Simulationen mit Antrieb RCP8.5	34
Abbildung 13:	Jahresniederschlagssumme des Zeitraums 1971-2000 in Sachsen	36
Abbildung 14:	Ensemblebalkendiagramm für die prozentuale Änderung des Niederschlags zwischen den Perioden 1971-2000 und 2071-2100 in Sachsen	37
Abbildung 15:	Zeitlicher Verlauf des simulierten Niederschlags des Jahres, des Sommer und des Winters für die fünf Ensemblemitglieder mit dem Szenario RCP85 sowie zwei Ensemblemitglieder mit dem Szenario A1B von 1951 bis 2100	38
Abbildung 16:	Prozentuale Änderung des Niederschlags zwischen 1971-2000 und 2071-2100 in Sachsen als Mittel des Ensembles von fünf WEREX VI-Simulationen mit Antrieb RCP8.5	39
Abbildung 17:	Darstellung der Temperatur- und Niederschlagssignale zwischen 1971-2000 und 2071-2100 für die Region Sachsen	40
Abbildung 18:	Box-Whisker-Darstellung der 15 KlaMuKo-Klassen für die Maximumtemperatur im Sommer, Daten von Tieflandstationen mit einer Höhe bis 300 m ü. NN	42
Abbildung 19:	Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 9. August 1992	43
Abbildung 20:	Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 6. Juni 1986	44
Abbildung 21:	Box-Whisker-Darstellung der 15 KlaMuKo-Klassen für die Maximumtemperatur im Winter, Klassifikation mit Daten von Tieflandstationen mit einer Höhe bis 300 m ü. NN	45
Abbildung 22:	Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 11. Januar 1987	46
Abbildung 23:	Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 10. Januar 1991	47
Abbildung 24:	Box-Whisker-Darstellung der 15 KlaMuKo-Klassen für den Niederschlag im Sommer mittels Daten von Bergstationen mit einer Höhe über 600 m ü. NN	51
Abbildung 25:	Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 12. August 2002 und am 8. August 1978.	51
Abbildung 26:	Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen im Vergleich zweier Klimamodelle	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung des Projektionsensembles	16
Tabelle 2:	Belegungszahl und Klassenmittelwert für Maximumtemperatur und damit verbundene Klimaindikatoren in den Klimaregionen Sachsens des Zeitraums 1971-2010.....	48
Tabelle 3:	Belegungszahl und Klassenmittelwert für Minimumtemperatur und damit verbundene Klimaindikatoren in den Klimaregionen Sachsens des Zeitraums 1971-2010.....	49
Tabelle 4:	Belegungszahl und Klassenmittelwert für den Niederschlag und mehrere Klimaindikatoren in den Klimaregionen Sachsens des Zeitraums 1971-2010	53
Tabelle 5:	Häufigkeit der 15 KlaMuKo-Klassen für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100 sowie prozentualer Trend und Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade	55
Tabelle 6:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5. Prädiktand: Maximumtemperatur im Sommer für sächsische Klimastationen im Bergland	56
Tabelle 7:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Minimumtemperatur im Winter für sächsische Klimastationen im Bergland	56
Tabelle 8:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Selektion der Tage Maximumtemperatur über 25 °C im Sommer für sächsische Klimastationen im Tiefland	57
Tabelle 9:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass die Maximumtemperatur über 25 °C liegt für die sächsische Klimaregion Tiefland.....	57
Tabelle 10:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass die Minimumtemperatur über 20 °C liegt; Untersucht wurden die Tage des Sommers für die sächsische Klimaregion Tiefland.	58
Tabelle 11:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag im Sommer für sächsische Klimastationen im Bergland	59
Tabelle 12:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 1 (April, Mai, Juni) für sächsische Klimastationen im Bergland	60
Tabelle 13:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 2 (Juli, August, September) für sächsische Klimastationen im Bergland.....	60
Tabelle 14:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 1 (April, Mai, Juni) für das westliche Erzgebirge	61
Tabelle 15:	Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag der Vegetationsperiode 2 (Juli, August, September) für das westliche Erzgebirge.....	61

Tabelle 16: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag im Winter für sächsische Klimastationen im Bergland	61
Tabelle 17: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Selektion der Tage mit Niederschlag über 10 mm im Winter für sächsische Klimastationen im Bergland	62
Tabelle 18: Perzentile des Niederschlags, ermittelt aus den Messungen im Zeitraum 1971-2010 für die Klimastationen in Sachsen	63
Tabelle 19: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass der Niederschlag oberhalb des 90-Perzentils des Zeitraums 1971-2010 liegt; Jahreszeit: Sommer (Stationen oberhalb von 600 m ü. NN)	63
Tabelle 20: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass der Niederschlag oberhalb des 90-Perzentils des Zeitraums 1971-2010 liegt; Jahreszeit: Winter (Stationen oberhalb von 600 m ü. NN)	64
Tabelle 21: Prozentuale 100-jährige Trends des projizierten Niederschlags in den stärksten fünf Extremklassen für die drei Klimaregionen Sachsens und die 10 Klimaräume	65
Tabelle 22: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KlaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für die Maximumtemperatur im Sommer der Tieflandregion Sachsens	66
Tabelle 23: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KlaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für die Minimumtemperatur im Winter in der Bergregion Sachsens	67
Tabelle 24: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KlaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für den Niederschlag im Sommer in der Bergregion Sachsens	68
Tabelle 25: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KlaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für den Niederschlag im Winter in der Bergregion Sachsens	69
Tabelle 26: Häufigkeit der WMSax2.0-Klassen für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100 sowie prozentualer Trend und Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Mitteltemperatur im Sommer	70
Tabelle 27: Häufigkeit der WMSax2.0-Klassen für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100 sowie prozentualer Trend und Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Mitteltemperatur im Sommer – Variante mit NCAR-Reanalysen	72

1 Einleitung

1.1 Kontext

Veränderungen im Klimasystem hatten und haben einen großen Einfluss auf das Erdsystem. Unsere Umwelt wird davon geprägt, wie sich gemittelte Atmosphäreneigenschaften über die Zeit und den Raum entwickeln. Insbesondere sind Betrachtungen der Schwankungsbreite dieser Eigenschaften wichtig. Von großer Wichtigkeit sind hier die Untersuchungen von Extremen der Atmosphärenzustände, also besonders starken Abweichungen vom Mittel, die oft drastische Auswirkungen auf uns und unsere Umwelt haben.

Eine weltweit anerkannte Grundlage zum Verständnis des Klimawandels, nebst der Behandlung von Maßnahmen zur Abmilderung der Folgen und Anpassung an den Klimawandel stellen die rund alle vier Jahre erscheinenden Sachstandsberichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dar. Die aktuelle Fassung erschien 2013 und 2014 und kann über www.ipcc.ch abgerufen werden.

Methodisch wird zur Abschätzung des Klimawandels eine Kette verschiedener Modelle eingesetzt. Plausible Annahmen zu zukünftigen Veränderungen von Bevölkerung, Wirtschaft, Technologie und anderen fundamentalen Steuerfaktoren werden in Form von Szenarios entwickelt. Die Steuerfaktoren nehmen Einfluss auf den Ausstoß und den atmosphärischen Bestand von Treibhausgasen. Diese wiederum dienen als Antrieb für globale Klimamodelle, die großräumige Klimaentwicklungen auf Grund des sich ändernden Anteils an Treibhausgasen simulieren. Dem Nutzer stehen in der Folge Projektionen eines Klimas, wie es sich aus Veränderungen bei den Treibhausgasen entwickelt, zur Verfügung.

Nutzer können dabei Betreiber von Modellen oder Modellketten sein, deren Ziel es ist, Auswirkungen der Klimaänderungen auf verschiedene Sektoren zu beschreiben. Dazu gehören beispielsweise Wasserwirtschaft, Zivilschutz, Infrastruktur, Ökologie oder Tourismus. Eine weitere Nutzergruppe sind Entscheidungsträger und Berater, die an Entscheidungsprozessen mitwirken. Unter anderem gehören zu diesen Prozessen die Abmilderung (Mitigation) des Klimawandels und die Anpassung (Adaption) an Klimafolgen mit Entscheidungen bezüglich effektiver Maßnahmen. Eine weitere Nutzergruppe bildet die Öffentlichkeit – in diesem Zusammenhang ist die Kommunikation der Ergebnisse von Klimaprojektionen von besonderer Bedeutung.

Für viele Fragestellungen ist ein globales Klimamodell zur Beantwortung das adäquate Werkzeug, insbesondere wenn es um den Überblick des Klimasystems geht. Liegt der Fokus hingegen auf der regionalen Skala, so sind regionale Klimamodelle und Verfahren einzusetzen. Hierfür gibt es zwei verschiedene Strategien:

- **Dynamisch:** In einem räumlich begrenzten Fenster wird eine höher aufgelöste Version des globalen Klimamodells gerechnet; die Modellierung des Bereichs außerhalb des Fensters wird von diesem globalen Modell übernommen. Beispiele für dynamische regionale Klimamodelle sind REMO (JACOB und PODZUN, 1997) und CLM (ROCKEL, 2008).
- **Statistisch:** Diese Verfahren sind unter dem Namen Empirical Statistical Downscaling (ESD) bekannt (BENESTAD, HANSEN-BAUER, CHENG, 2008 und MARAUN, WIDMANN, 2018). Es werden statistische Beziehungen zwischen großräumigem und lokalem Klima ermittelt und diese auf einen zukünftigen Klimazustand und dessen Entwicklung angewandt. Beispiele für ESDs sind WETTREG/WEREX (KREIENKAMP, SPEKAT, ENKE, 2010) und STARS (ORLOWSKY, GERSTENGARBE, WERNER, 2008). Hinzu kommt das seit 2016 entwickelte ESD mit dem Namen EPISODES (KREIENKAMP, PAXIAN, FRÜH, LORENZ, MATULLA, 2018). Ein Überblick zu diesen statistischen Verfahren ist in der Schriftenreihe *promet* des Deutschen Wetterdienstes erschienen (KREIENKAMP, SPEKAT, HOFFMANN, 2017).

Für Studien des Klimawandels werden im Freistaat Sachsen verbreitet die so genannten WEREX-Simulationen eingesetzt (ENKE, 2001) sowie (KREIENKAMP, SPEKAT und ENKE, 2011). Beim WEREX-Verfahren handelt es sich um eine auf Sachsen fokussierte Variante des WETTREG-Modells.

Dem Vorhaben WMSax2.0 – Ensemble regionaler Klimaprojektionen für Sachsen, zu dessen abschließender Ensemblephase dieser Bericht verfasst wurde, liegen Vorläufer-Untersuchungen (KREIENKAMP, SPEKAT und ENKE, 2011 sowie SPEKAT, MIKETTA, KREIENKAMP und ENKE, 2015), eine Machbarkeitsstudie zur Weiterentwicklung und konkreten Umsetzung (SPEKAT und ENKE, 2016A) sowie der erste Teilbericht zur Modellphase (SPEKAT und ENKE, 2016B) zu Grunde. Das Vorhaben folgt einem Stufenplan (SPEKAT und ENKE, 2016B). Zunächst wird in einer Basisstufe eine aktualisierte Fassung von WEREX, die Version WEREX VI, erstellt. Sie ist eine auf Sachsen fokussierte Weiterentwicklung des WETTREG-Verfahrens, wobei insbesondere beim Zusammenfügen der synthetischen Reihen Modifikationen umgesetzt wurden (KREIENKAMP, SPEKAT und ENKE, 2013). Die Basisstufe zielt auf die Modellierung des mittleren Verhaltens des Klimas ab. Ihre Ergebnisse sind für zahlreiche Anwendungen einsetzbar – ähnlich den Ergebnissen von vorherigen WEREX-Versionen. Das Besondere an WMSax2.0 ist die zusätzliche Fokussierung auf Extreme in einer optionalen, auf WEREX VI basierenden Stufe. In dieser wird eine weiter entwickelte Version des KlMuKo-Verfahrens (ENKE, SPEKAT und KREIENKAMP, 2016) eingesetzt.

Sehr wichtig für die Ensemblephase des Vorhabens war auch, dass im Freistaat Sachsen umfangreiche Analysen und Aufbereitungen im Rahmen des LfULG-Projekts „Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes“ durchgeführt wurden. Sie bildeten eine weitaus verbesserte Datengrundlage für die Modellierungen in WMSax2.0. Des Weiteren flossen Ergebnisse des Projekts „Verfahren zur objektivierten Ausweisung von Klima- und Klimaänderungsräumen“ (BERNHOFER und BARFUS, 2017) in WMSax2.0 ein. Details dazu sind in Abschnitt 2.2.2 beschrieben.

1.2 Statistische Klimamodellierung und Extreme

Wie andere Ansätze zur Darstellung des Klimawandels auf regionalen und lokalen Skalen hat das Modell WETTREG seine Stärken bei der Beschreibung des mittleren Klimazustands. Die volle Variabilität und die Extreme des Klimas abzubilden ist eine Herausforderung, der sich WETTREG und die auf Sachsen fokussierte Variante WEREX stellen. Die bisher verwendeten Ansätze waren diesbezüglich unterschiedlich erfolgreich – für den Gesamtumfang der Extreme der atmosphärischen Parameter wurde ein Verbesserungsbedarf konstatiert. In der Folge wurde WETTREG/WEREX weiter entwickelt. Leitgedanke war, die Fähigkeit der Methodik dahingehend zu verbessern, dass ein gewandeltes, extremer werdendes Klima dargestellt werden kann. Es waren auch Fortschritte zu verzeichnen, besonders durch die Einführung von Zirkulationsmustern, die für extreme atmosphärische Zustände stehen. Diese sind in der Gegenwart noch selten, aber sie dominieren das zukünftige Klimageschehen. In Abschnitt 1.3 wird das WETTREG/WEREX-Verfahren in Grundzügen vorgestellt.

Im Laufe der Zeit wurden die Fragestellungen der Klimafolgen-Modellierung und die Anforderungen an die von ihnen betriebenen Modelle immer ambitionierter – verbunden mit einer gestiegenen Erwartungshaltung an die Klimamodelle. Dazu gehörte auch der Wunsch nach einer Erhöhung der räumlichen Auflösung. Zudem wuchs das Spektrum der Einsatzbereiche und der Wunsch nach besserer Darstellungsqualität der statistisch simulierten Klimazustände. Dies ging hin bis zum Wunsch, regionale Spezifika in der zukünftigen Entwicklung von Extremen untersuchen zu können. Beispielweise sollten Antworten auf Fragen wie diese gefunden werden: Wie häufig werden heiße Tage (Maximum über 30 °C) am Ende des 21. Jahrhunderts im Raum Dresden sein? Oder: Wie häufig tritt zukünftig Starkniederschlag im östlichen Erzgebirge auf? Es zeigte sich immer deutlicher, dass die Strategie und die Nutzung des statistischen Verfahren WETTREG/WEREX passgenauer zur Beschreibung mittlerer bis leicht

extremer Zustände geeignet ist und dass selten auftretende, starke Extreme eine Neukonzeptionierung erfordern. Die Neukonzeptionierung brachte ein weiteres Verfahren mit Namen KlaMuKo hervor, das in Abschnitt 1.4 kurz beschrieben wird.

1.3 Die Empirisch-Statistische Regionalisierungsmethode WETTREG/WEREX – Kurzdarstellung

Diese Methode hat das Ziel, hochaufgelöste Informationen zum Klima der Zukunft zu liefern. Dies ist notwendig, da die Globalen Zirkulationsmodelle (GCM) als primäre Informationsquelle für zukünftige klimatische Entwicklungen zwar von hoher Leistungsfähigkeit sind, aber ihr Modellgitter für regionale Aussagen zu grob ist. In Abschnitt 1.1 sind die Ansätze zur Regionalisierung kurz dargestellt.

Bei WETTREG/WEREX wird ein Weg gewählt, der Beziehungen zwischen dem Zustand der Atmosphäre auf der großräumigen Skala mit den regionalen Klimaverhältnissen am Erdboden herstellt. Mit ihrer Hilfe wird ein Ansatz zur Beantwortung der Grundfrage von WETTREG/WEREX verfolgt: Wie sähe eine Messreihe an einem Ort aus, wenn der Klimawandel eintritt.

Phase I: Wetterlagenklassifikation

Der Begriff „Wetterlage“ wird dabei weiter gefasst als etwa bei den verbreitet verwendeten Großwetterlagen (Hess und Brezowsky, 1952). Dort werden Zirkulationsmuster manuell-subjektiv durch die Identifikation der Positionen steuernder Strömungszentren in den Feldern des Bodenluftdrucks und des Geopotenzials in 500 hPa klassifiziert. In WETTREG/WEREX erfolgt die Betrachtung einer Vielzahl von atmosphärischen Feldern (Geopotenzial, Schichtdicke, Divergenz, Feuchte, Labilität etc.). Zudem werden die Klassen nach dem Prinzip environment-to-circulation (Yarnal, 1993) gebildet, das heißt, es werden Intervalle einer regionalen Klimagröße wie der Temperatur definiert und danach die Mittelfelder der Atmosphäre berechnet, die an den Tagen eines solchen Intervalls auftraten. Die Datenbasis für die großräumige Skala sind Felder der freien Atmosphäre aus Rechnungen von Reanalyse-Modellen wie den ERA Daten des ECMWF oder den NCAR-Reanalysen. Sie stellen eine „dreidimensionale Klimatologie“ der Atmosphäre dar und werden als so genannte Proxys, das sind Größen zur indirekten Beschreibung einer anderen Größe, verwendet.

Phase II: Identifikation der Zusammenhänge

Auch in dieser Phase von WETTREG/WEREX wird der Klimazustand der Gegenwart analysiert. Die statistischen Werkzeuge sind Regressionsfunktionen und Ähnlichkeitsmaße. Die Bezugsregion ist bei WEREX ein Sachsen umgebendes Rechteck (s. Abschnitt 2.2). Die Datenquelle sind Messdaten von Klimastationen. In diesem Rechteck werden optimale Beziehungen zwischen dem Klima am Boden und dem großräumigen Klimazustand über dem mittleren Europa ermittelt. Die Datenquelle hierfür sind Reanalysedaten der freien Atmosphäre. Außerdem treten jahreszeitliche Unterschiede in den Zusammenhängen zwischen regionalem und großräumigem Klima auf, die berücksichtigt werden.

Phase III: Der zukünftige Klimazustand

Ergebnis der Phasen I und II sind „Wetterlagen“, die in den Simulationen von GCMs, angetrieben mit unterschiedlichen Treibhausgas-Szenarien, wiedererkannt werden. Für die einzelnen GCM und Szenario-Antriebe werden Häufigkeitsverteilungen der Muster erstellt werden. Zur Erinnerung: Die Muster stehen für warme bis kalte bzw. bei Untersuchungen des Feuchteregimes für trockene bis feuchte regionale Verhältnisse. Voraussetzung für eine erfolgreiche Arbeit von WETTREG/WEREX ist, dass in den GCM-Simulationen ein sich wandelndes Klima qualitativ und quantitativ korrekt über die Simulation der „Wetterlagen“ erfasst wird.

Phase IV: Der Wettergenerator

Wie bei einem Setzkasten entstehen aus Episoden der Klimamessreihen der Gegenwart mit Hilfe eines konditionierten Wettergenerators neue, synthetische Reihen (KREIENKAMP, SPEKAT und ENKE, 2013). Von zentraler Bedeutung bei der Reihensynthese ist, dass in ihnen die GCM- und Szenario-spezifischen, sich ändernden Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen repräsentiert sind, die ihrerseits jahreszeitlich unterschiedlich sind. Der Wettergenerator wird zudem so konditioniert, dass er stochastisch unabhängige, äquivalente Zeitreihen synthetisiert, die die Signatur eines gewandelten Klimas tragen.

1.4 Das Verfahren KlaMuKo – Kurzdarstellung

Es handelt sich bei KlaMuKo um eine Neukonzeptionierung. Das Verfahren wurde bereits in einem Bericht des LfULG vorgestellt (SPEKAT und ENKE, 2016A). Zudem erfolgte eine Publikation in einer Fachzeitschrift (ENKE, SPEKAT und KREIENKAMP, 2016). Um seine Bedeutung im Kontext von WMSax2.0 zu verdeutlichen, sei es an dieser Stelle kurz beschrieben.

Im Rahmen des Vorhabens KLIWETT (SPEKAT, MIKETTA, KREIENKAMP und ENKE, 2015) wurde unter anderem ein statistischer Ansatz entwickelt, der eine verbesserte Darstellung von Extremen ermöglicht. Das dort eingesetzte Verfahren fußt auf multipler Korrelation und Klassenbildung. Der Name ist KlaMuKo (Klassifikation durch multiple Korrelation). Im Grunde wird durch das Verfahren angestrebt, eine Zielgröße am Boden indirekt durch eine Kombination von Eigenschaften aus Atmosphärenfelder zu beschreiben, also quasi ein Proxy für die Zielgröße zu erzeugen.

Die Felder der freien Atmosphäre stammen aus NCAR-Reanalysen; für die Nutzung in KlaMuKo werden sie in ein äquidistantes Gitter umgerechnet.

An dieser Stelle sei der Weg, auf dem KlaMuKo-Beziehungen zwischen regionalen Klimagrößen am Boden und großräumigen Feldern der freien Atmosphäre ermittelt werden, in Grundzügen vorgestellt.

Vorbemerkung: Die Nutzung von Zeitreihen einzelner Stationen als regionale Klimagrößen ist zwar im Prinzip möglich, aber es hat sich als vorteilhaft für die Stabilität und Repräsentativität der Analysen erwiesen, eine Zeitreihe durch Zusammenfassen mehrerer Stationen zu bilden. Zum Beispiel ist es sinnvoll, hoch gelegene Stationen und solche im Flachland wegen ihrer Spezifika, insbesondere bei den Extremen, getrennt zu betrachten. Bezüglich weiter gehender Betrachtung regionaler Feinstrukturen bei den Extremen sind immer Repräsentativitäts-Abwägungen erforderlich. Details hierzu finden sich in Abschnitt 2.2.

Am Anfang steht die Identifikation von Beziehungen zwischen einer Zielgröße (in der Nomenklatur der Statistik heißt eine solche Größe Prädiktand) und großräumig vorhandenen Atmosphärenfeldern (in der Nomenklatur der Statistik heißen solche, zur Beschreibung von Prädiktanden verwendeten Größen Prädiktoren). Von der Grundstrategie her wird in WETTREG/WEREX bis zu diesem Stadium ein ähnlicher Weg eingeschlagen. Die Zielgröße (Prädiktand) kann z. B., wie bei WETTREG/WEREX die Temperatur oder der Niederschlag sein. Über den Ansatz von WETTREG/WEREX hinaus, kann aber das KlaMuKo-Verfahren auch für Prädiktanden eingesetzt werden, die komplexe und auf Extreme weisende Größen sind, wie beispielsweise die Zahl der Tage mit Überschreitungen von Schwellwerten. Bei den atmosphärischen Feldern kann es sich z. B. um Geopotenzial, Temperatur, Feuchte, aber auch abgeleitete dynamische (Advektion, Konvergenz, Vorticity etc.) oder thermodynamische (Pseudopotenziellen Temperatur, Labilitätsmaße etc.) Größen handeln. Im Grunde wird nach einer Kombination aus (großräumig verfügbarer) atmosphärischer Information (Prädiktoren) gesucht, die eine regionale Größe mit Extremcharakter bestmöglich beschreibt. Die Prädiktoren werden dabei nicht a priori festgelegt; vielmehr steht ein Satz von potenziellen

Prädiktoren zur Verfügung, aus dem mit einem objektiven Verfahren eine optimale Kombination bestimmt wird – siehe nächster Unterabschnitt. Dieser Teil der KlaMuKo-Strategie ist in Abbildung 1 dargestellt.

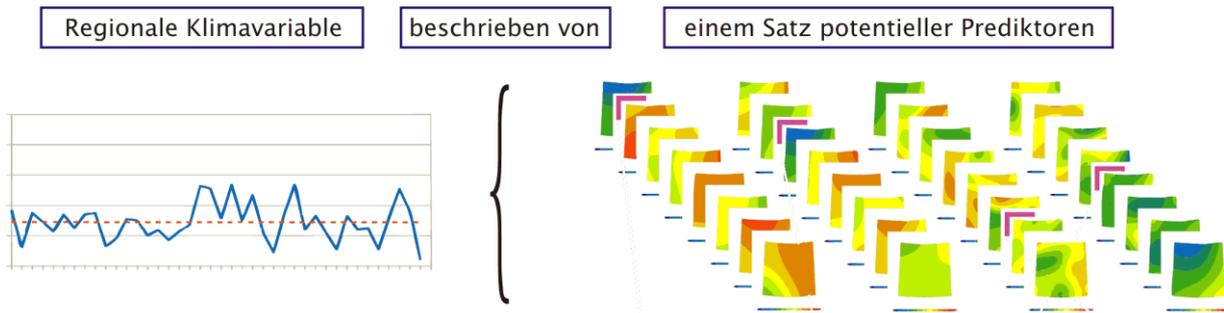


Abbildung 1: Skizze der Aufgabenstellung von KlaMuKo – Suche nach einer indirekten Beschreibung des regionalen Klimas am Boden durch Zustandsgrößen aus Feldern der freien Atmosphäre

Mit Hilfe eines Screening-Verfahrens wird auf objektivem Wege die Kombination von Feldern (Prädiktoren) ermittelt, die in optimaler Weise den Prädiktanden darzustellen in der Lage sind. Dazu wird für jede Koordinate jedes Atmosphärenfelds zunächst die einfache Korrelation mit dem Prädiktanden errechnet. Dasjenige Feld, was an einer Koordinate den höchsten Wert der Korrelation aufweist, wird als Prädiktor P1 ausgewählt. Nun wird unter Beibehaltung von P1 für jede Koordinate der verbleibenden Atmosphärenfelder errechnet, wie groß deren Multiple Korrelation gemeinsam mit P1 ist. Dies identifiziert die Kombination P1_P2, die den Prädiktanden beschreibt. Unter Nutzung der Kombination P1_P2 erfolgt nun die Suche nach der Kombination P1_P2_P3 etc. Dieser Teil des Verfahrens ist in Abbildung 2 gezeigt. So kann beispielsweise eine Kombination aus den Prädiktoren relativer Topografie 1000/850 hPa, Vorticity 850 hPa, absoluter Feuchte 850 hPa und geopotenzieller Höhe 700 hPa den Prädiktanden „sommerliche Tagesmaximumtemperatur im Tiefland in Sachsen“ bestmöglich beschreiben. Erfahrungsgemäß wächst mit der Anzahl von Prädiktoren das Risiko der numerischen Instabilität. Dieses Risiko bleibt jedoch relativ gering, wenn eine Größenordnung von vier Prädiktoren selektiert wird. Falls durch die Hinzunahme von Prädiktoren keine Verbesserung der multiplen Korrelation erreichbar ist, kann die Suche auch schon bei weniger als vier Prädiktoren abgebrochen werden. Dies ist allerdings bei den untersuchten Beziehungen zwischen Prädiktand und Prädiktoren nicht aufgetreten.

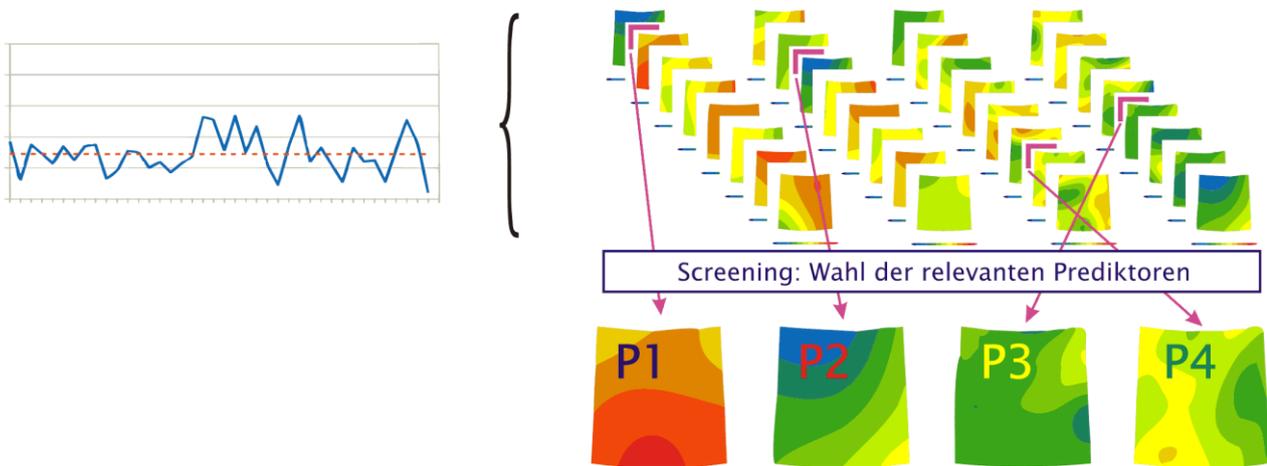


Abbildung 2: Skizze der Auswahl – verwendet wird eine Screening-Analyse mit dem Ziel, die Prädiktorenkombination zu finden, die den Prädiktanden optimal beschreibt

Die Screening-Regressionsanalyse findet nicht nur die Felder, mit denen eine bestmögliche Beschreibung des Prädiktanden erreicht werden kann. Sie ermittelt auch die Regressionskoeffizienten, das sind Faktoren, mit denen die Feldwerte an den identifizierten Koordinaten multipliziert werden müssen, um in einer Regressionsgleichung auf den Wert des Prädiktanden zu kommen. Hinzu kommt, dass an jedem Tag durch Einsetzen der konkreten Feldwerte aus P1 bis P4 eine andere Konstellation der Prädiktoren vorliegt (siehe Abbildung 3).

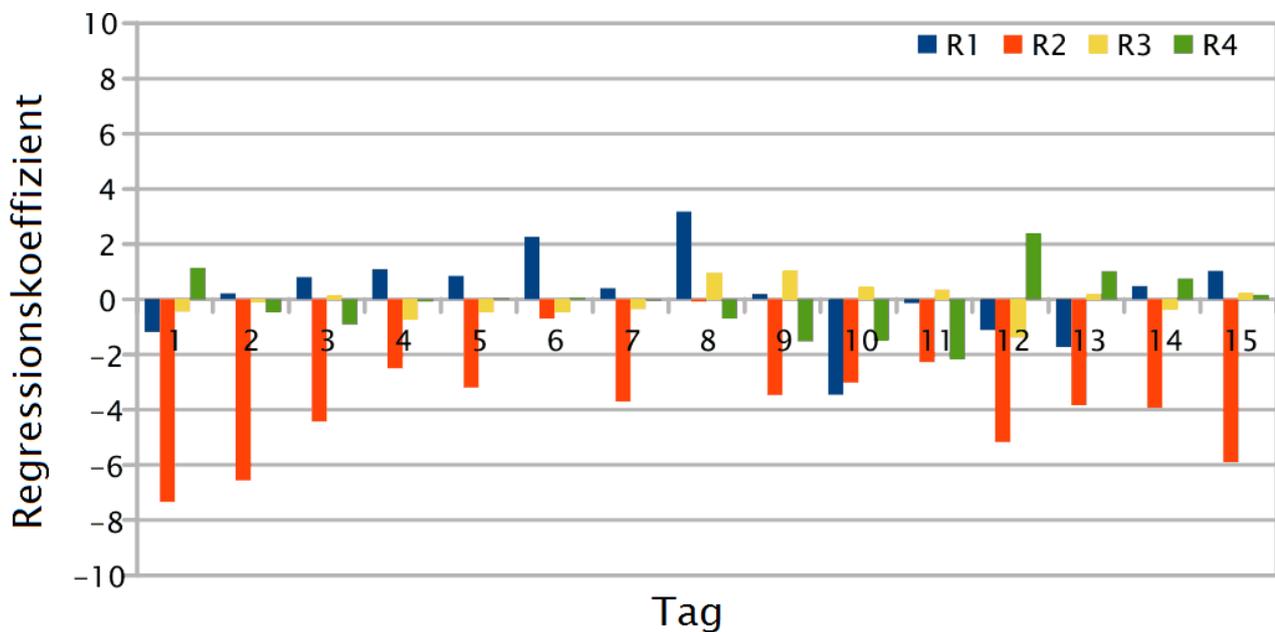


Abbildung 3: Schematisches Beispiel für die Konstellationen der Prädiktoren (Regressionskoeffizienten) R1 bis R4 an den ersten 15 Tagen eines Zeitraums

Diese Konstellationen stellen eine spezielle Art von Muster dar, wobei der Begriff „Muster“ nicht mit dem verbreiteten Konzept von Zirkulationsmustern, also der Anordnung von Steuerungszentren in der Zirkulation der mittleren Breiten verwechselt werden darf. Vielmehr besteht ein „Prädiktorenmuster“ aus der Anordnung der Regressionskoeffizienten. Das Beispiel in Abbildung 3 vermittelt den Eindruck, dass bereits innerhalb eines kurzen Zeitraums deutlich unterschiedliche Konstellationen der Prädiktoren auftreten. Es werden zwei Postulate aufgestellt: Es gibt charakteristische Prädiktorenmuster und extreme Ereignisse, die sich in Stationszeitreihen finden lassen, sind nachvollziehbar mit bestimmten Prädiktorenmustern verbunden.

Als nächstes folgt eine Klassifikation, die möglichst extreme Prädiktorenmuster herausarbeitet. Dabei kommt eine Cluster-Strategie zum Einsatz (k-means), die eine so genannte Startpartition möglichst unähnlicher Fälle ermittelt, die die Basis für die Klassen darstellen. Das Clusterverfahren hat selbst eine Reihe von „methodischen Freiheitsgraden“. Dazu zählt beispielsweise die Zahl der zu bildenden Klassen. Hier besteht eine Rückkopplung mit der Fragestellung des Nutzers. Liegt der Fokus auf besonders starken Extremen – mit dem Risiko, dass diese nicht repräsentativ erfasst sein könnten – so können 20 Klassen ratsam sein; liegt das Augenmerk auf der Beschreibung nicht ganz so seltener, aber immer noch extremer Ereignisse, so sind 10 bis 15 Klassen ratsam.

Als Resultat der vorausgegangenen Schritte existieren Klassen, die möglichst unähnliche Zustände (Prädiktorenmuster) herausarbeiten. Sie sind der Ausgangspunkt für den letzten Schritt des KlaMuKo-Verfahrens. In diesem werden die täglichen Prädiktorenmuster klassifiziert, d. h. der ihnen *ähnlichsten* Klasse zugeordnet. Auch bei der Zuordnung gibt es „methodische Freiheitsgrade“ wie die optionale Forderung, die Klassen mögen eine Mindestzahl von Werten beinhalten. Dieser Aspekt hat ebenfalls eine Verbindung zur Fragestellung des Nutzers. Sind sehr starke Extreme wichtig, so könnten Klassen zugelassen werden, die nur einen Einzelfall enthalten – auch wenn dann einige Größen zur Charakterisierung einer solchen Klasse, wie die Streuung der Klassenmitglieder, nicht bestimmbar sind. Ist die Repräsentativität der Klassen von Bedeutung, so könnte die Forderung beispielsweise darin bestehen, Klassen mit fünf oder weniger Mitgliedern aufzulösen und ihre Mitglieder auf die übrigen Klassen zu verteilen.

Das Ergebnis einer KlaMuKo-Analyse ist eine Zeitreihe, in der für jeden Tag die Zugehörigkeit zu einer der KlaMuKo-Klassen aufgeführt ist.

Damit KlaMuKo erfolgreich Extreme klassifiziert, wurde zudem folgende Überlegung einbezogen: In einem „regulären“ k-means-Clustering gibt es einen Austauschschritt, bei dem iterativ angestrebt wird, nach dem Zuordnungsschritt eine optimale Separierung der einzelnen Klassen zu erhalten. So sinnvoll dies für die Beschreibung des mittleren Klimazustands sein mag, ist es für die Bildung von extremen Klassen nicht zielführend. Grund hierfür ist, dass die Austauschschritte dem klassifizierten Kollektiv auch Trennschärfe im Bereich der Extreme nehmen, weil diese im Zuge der Austauschschritte mit großer Sicherheit den übrigen Klassen zugeordnet werden und ihr Extremcharakter somit nicht mehr sichtbar ist. Die Konsequenz ist, dass nicht alle KlaMuKo-Klassen gleich bedeutend für die weiter gehenden Analysen sind. Dies ist aber im Sinne der Extremanalysen eine sinnvolle Strategie, denn für Untersuchungen von Extremen sind Klassen, die mittlere Zustände beschreiben, nicht relevant.

Auch die optionale Forderung, dass die KlaMuKo-Klassen eine bestimmte Mindestbesetzung aufweisen sollen, nimmt dem Verfahren einen Teil der möglichen Trennschärfe – allerdings zu Gunsten der verbesserten Repräsentativität der Klassen. Im Vorhaben wurde auf Mindestbesetzungen verzichtet.

Anders als WETTREG/WEREX ist KlaMuKo primär nicht als Regionalisierungsverfahren konzipiert. Die Beziehungen zwischen der Region und dem großräumigen Klima werden auf der Basis von eher flächenhafter Information gewonnen. Ein Weg, die räumliche Differenzierung etwas zu erhöhen ist, durch einen Vorbereitungsschritt die Sta-

tionsreihen objektiv in Gruppen zusammenzufassen. Die Kriterien dieser Zusammenfassung wiederum können unterschiedlich sein. Zum Beispiel können sie geografisch oder nach Höhenlage differenziert sein oder sie können sich am Wertebereich oder der Variabilität der Zielgröße orientieren. Für diese „Klimaregionen“ werden dann die Beziehungen mit den großräumigen Atmosphärenfeldern gesucht. Es gibt darüber hinaus sinnvolle Aufbereitungen des Kollektivs der Stationszeitreihen – so ist es in einigen Fällen hilfreich, die Zielgröße zu transformieren und als Prädiktanden etwa die Wahrscheinlichkeit, dass an einem Tag eine Schwelle überschritten wird, zu nutzen (SPEKAT, MIKETTA, KREIENKAMP und ENKE, 2015).

Ein Beispiel für einen solchen Prädiktanden wäre eine Zeitreihe, in der für jeden Tag vermerkt ist, mit welcher Wahrscheinlichkeit (zwischen 0 und 1) an einer Station der gewählten Klimaregion ein Tagesmaximum von 30 °C überschritten wird. Sowohl der Parameter selbst (z. B. Niederschlag oder Temperatur) als auch die Schwelle des Parameters (z. B. mehr als 20 mm Niederschlag pro Tag oder ein Tagesminimum unter 0 °C) stellen Wahlmöglichkeiten dar, die vom Nutzer spezifiziert werden können.

Alle bisherigen Darstellungen und Erläuterungen sind auf die Gegenwart bezogen. Es handelt sich sozusagen um die Lernphase eines Verfahrens, deren Ziel es ist, Beziehungen zwischen Klimaverhältnissen am Boden und in der freien Atmosphäre zu identifizieren. In der Gegenwart ist dies durch die Analyse von Zeitreihen aus Messungen an Klimastationen und Reanalysen als „Klimatologie der freien Atmosphäre“ sehr gut möglich. Die weiter gehende Fragestellung bezieht sich aber auf das zukünftige Verhalten der Extreme. Genau dafür werden die in der Lernphase gefundenen Beziehungen angewandt, denn es gibt für die Zukunft keine Messreihen von Bodenstationen, aber sehr wohl Simulationen des Verhaltens der freien Atmosphäre durch numerische Klimamodelle. Der Kern der vorgestellten Strategie besteht darin, aus den Projektionen eines zukünftigen Klimas Informationen zu gewinnen, die auf die zeitliche Entwicklung von Zuständen in der freien Atmosphäre hinweisen, die im Klima der Gegenwart zu bestimmten Extremen geführt haben.

Für die Ensemblephase dieses Vorhabens wurden räumliche Zuordnungen verwendet, die auf der Basis einer Studie des LfULG (BERNHOFER und BARFUS, 2017) erarbeitet worden waren. Details finden sich in Abschnitt 2.2.

Die KlaMuKo-Methodik wird in diesem Vorhaben auch in einer Variante erprobt, die WMSax2.0 heißt und in der eine alternative Datenbasis für die KlaMuKo-Rechnungen aufbereitet wird, die neben Episoden des gegenwärtigen Klimas am Boden auch solche aus NCAR-Reanalysen einbindet. Details dazu finden sich in Kapitel 3. Anwendungen von WMSax2.0 sind in Abschnitt 4.3 beschrieben.

1.5 Zu diesem Bericht

Es wird der Bericht des Vorhabens „WMSax2.0 – Ensemble regionaler Klimaprojektionen für Sachsen (Teil II: Ensemblephase)“ vorgelegt. Es werden Passagen aus der Machbarkeitsstudie (SPEKAT und ENKE, 2016A) sowie dem Bericht zur Phase I des Vorhabens (SPEKAT und ENKE, 2016B) in diesem Bericht übernommen, weil dort wichtige, für die Erarbeitung von WMSax2.0 maßgebliche Verfahren und Resultate vorgestellt wurden.

2 Daten

2.1 Obere Atmosphäre

Das Klima der Gegenwart in der freien Atmosphäre wird durch Reanalysen beschrieben. In diesen werden historische Datenquellen (Vertikalsondierungen der unterschiedlichsten Art: Ballonaufstiege, Flugzeugmessungen, Satellitenmessungen) mit einem einheitlichen, gleich bleibenden Atmosphärenmodell dargestellt. Im Laufe der letzten 20 Jahre sind vier wesentliche Reanalysedatensätze erschienen:

- NCAR (KALNAY, KANAMITSU ET AL., 1996),
- NCEP-DOE Reanalysis R2, auch als NCAR2 bekannt (KANAMITSU, EBISUZAKI ET AL., 2002),
- ERA40 vom ECMWF (UPPALA, KALLBERG ET AL., 2005),
- ECMWF-ERA mit höherer Auflösung (DEE, UPPALA ET AL., 2011).

Im Projekt wurde für den Zeitraum 1979-2015 der NCAR2-Reanalysedatensatz verwendet, ergänzt um die davor liegenden Jahre aus dem NCAR-Datensatz. Der Grund ist, dass in NCAR2 Verbesserungen gegenüber NCAR erfolgten und so viele Jahre wie möglich mit diesem Qualitätsstandard in WEREX VI eingebracht werden sollten. Andererseits sollten aber auch Reanalysedaten vor 1979 bei WEREX VI zum Einsatz kommen, daher wurde als vertretbarer Kompromiss für einen Teil des Zeitraums der auf älteren Spezifikationen beruhende NCAR-Datensatz vorangestellt. Tests ergaben, dass deutliche Sprünge zwischen den beiden Reanalysedatensätzen nicht auftraten.

Das Klima der Zukunft wird von Läufen numerischer Simulationsmodelle beschrieben. In diesen wird das Atmosphärensystem in seiner Dynamik nachgebildet. Die zeitlich veränderliche Größe ist dabei der Bestand an Treibhausgasen. Er wird in Szenarios vorgegeben, die globale Entwicklungen von Bevölkerung, Industrialisierung und vielen anderen Komponenten des Erdsystems durch den Ausstoß von Gasen, die für den Treibhauseffekt relevant sind. Im Rahmen von WMSax2.0 wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber ein Ensemble aus Modellen festgelegt, das in Tabelle 1 aufgelistet ist. Dabei werden für einige Szenarios nur die Rechnungen mit WEREX VI ausgeführt, wiewohl auf der Basis der aktualisierten und qualitätskontrollierten Bodendaten für die Stationen in Sachsen aus dem Vorhaben „Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes“. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wurde das Ensemble gegenüber der Planung in der ersten Phase des Vorhabens modifiziert. Das liegt daran, dass Daten der freien Atmosphäre für den Zeitraum 1971 bis 2100 in täglicher Auflösung (!) nur bei relativ wenigen Globalmodellen Rechnungen verfügbar sind. Die CORDEX-Datenbank enthält zwar die Daten von wesentlich mehr Modellen und Modell-Läufen, aber diese umfassen Daten am Boden und nicht in der freien Atmosphäre. Selbst bei den für WEREX VI gerechneten Daten musste im Fall des Modells MIROC5 auf die Felder der 1000 hPa-Fläche verzichtet werden.

Der Einsatz von WEREX VI setzt einen Standardsatz von 60 potenziellen Prädiktoren (s. Abschnitt 1.3) voraus. Sie umfassen das Geopotential in vier, die Temperatur in zwei und die Feuchte in zwei Höhenschichten. Aus diesen Parametern werden zahlreiche weitere Größen abgeleitet, wie Vorticity, Advektion, Strömungskomponenten, Schichtdicken etc. Für den Einsatz des KLaMuKo und des WMSax2.0-Verfahrens (s. Abschnitt 1.4) sind 130 potenzielle Prädiktoren notwendig. Diese berücksichtigen in stärkerem Maße die hohen Luftschichten und die atmosphärische Labilität, was sich für die Beschreibung von Extremen als sinnvoll erwiesen hat.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Projektionsensembles

Globalmodell	Lauf	Szenario WEREX VI	Szenario WMSax2.0
ECHAM5	1	A1B	-
MPI ESM	1	RCP2.6	RCP2.6
MPI ESM	1	RCP4.5	RCP4.5
MPI ESM	1	RCP8.5	RCP8.5
MPI ESM	2	RCP2.6	RCP2.6
MPI ESM	2	RCP4.5	RCP5.5
MPI ESM	2	RCP8.5	RCP8.5
MPI ESM	3	RCP2.6	RCP2.6
MPI ESM	3	RCP4.5	RCP4.5
MPI ESM	3	RCP8.5	RCP8.5
CanESM2	1	RCP8.5	RCP8.5
MIROC5	1	RCP8.5	-
ECHAM5+CCLM (Kaskade)	1	A1B	-

2.2 Regionales Klima in Bodennähe

Während der Modellphase des Vorhabens wurde eine vorläufige Stationsliste aus dem Beobachtungsbestand des DWD verwendet. In der Ensemblephase, zu der dieser Bericht vorgelegt wird, stammen die Stationsdaten aus dem LfULG-Vorhaben „Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes“. Sie umfassen 32 qualitätskontrollierte Klimastationen mit lückengefüllten Messreihen von mehreren meteorologischen Parametern. Dies sind im Wesentlichen Stationen aus Sachsen (14 an der Zahl), ergänzt um Stationen der Umgebung: Bayern (5), Thüringen (4), Sachsen-Anhalt (5), Brandenburg (2), Polen (1) und Tschechien (1). Die einbezogenen Klimastationen sind in Abbildung 4 wiedergegeben.

Die Lückenfüllung wurde wie folgt vorgenommen (KRONENBERG, 2017: persönliche Mitteilung): Schritt 1 – Die Mitteltemperatur (TM) und der Niederschlag (RR) müssen für den Zeitraum 1971-2010 aus mindestens 75 % plausiblen Rohdaten bestehen, und die Reihe muss zu mindestens 99 % Lücken gefüllt sein. Die restlichen Lücken werden mittels eines ‚Referenzwertes‘ bzw. des ‚Mittelwertes aller vorhandenen Werte dieses Tages dieser Station‘ gefüllt. Der Referenzwert wurde im Rahmen des Projektes mittels der Normal Ratio Methode (Verwendung der Korrelationskoeffizienten zu benachbarten Stationen) berechnet. Schritt 2 – Für alle Stationen, die in Schritt 1 als TM-Station ausgewählt wurden, werden die restlichen Elemente hinzugefügt. Dabei werden nur Werte eingefügt, wenn für 1971-2010 mindestens 75 % plausible Rohdaten vorliegen und die Reihe zu mindestens 90 % Lücken gefüllt ist. Durch die Lockerung des Kriteriums werden es einige Reihen mehr. Die restlichen Lücken werden wie im ersten Schritt gefüllt.

Es ist anzumerken, dass diese 32 Stationen ausgewählt wurden, um mit WEREX VI die Stationsreihen für alle Elemente außer dem Niederschlag herzustellen.

Für den Niederschlag standen ab der zweiten Vorhabensphase die qualitätskontrollierten Messungen an 564 Niederschlagsstationen zur Verfügung (Abbildung 5). Aus Sachsen waren dies 194 Stationen, ergänzt mit Stationen der Umgebung: Bayern (33), Thüringen (90), Sachsen-Anhalt (149), Brandenburg (51), Polen (15) und Tschechien (32).

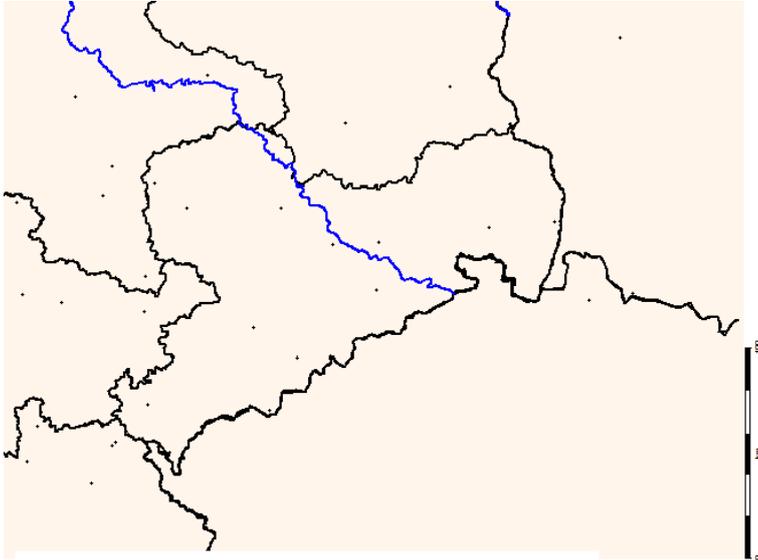


Abbildung 4: Lage der ausgewählten Klimastationen

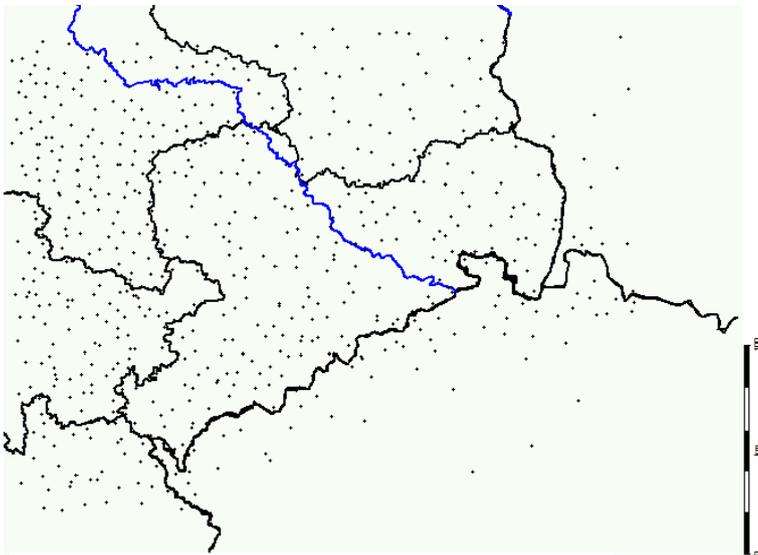


Abbildung 5: Lage der ausgewählten Niederschlagsstationen

Ein wichtiger Aspekt im Zusammenhang mit dem KLaMuKo-Verfahren besteht darin, räumliche Differenzierungen und sinnvolle Stationsgruppierungen vorzunehmen. Unter Verwendung der Daten von Klima- und Niederschlagsstationen Sachsens wurden mit einem objektiven Verfahren klimatische Räume für den Freistaat ermittelt (BERNHOFER und BARFUS, 2017). Die Studie zeigt auf, dass die Zahl der Klassen in Abhängigkeit der analysierten Zielgröße

durchaus unterschiedlich sein kann. Um beispielsweise das monatliche Maximum der Temperatur darzustellen, können zwei Klassen ausreichend sein, während es bei der gemeinsamen Betrachtung von Niederschlag, Temperatur und Verdunstung mehr als 20 Klassen sein können. Der monatliche Niederschlag lässt sich gut darstellen, wenn dafür 10 Klassen verwendet werden (siehe Abbildung 6). In den Klassen finden sich auch geografische Gliederungen gut wieder.

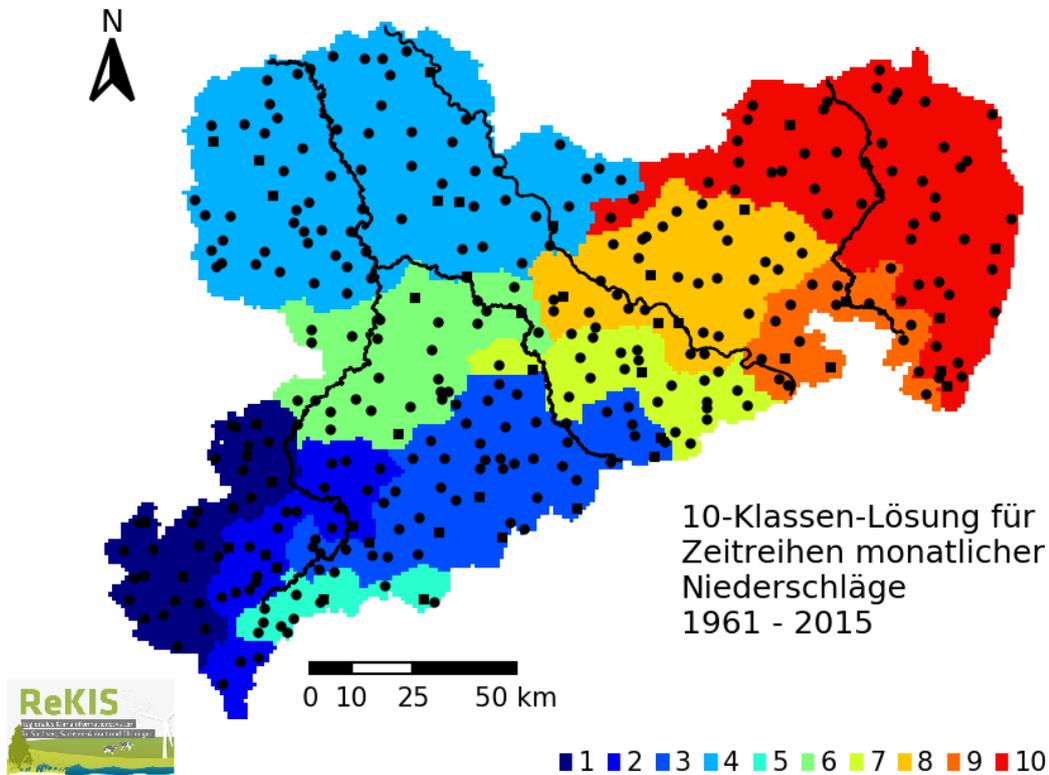


Abbildung 6: Räumliche Darstellung der Clusterlösung mit 10 Klassen für die Zeitreihen monatlicher Niederschläge (aus BERNHOFER und BARFUS, 2017)

2.2.1 Klimaregionen

Wenn eine so differenzierte räumliche Verteilung als Gliederung für Klimastationen angesetzt werden soll, entstehen Repräsentativitätsprobleme: Einige der Räume sind nur von zwei oder weniger Klimastationen besetzt, in einem (Raum 9) befindet sich gar keine Klimastation. Unter der Maßgabe, dass mindestens drei Klimastationen zur Repräsentativität vorhanden sein müssen, erfolgte eine weitere Aggregation mit dem Resultat, dass die Klimastationen in drei Klimaräume gegliedert werden können:

- Bergregion (Höhenlage oberhalb von 600 m ü. NN)
Stationen Fichtelberg (Region 5), Marienberg (Region 3) und Zinnwald-Georgenfeld (Region 3)
- Hügelland (Höhenlage zwischen 300 und 600 m ü. NN)
Stationen Bad Sohl/Elster (Region 2), Chemnitz (Region 6), Dippoldiswalde-Reinberg (Region 7) und Plauen (Region 1)
- Flachland (Höhenlage unterhalb von 300 m ü. NN)
Stationen Dresden-Klotzsche (Region 8), Garsebach (Region 8), Görlitz (Region 10), Kubschütz (Region 10), Leipzig/Halle Flughafen (Region 4), Leipzig-Holzhausen (Region 4) und Oschatz (Region 4).

Die objektive Klassifikation (BERNHOFER und BARFUS, 2017) kommt für temperaturbezogene Maße ebenfalls auf Klassenzahlen zwischen 2 und 5, was der Größenordnung von Klassen entspricht, die durch die Zusammenfassung von Räumen ebenfalls erzielt werden.

2.2.2 Niederschlagsräume

Die Niederschlagsstationen können hingegen in feiner aufgelöster Regionenaufteilung untersucht werden. Dazu wurde vom Auftraggeber eine Zuordnung in 10 Räume übermittelt.

■ Raum 1: Vogtland

Klimastation:	Plauen	386 m
Niederschlagsstationen:	Burgstein-Grobau	570 m
	Eichigt	450 m
	Eichigt-Tiefenbrunn	592 m
	Elsterberg	290 m
	Langenbernsdorf-True.	355 m
	Lichtentanne	353 m
	Mehltheurer	496 m
	Mühltruff	478 m
	Neukirchen-Dänkritz	310 m
	Neumark	378 m
	Oelsnitz_Vogtland	436 m
	Pausa-Wallengrün	407 m
	Weischlitz-Heinersgr.	517 m
	Werdau-Langenhessen	295 m

■ Raum 2: Elstergebirge und westliches Erzgebirgsvorland

Klimastation:	Bad Sohl (Elster)	560 m
Niederschlagsstationen:	Aue	387 m
	Bad Brambach-Raun.	600 m
	Eich	485 m
	Ellefeld	515 m
	Erlbach-Eubabrunn	565 m
	Hohndorf	415 m
	Kirchberg	380 m,
	Kirchberg-Stangengru.	450 m
	Lichtenstein-Heinrich	437 m
	Markneukirchen	555 m
	Rodewisch	464 m
	Schneeberg	450 m
	Stollberg-Gablenz	507 m
	Tirpersdorf	492 m
	Wildenfels-Härterdsdorf	355 m

■ Raum 3: Östliches Erzgebirge

Klimastationen:	Marienberg	639 m
	Zinnwald-Georgenfeld	877 m

Niederschlagsstationen:	Altenberg-Kipsdorf	550 m
	Altenberg-Schellerhaus	780 m
	Amtsberg-Weissbach	400 m
	Annaberg-Buchholz	630 m
	Augustusburg	451 m
	Bockau	509 m
	Burkhardtsdorf	405 m
	Crottendorf	652 m
	Drebach	490 m
	Einsiedel Talsperre	375 m
	Elterlein	600 m
	Eppendorf	448 m
	Frankenstein	400 m
	Geising	578 m
	Großhartmannsdorf	490 m
	Hartmannsdorf-Kirchb.	563 m
	Jöhstadt	715 m
	Kühnhaide	715 m
	Lengefeld Lauterbach	528 m
	Lengefeld Neunzehn.	419 m
	Marienberg-Reitzenha.	764 m
	Neuhausen_Erzgebirge	593 m
	Öderan	383 m
	Olbernhäuser	532 m
	Pockau	417 m
	Pockau-Forchheim	465 m
	Raschau	507 m
	Rechenberg-Bienenm.	761 m
	Sankt Michaelis	425 m
	Sayda	670 m
	Schönbrunn_Sachsen	400 m
	Stützensgrün-Hundsh.	604 m
	Tannenberg	532 m
	Zwönitz	497 m

■ Raum 4: Nordsächsisches Tiefland

Klimastationen:	Leipzig-Halle Flughafen	131 m
	Leipzig-Holzhausen	138 m
	Oschatz	150 m
Niederschlagsstationen:	Bad Dübener Mulde	89 m
	Belgern	120 m
	Bernbruch	168 m
	Colditz	192 m
	Dahlen-Großböhlen	138 m
	Diesbar-Seusslitz	100 m
	Drebligar	85 m
	Eilenburg	105 m

Elstertrebnitz	132 m
Falkenberg	115 m
Grimma	150 m
Gröditz	93 m
Großenhain-Skassa	125 m
Großenhain-Stroga	110 m
Jesewitz	127 m
Kletzen	120 m
Kölsa	115 m
Kossa-Durchwehna	115 m
Krensitz	110 m
Lausick, Bad Ebersba.	222 m
Lausick, Bad Glasten	182 m
Leuben	168 m
Lieberschützberg	125 m
Lonnewitz	130 m
Lossthal-Vogtshain	127 m
Machern	148 m
Markranstädt-Gross.	118 m
Mockrehna	102 m
Mutzschen	189 m
Obersteina	185 m
Ostrau	160 m
Pomssen	143 m
Riesa West	142 m
Röcknitz	118 m
Roetha Talsperre	131 m
Sausedlitz	88 m
Schildau	120 m
Schönwölkau-Brinn.	101 m
Taucha	127 m
Tiefensee	90 m
Trebsen	129 m
Trossin	105 m
Weidenhain	118 m
Weissig am Raschütz	150 m
Zehren	108 m
Zschortau-Broden.	106 m
Zwenkau-Zitzschen	125 m

■ Raum 5: Westliches Erzgebirge

Klimastation:	Fichtelberg	1213 m
Niederschlagsstationen:	Morgenröthe-Rautenkr.	672 m
	Oberwiesenthal	850 m
	Rittersgrün	673 m
	Schöneck-Krottenheide	768 m
	Sosa Talsperre	650 m
	Zwota	695 m

■ Raum 6: Erzgebirgsbecken, Muldetal

Klimastation:	Chemnitz	418 m
Niederschlagsstationen:	Braunsdorf	300 m
	Burgstwedt	325 m
	Callenberg	325 m
	Geringswalde-Altger.	296 m
	Höfchen-Kriebstein	212 m
	Ketzerbachtal-Kless.	213 m
	Limbach-Oberfrohna	345 m
	Narsdorf	275 m
	Niederstriegis	198 m
	Niederwiesa	295 m
	Reinsberg	265 m
	Rochlitz	185 m
	Streigistal-Böhringen	240 m
	Wechselburg-Meusen	237 m

■ Raum 7: Östliches Erzgebirgsvorland

Klimastation:	Dippoldiswalde-Reinb.	365 m
Niederschlagsstationen:	Bielatal	364 m
	Fürstenwalde	679 m
	Klingenberg Talsperre	395 m
	Oberbobritzsch	430 m
	Oberschöna-Braunsd.	390 m
	Oelsen	555 m
	Rosenthal-Bielatal	460 m
	Tharandt-Grillenburg	384 m

■ Raum 8: Elbtal

Klimastationen:	Garsebach bei Meißen	157 m
	Dresden-Klotzsche	227 m
Niederschlagsstationen:	Bischofswerda	300 m
	Burkau-Kleinhänichen	205 m
	Coswig	110 m
	Dresden-Gohlis	106 m
	Großharthau	283 m
	Grumbach	290 m
	Langebrück	213 m
	Laussnitz-Glauschn.	167 m
	Oberlichtenau-Nieder.	220 m
	Pulsnitz	270 m
	Radeburg	153 m
	Rammenau	301 m
	Spittwitz	215 m
	Steinbach	179 m
	Stolpen	260 m

Tanneberg	248 m
Tauscha-Würschnitz	170 m
Triebischtal-Munzig	200 m

■ Raum 9: Sächsische Schweiz, Westlausitzer Hügelland

Keine Klimastation

Niederschlagsstationen:	Berthelsdorf	342 m
	Eibau-Walddorf	444 m
	Jonsdorf Kurort	434 m
	Oppach	320 m
	Polenz	335 m
	Porschdorf	190 m
	Reinhardtsdorf	232 m
	Schöna Sä.Schweiz	280 m
	Wehrsdorf	335 m

■ Raum 10: Ostsachsen, Oberlausitz

Klimastationen:	Görlitz	232 m
	Kubschütz Kr. Bautzen	238 m
Niederschlagsstationen:	Bernsdorf Kr. Kamenz	145 m
	Elsterheide-Geiersw.	108 m
	Görlitz-Kunnerwitz	271 m
	Groß Düben	133 m
	Hähnichen	155 m
	Halbendorf (Spree)	140 m
	Hohendubrau-Gebelzig	196 m
	Hoyerswerda	118 m
	Kemnitz	325 m
	Klitten	132 m
	Königshain	270 m
	Königswartha	140 m
	Krauschwitz-Klein Pr.	135 m
	Löbau	249 m
	Lohsa	125 m
	Bad Muskau	125 m
	Neißeau	180 m
	Niederoderwitz	308 m
	Olbersdorf	305 m
	Radibor-Quoos	155 m
	Reinersdorf	140 m
	Rosenbach-Bischdorf	265 m
	Schönfeld	135 m

Für diese Einteilung in 10 Räume wurden KlaMuKo-Analysen für den Betrag des Niederschlags angefertigt. Diese Größe wurde mit KlaMuKo auch auf der Basis von drei Klimaregionen und dem Niederschlag, der an den Klimastationen registriert wird, durchgeführt (s. Abschnitt 4.2.4 und 4.2.5).

3 WMSax2.0 – WEREX und KlaMuKo

3.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Die Zusammenführung der beiden statistischen Verfahren ist in einer Machbarkeitsstudie (SPEKAT und ENKE, 2016A) veranschaulicht worden. Dabei ist als Ergebnis von Untersuchungen mit den Klimaverhältnissen der Gegenwart festzuhalten, dass mit KlaMuKo sehr viel besser auf Extreme eingegangen werden kann als es ein eher Mittelwert-orientiertes Verfahren wie WETTREG/WEREX vermag.

Es besteht darüber hinaus großes Interesse, Aussagen zu zukünftigen Extremen zu gewinnen, also das Extremverhalten des Klimas auf Grund von *Klimaprojektionen* zu beschreiben. Die Machbarkeitsstudie zu WMSax2.0 (SPEKAT und ENKE, 2016A) wies einen Weg und zeigte Verbesserungspotenziale bei der Beschreibung zahlreicher Extreme durch KlaMuKo. Bei der räumlichen Auflösung, für die die Extreme im Freistaat Sachsen bestimmt werden können, ist auf Grund der Verteilung der Klimastationen eine Untergliederung in die drei Räume Bergregion, Hügel-land und Flachland möglich (vgl. Abschnitt 2.2.1). Beim Niederschlag kann eine Unterteilung in 10 Räume vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 2.2.2)

Wichtig ist dabei: Eine Klassifikation wie KlaMuKo bildet mehrere Klassen, in denen nur Extreme enthalten sind. Dies ist eine bemerkenswerte Besonderheit, denn gerade bei der Erzeugung solcher Klassen haben herkömmliche Klassifikationsverfahren große Schwierigkeiten. Mit einer Klassifikation, die Extreme isoliert, kann auch systemanalytisch ermittelt werden, welche großräumig verfügbaren atmosphärischen Parameter zur Bestimmung einer regionalen Zielgröße (Prädiktand) dienlich sind. Es darf aber nicht übersehen werden, dass es überhaupt Beziehungen zwischen dem Prädiktanden und großräumigen Zuständen in der Atmosphäre geben muss, damit das Verfahren arbeiten kann.

Während WETTREG/WEREX mit einem Bestand von 60 potenziellen Prädiktoren – aus denen vier bis fünf ausgewählt werden – adäquat in der Lage ist, den mittleren Zustand der Atmosphäre zu erfassen ist es für einige Problemstellungen bei den Extremen zielführend, diesen Bestand auf deutlich über 100 potenzielle Prädiktoren zu erweitern. Zur Erinnerung: In KlaMuKo werden extreme Größen als Prädiktand eingesetzt, wobei die relativ kleine Menge von 60 Prädiktoren zum Beispiel nicht optimal für die Beschreibung von Starkniederschlags- oder Gewitterereignissen ist.

Die Machbarkeitsstudie ergab, dass zunächst auf der Ebene der Diagnostik gearbeitet werden sollte. Das heißt, die hergeleiteten Beziehungen sollen Verbindungen herstellen zwischen gemessenen regionalen Klimaparametern und gemessenen Atmosphärenfeldern – aus Reanalysedaten. Die Übertragung dieser Beziehungen auf Klimamodell-Projektionen war immer dann erfolgreich, wenn sie sich auf Bodenparameter wie die Temperatur und einige mit ihnen verbundene Klimaindikatoren bezog.

Bei der Anwendung der diagnostisch gefundenen Beziehungen auf Projektionsrechnungen eines Klimamodells stellte sich des Weiteren heraus, dass für einige Zielgrößen (Prädiktanden) in den Projektionen keine adäquate Beschreibung durch die KlaMuKo-Klassen möglich war (SPEKAT, ENKE und KREIENKAMP, 2014). Zur Veranschaulichung der Problematik sei auf Abbildung 7 verwiesen. In dieser Darstellung ist in jeder der drei Teilfiguren die Häufigkeitsverteilung der Werte des Geopotenzials, der Temperatur bzw. der relativen Feuchte in 850 hPa an der Koordinate 50°Nord und 10°Ost dargestellt. Der klimatologische Mittelwert wird dabei aus den Daten der NCAR2-Reanalysen ermittelt und ist jeweils mit blauen Linien dargestellt. Die roten und gelben Linien zeigen jeweils die Häufigkeitsverteilungen aus dem MPI-ESM Modell. 20C-Daten (Resimulationen des Gegenwartsklimas) sind rot

und Ergebnisse der Klimaprojektion unter Antrieb des Szenarios RCP8.5 (Simulation des Zukunftsklimas 2071-2100) sind dabei gelb eingezeichnet.

Häufig wird im Zuge der Screening-Analyse festgestellt, dass Temperatur, Geopotenzial oder abgeleitete Größen, die sich nur aus diesen beiden Parametern herleiten, zur Beschreibung des Prädiktanden benötigt werden. Problematischer wird es bei Prädiktanden, die zur Beschreibung an prominenter Stelle Feuchtinformation benötigen. Weitere Analysen legen Schwachstellen in den Modelldaten an den Tag. So werden verbreitet Häufigkeitsverteilungen der Feuchte simuliert, die deutlich von den gemessenen abweichen. Dies ist sowohl für die Resimulation der Gegenwart (20C-Daten) als auch für die Zukunftsprojektionen, angetrieben mit Treibhausgas-Szenarios, der Fall. Im Bereich der hohen Feuchtwerte sind in den Simulationen große Überschätzungen zu verzeichnen.

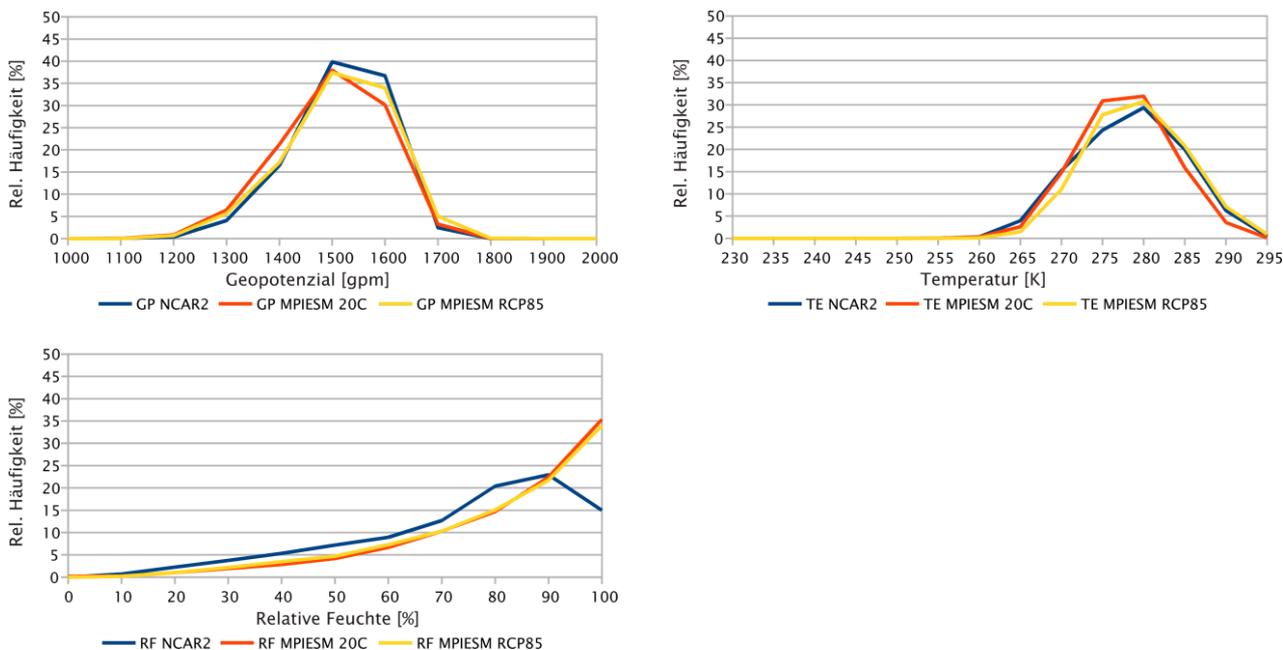


Abbildung 7: Relative Häufigkeit der 850-hPa-Werte für Geopotenzial (oben links), Temperatur (oben rechts) und relative Feuchte (unten links) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume; Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979-2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979-2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071-2100

Ergänzend ist in Abbildung 8 die Häufigkeitsverteilung für die relative Feuchte in den Niveaus 850 hPa, 700 hPa und 500 hPa dargestellt. Es ist erkennbar, dass in allen Niveaus deutliche Abweichungen zwischen den NCAR-Daten und den Klimamodelldaten existieren. Dabei treten in höheren Niveaus diese Abweichungen bei mittleren, niedrigen und hohen relativen Feuchten auf. Die Überschätzung der hohen Feuchten ist das wichtigste Phänomen.

Feuchtegrößen sind, wie die Praxis zeigt, in zahlreichen Prädiktorenkombinationen enthalten und es müssen für solche Fälle Auswege gesucht werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Feuchtegrößen generell aus dem Bestand der potenziellen Prädiktoren zu entfernen. Das ist bei vielen Temperaturgrößen auch ohne große Qualitätseinbußen möglich, aber in anderen Fällen ist die Feuchteinformation schwer verzichtbar.

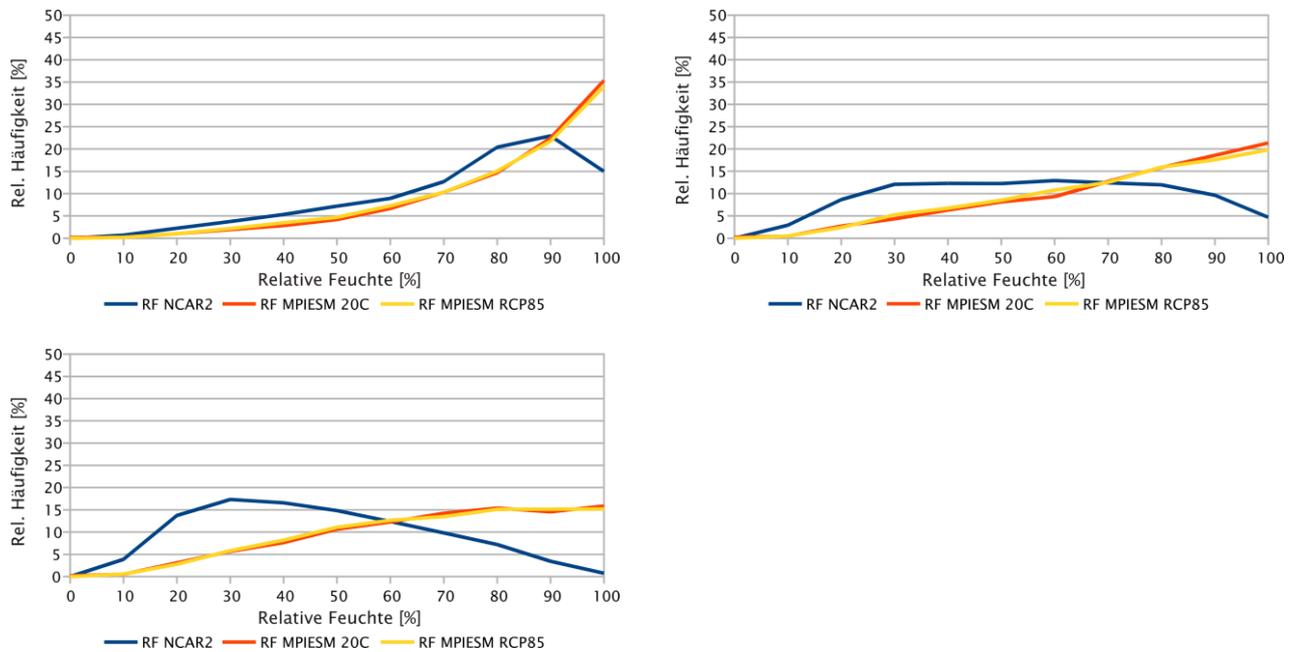


Abbildung 8: Relative Häufigkeit der Werte für die relative Feuchte 850 hPa (oben links), 700 hPa (oben rechts) und 500 hPa (unten links) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume; Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979-2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979-2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071-2100

Im bisherigen Verlauf der Argumentationskette wurde KlaMuKo beschrieben. Es hat seine ausgewiesene Leistungsfähigkeit bei der Diagnose von Zusammenhängen zwischen regionalen Extremen und dem großräumigen Atmosphärenzustand. Es zeigen sich aber auch Defizite bei der Analyse von Klimaentwicklungen bei den projizierten starken Extremen.

Auf der anderen Seite gibt es ein Werkzeug, WEREX, das gut geeignet ist, mittlere Klimazustände und ihre Zukunftsentwicklung darzustellen. Es liegt nahe, zu versuchen, die Verfahren WEREX und KlaMuKo zu WMSax2.0 zusammenzuführen.

Mit der neuen Version VI von WEREX erfolgt eine Regionalisierung von Läufen großräumiger Zirkulationsmodelle. Diese baut methodisch auf der Kette der bisherigen WEREX-Entwicklungen auf. Dabei geht WEREX VI in diesen Aspekten über die vorherige Version WEREX V hinaus:

- Nutzung eines hochwertig qualitätskontrollierten Datensatzes der Klimastationen im Raum Sachsen – dies sollte Teil des Outputs eines anderen, parallel anzustoßenden Vorhabens in Sachsen sein.
- Erweiterung des Zeitraums der Nutzung von Klimadaten um die Jahre 2010-2015 für die WEREX-Regionalisierungen; dies würde die Vielfalt der Episoden steigern und z. B. einer verbesserten Abbildung der Variabilität des antreibenden Klimamodells dienen.
- Nutzung der neuesten Generation von Globalmodellen als Antrieb; in den vorherigen Versionen von WEREX waren dies die Modelle der „Generation IPCC TAR“ bzw. „Generation IPCC FAR“. Inzwischen liegen im Rahmen des Forschungsprogramms CMIP5 Simulationen von zahlreichen weiter entwickelten Modellen vor – zum Teil sind dies so genannte Erdsystem-Modelle (ESM).
- Nutzung der neuesten Generation von Szenarios. Die vorherigen WEREX-Versionen verwendeten Szenarios, die sich in ihrem Kern an den Emissionen von Treibhausgasen orientieren. Diese so genannten SRES-Szenarios (in

der ihnen eigenen Nomenklatur z. B. mit A1B, A2 oder B1 bezeichnet) sind inzwischen durch RCP-Szenarios abgelöst werden, in deren Fokus die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre steht. Die seitdem verwendete Nomenklatur ist RCP2.6, RCP4.5 oder RCP8.5 (Abkürzung für Representative Concentration Pathways).

Auch wird der Ensemble-Gedanke aus WEREX V weitergeführt, sodass für das Vorhaben ebenfalls mehrere Modelle und Szenarios als Antrieb für WEREX zum Einsatz kommen werden.

Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet. Für einige Nutzer entstehen dabei bereits mit WEREX regionalisierte Projektionen, die direkt weiter verwendbar sind – sofern der Fokus stärker auf den mittleren Klimabedingungen und weniger auf den Extremen liegt. Sollte das Interesse hingegen stärker bei den Extremen liegen, ist die Hinzunahme von KLaMuKo oder sogar das Potenzial der Nutzung der vollen WMSax2.0-Kette angezeigt.

3.2 Neuartige Nutzung von Reanalysedaten in den regionalisierten Projektionen

Wie die Machbarkeitsstudie zeigte, ist die Einbeziehung von WEREX-Ergebnissen als Datenquelle für KLaMuKo für die Ermittlung der zukünftigen Extreme förderlich, wie sich bei Analysen im Rahmen dieses Projektes herausstellte. Von zentraler Bedeutung dabei war die Rückbesinnung auf den Wettergenerator nach KREIENKAMP, SPEKAT und ENKE (2013), einem Kernbestandteil von WEREX. Der Wettergenerator synthetisiert Zeitreihen von meteorologischen Parametern an Stationsorten. Die synthetisierten Reihen werden aus Segmenten von gemessenen Zeitreihen gebildet. Ein Regelwerk von Steuerungsbedingungen wird vom Wettergenerator zur Auswahl bzw. dem Verwerfen von Segmenten verwendet. Die wichtigsten Steuerbedingungen sind: (i) Reproduktion der sich ändernden Häufigkeitsverteilung der WEREX-Zirkulationsmuster¹, (ii) Vermeidung von starken Brüchen zwischen den Segmenten und (iii) Verwendung von Episoden, die sich innerhalb eines begrenzten Zeitfensters um den Zeitpunkt im Jahr (an dem sie eingesetzt werden sollen) und innerhalb eines Zeitfensters der Modelljahre (n Jahre zuvor und n Jahre danach) befinden.

Die Ergebnisse der Klimamodelle sind unverzichtbares Basismaterial für die Regionalisierung des zukünftigen Klimas. In der bisher praktizierten Form wurden die vom Klimamodell simulierten Felder benutzt, um aus ihnen einen wesentlichen Indikator für die simulierten Klimaänderungen zu gewinnen: Die geänderten Häufigkeitsverteilungen der Zirkulationsmuster, die definitionsgemäß an Temperatur-Wertebereiche (und für eine zweite Kategorie von Zirkulationsmustern an Niederschlags-Wertebereiche) gekoppelt sind. Ein Erwärmungssignal findet sich folglich im „Aussterben“ einer kalten und im Anwachsen einer warmen Klasse wieder. Nachdem nun aus dem Archiv der Episoden des Gegenwartsklimas vom Wettergenerator diejenigen selektiert und zu Zeitreihen synthetisiert wurden, mit denen ein sich wandelndes Klima bestmöglich reproduziert werden kann, entsteht aber eine gewisse Schiefelage. Die Verbindung zwischen dem aus Messungen bestehenden Klima am Boden (in den Segmenten der synthetisierten Zeitreihen) und dem modellierten Klima ist nicht optimal. Zur Veranschaulichung: Das spezifische „Wetter“ eines zukünftigen Zeitraums, also die dorthin platzierte Episode aus dem Gegenwartsklima, ist relativ locker mit dem

¹ ACHTUNG! Diese sind nicht mit den KLaMuKo-Klassen zu verwechseln. WEREX-Klassen liegt eine ganz andere Philosophie zu Grunde. Zwar beschreiben WEREX-Klassen auch die atmosphärischen Verhältnisse, jedoch verbunden mit bestimmten Temperatur-Wertebereichen bzw. Niederschlags-Wertebereichen. Das Augenmerk liegt aber auf einer guten Repräsentation mittlerer Klimaverhältnisse. KLaMuKo-Klassen stehen für „Wirkstoffkombinationen“ von mehreren atmosphärischen Größen, mit denen sich regionale Extreme effizient herausarbeiten lassen.

vom Klimamodell simulierten atmosphärischen Geschehen dieses Zeitraums verbunden. Die Verbindung entsteht, weil eine Art „Makrosignal“ der Simulationen ausgewertet wird: Die in der Gegenwartsepisode enthaltenen Zirkulationsmuster sind dienlich, die geforderte, vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster in der Simulation für einen Zeitbereich gut anzunähern.

Es sei ein schematisches Beispiel angeführt. Um den 07.09. bis 14.09.2074 in einer synthetisierten Boden-Zeitreihe dazustellen, sei vom Wettergenerator z. B. eine Episode vom 11.09. bis 18.09.1998 in die Zeitreihe eingesetzt worden. Die Kriterien für das Einsetzen dieser Episode umfassen, dass die Zirkulationsmuster der Episode aus dem September 1998 förderlich dazu beitragen, die vom Modell vorgegebene Häufigkeitsverteilung der Muster für den Zukunftszeitraum anzunähern. Die physikalischen Eigenschaften der oberen Atmosphäre werden aber auch davon diktiert, was das GCM vorgibt. Das muss nicht stimmig mit den Bodeneigenschaften sein. Die in der Machbarkeitsstudie vorgeschlagene und in WMSax2.0 umgesetzte Idee besteht darin, nachdem einmal die Episode mit den Bodendaten aus dem September 1998 in der synthetisierten Zeitreihe verwendet wurde, ebenfalls diese Episode aus den Reanalysedaten zu nutzen. Das heißt, alle Atmosphärenfelder der GCM-Simulation des Zeitraums 07.-14.09.2074 werden durch die Reanalysedaten des Zeitraums 11.-18.09.1998 ersetzt. In der Folge entstehen Zeitreihen, in denen freie Atmosphäre und Boden stärker in Zusammenhang stehen.

Anmerkung: Für WEREX ist diese Problematik und deren Lösung durch das Verwenden von Reanalyse-Episoden ohne Bedeutung, denn es wird nach dem Einsatz des Wettergenerators ausschließlich mit den synthetisierten Zeitreihen am Boden gearbeitet und nicht wie bei KLaMuKo, eine erneute Identifikation von Beziehungen zwischen Boden und freier Atmosphäre ausgeführt.

3.3 Besondere Beachtung von Trends

Einiges Nachdenken wurde darauf verwendet, welche Auswirkungen das neue Vorgehen auf Trends hat. Durch das Ersetzen der GCM-Episoden mit Reanalysedaten geht zunächst einmal Trendinformation verloren. Das GCM simuliert ja eine zeitliche Entwicklung. Größen wie die relative Topografie oder die Vorticity (Wirbelstärke einer Strömung) haben dabei einen modellspezifischen Trend. Dabei wurde die Auswahl der Episoden durch den Wettergenerator eingedenk der modellspezifischen Trends vollzogen: Es galt, den sich ändernden Häufigkeitsverteilungen der WEREX-Muster zu folgen. Diese können auch als GCM-simulierte Trends interpretiert werden.

Die NCAR-Reanalysen hingegen, aus denen die ersetzten Episoden stammen, besitzen diese zukünftigen Trends nicht. Die Lösung besteht darin, für jedes Feld im GCM eigene Trends zu bestimmen. Damit ist für jedes Feld an jedem Tag der Zukunft bekannt, welcher feldspezifische Trendzuschlag oder -abschlag anzubringen ist. Allerdings wird der in den einzelnen GCM-Feldern bestimmte Trend nicht in voller Höhe aufgeprägt, da bereits über die Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung ein Teil des Trends vorhanden ist. Zum Einsatz kommt die Differenz aus beiden Trends. Es müssen zunächst Trends in den Feldern der Atmosphäre (die in den multiplen Regressionen Verwendung finden) beachtet werden. Dabei ist eine begriffliche Trennung von zwei Trendquellen notwendig: (i) Der Trend, der durch die Vorgabe einer sich wandelnden Häufigkeitsverteilung der Zirkulationsmuster entsteht (Stichwort: Verlagerung der Häufigkeit von den kalten zu den warmen WEREX-Klassen) und (ii) der Trend, der in den Feldern selber steckt und vom Klimamodell simuliert wird. Beide sind nach dem oben geschilderten Ersetzen von simulierten Feldern durch Reanalysefelder vermischt.

Mit anderen Worten beschrieben: Der konkrete Trend besteht aus zwei Komponenten. Ein Teil ist durch die selektierten Bodenepisoden entstanden und ein Teil entsteht durch das Trendverhalten der Felder des GCM. Werden nun die GCM-Episoden durch Episoden aus den Reanalysedaten ersetzt, so bleiben die per Selektion der Boden-

episoden zu Stande gekommenen Trends erhalten; es ist darüber hinaus notwendig, die (trendfreien) Reanalyse-daten mit dem GCM-spezifischen Trend der einzelnen Felder auszustatten.

Zur Behandlung der Felder der freien Atmosphäre kann wie folgt vorgegangen werden:

- Das Klimamodell liefert tägliche Felder des Geopotenzials, der Temperatur und der Feuchte auf den Flächen 1000 hPa, 700 hPa und 500 hPa zwischen den Jahren 1951 und 2100. Daraus wird der jahreszeiten-spezifische lineare Trend für jeden Gitterpunkt bestimmt.
- Die über die Datumsangaben zugeordneten NCAR-Felder enthalten aber schon einen Trend, der sich aus der Änderung der Wetterlagenhäufigkeit ergibt.
- Der resultierende Trend ist der Trend des Klimamodells verringert um den Trend, der sich über die Änderung der Wetterlagen ergibt.

Die Zielgröße (Prädiktand) kann aus sehr unterschiedlichen Bereichen stammen. Sie kann ein Klimaparameter am Boden sein, beispielsweise die Temperatur oder der Niederschlag an den Stationen. Sie kann aber auch ein Klimaindikator, beispielsweise das Überschreiten einer Schwelle sein. Sie kann auch eine komplexe Größe wie das Auftreten von Gewittern oder eine aus mehreren Parametern kombinierte Größe sein. Zur Erinnerung: Der Prädiktand wird durch eine Kombination von Prädiktoren beschrieben. Die Prädiktoren entstammen atmosphärischen Feldern. Wird diesen Feldern ein Trend aufgeprägt, wie oben beschrieben, dann hat dies natürlich einen Einfluss auf das zeitliche Verhalten des Prädiktanden. Folgende Schritte sind bei der Behandlung des Prädiktanden zu beachten:

- Selektion: über eine multiple Regressionsanalyse werden diejenigen Felder selektiert, die für die Zielgröße relevant sind;
- Aufprägung: die Änderung der Felder ergibt eine Änderung der Zielgröße, die wiederum auf die Zielgröße aufgeprägt wird.

3.4 Zur Plausibilisierung von Klimaprojektionen

Ein Modell-Ensemble, wichtiger Gegenstand der Untersuchungen in der Projektphase II, erfordert die Beachtung zusätzlicher Sachverhalte:

- Elementspezifische Datenverfügbarkeit: Nicht alle Modelle in Tabelle 1 stellen alle Elemente zur Verfügung. Bei einzelnen Ensemblebetrachtungen sind daher gegebenenfalls einzelne Mitglieder, bei denen dies der Fall ist, auszuschließen.
- Wertebereiche: Hier werden Vergleiche mit der vorherigen, ebenfalls auf ein Ensemble abzielenden Studie WEREX V hinzugezogen, um die Plausibilität der in WEREX VI erzeugten Projektionen abzuschätzen. Insbesondere sind hier Ensemblediagramme, in denen gleichzeitig Temperatur- und Niederschlagssignale dargestellt werden, von Bedeutung.
- Verteilungsfunktion: Auch hier gibt es Vergleichsmöglichkeiten, z. B. bezüglich Häufigkeitsverteilungen von Temperatur oder Niederschlag, wie sie in WEREX V analysiert wurden.
- Vertikalgradienten: Für ausgewählte Stationspaare, die relativ dicht beieinander liegen und dabei über einen großen Höhenunterschied verfügen, werden Analysen von Veränderungen, insbesondere bei der Temperatur durchgeführt.

- **Konsistenz des Niederschlags:** Für eine ausgewählte Stationsgruppe werden Korrelationen des Niederschlags in Abhängigkeit von der Entfernung, sowie die Veränderung dieser Korrelationen für verschiedene zukünftige Zeitabschnitte ermittelt.
- **Geeignete Darstellungen:** Mit den Empfehlungen in den Leitlinien zur Analyse regionaler Klimamodell-Ergebnisse konform ist die oben erwähnte Trenddarstellung für Temperatur und Niederschlag. Aber auch Bänderdiagramme, die die regionalen Wertebereiche von Klimavariablen, Klimaindikatoren oder Klimasignalen darstellen, werden eingesetzt.

In diesem Bericht werden Beispiele zur Beurteilung von grundlegenden Eigenschaften des Modell-Ensembles vorgestellt. Für Untersuchungen, die weiter in die Tiefe gehen und Details des Ensembles beleuchten, werden sowohl die Daten des WEREX VI-Teils als auch diejenigen des KlaMuKo-Teils umfänglich ausgeliefert, beide in ASCII-Form.

4 Ausgeführte Arbeiten in Projektphase II

4.1 WEREX VI – Ensembleuntersuchungen

Das mit WEREX VI für Sachsen regionalisierte Modellensemble wird in Tabelle 1 vorgestellt. In Phase I wurde mit einem vorläufigen Datensatz von Klimastationen eine vorläufige Regionalisierung durchgeführt (unter Antrieb des Globalmodells MPI-ESM Lauf 1 und dem Treibhausgasszenario RCP8.5). In Phase II erfolgten alle WEREX VI Regionalisierungen unter Nutzung des qualitätskontrollierten Datensatzes aus dem LfULG-Vorhaben „Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes“.

4.1.1 Ergebnisse Temperatur

Als erstes soll veranschaulicht werden, wie die einzelnen Ensemblemitglieder die Jahresmitteltemperatur des Zeitraums 1971-2000 darstellen. Das Ensemblebalkendiagramm (Abbildung 9) gibt in Form von waagerechten Balken wieder welcher Wertebereich für jede untersuchte Modellierung in Sachsen auftritt. Es wird also eine Karte berechnet (aber nicht grafisch dargestellt). Danach werden die in der Karte enthaltenen Temperaturwerte der Größe nach sortiert und analysiert, welche Temperaturbeträge zur Charakterisierung der Karte nutzbar sind. Der etwas breitere schwarz eingefärbte Bereich zeigt an, welche Temperaturwerte zwischen 25 % (linkes Ende) und 75 % (rechtes Ende) des gesamten Wertebereichs liegen. Dieser Bereich wird auch das Interquartil genannt – er stellt die mittleren 50 % aller vorgefundenen Temperaturwerte dar. Die Bereiche außerhalb des Interquartils sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Eine rote Markierung im schwarzen Balken gibt denjenigen Wert an, der in der Mitte des Bereichs liegt. Dieser wird auch der Median genannt.

In ähnlicher Weise können auch Klimasignale veranschaulicht werden. Die Daten für Abbildung 10 wurden so aufbereitet, dass für die Fläche Sachsens in hoher Auflösung die Differenz der mittleren Jahrestemperatur zwischen den Zeitabschnitten 1971-2000 und 2071-2100 gebildet wurden. Alle im WEREX VI Ensemble enthaltenen Szenariorechnungen sind mit ihren zugehörigen Temperaturänderungen dargestellt. Die fünf Simulationen, die mit dem Szenario RCP8.5 angetrieben wurden, sind in Abbildung 10 in Form der fünf obersten Balken dargestellt. Es wird deutlich, dass im Modellvergleich die WEREX-Simulation mit dem Modell CA2 einen besonders starken Temperaturanstieg von rund 5° innerhalb von 100 Jahren aufweist. Die drei untersuchten Läufe von MPI ESM (ECHAM 6) zeigen Anstiege im Bereich um 3,5° und die Simulationen mit MIROC ergeben relativ geringe Änderungen der Mitteltemperatur um 2,5°. Die WEREX VI-Simulationen mit ECHAM 5, dem Vorgängermodell von MPI ESM angetrieben mit dem SRES Treibhausgasszenario A1B zeigen ein ähnliches Temperaturänderungsverhalten wie die MPI ESM-Simulationen. Die Modellkaskade ECHAM 5 (SRES A1B) → CLM → WEREX VI weist ein ähnlich geringes Anstiegssignal wie die Resultate mit RCP8.5 und dem MIROC5 Modell auf. Für die drei MPI-ESM-Läufe wurde WEREX VI auch zur Regionalisierung, angetrieben mit den Szenarios RCP4.5 und RCP2.6 benutzt (letzte und vorletzte Gruppe mit jeweils drei Balken in Abbildung 10). Es zeigt sich, dass die Beträge des jeweiligen Temperaturanstiegs jeweils gut voneinander abgegrenzte Wertebereiche darstellen: Die MPI-ESM Läufe mit RCP4.5, regionalisiert mit WEREX VI errechnen dabei Temperatursignale um 2° und für die Antriebe mit RCP2.6 werden 1° bis 1,5° bestimmt. Die Temperatursignale in den Sommermonaten (nicht dargestellt) liegen dabei tendenziell etwas höher als die Signale der Jahresmitteltemperatur.

Die zeitlichen Verläufe über den gesamten Modellierungszeitraum von 1951 bis 2100 sind in Abbildung 11 dargestellt. Deutlich zeigt sich, dass Ca2 ein Ensemblemitglied ist, was nach 2000 durchweg den oberen Rand des Ensemblebereichs bildet. MIROC5 zeigt seine Charakteristik als Ensemblemitglied mit relativ geringem Temperatursignal insbesondere ab der Mitte des 21. Jahrhunderts.

Alternativ kann auch die räumliche Verteilung des Mittels aus mehreren Ensemblemitgliedern dargestellt werden. Für die fünf Mitglieder unter RCP85-Antrieb ist dies in Abbildung 12 geschehen. Dort ist erkennbar, dass aus diesem Ensemble geschlossen werden kann, dass relative starke Temperatursignale im Bereich des mittleren Erzgebirges und seinem Vorland auftreten.

Ensemble aus 8 Projekten (Bänder der Häufigkeiten): 1971_1980; 1981_1990; 1991_2000; Mittel_Tempe: meteorologisches Jahr

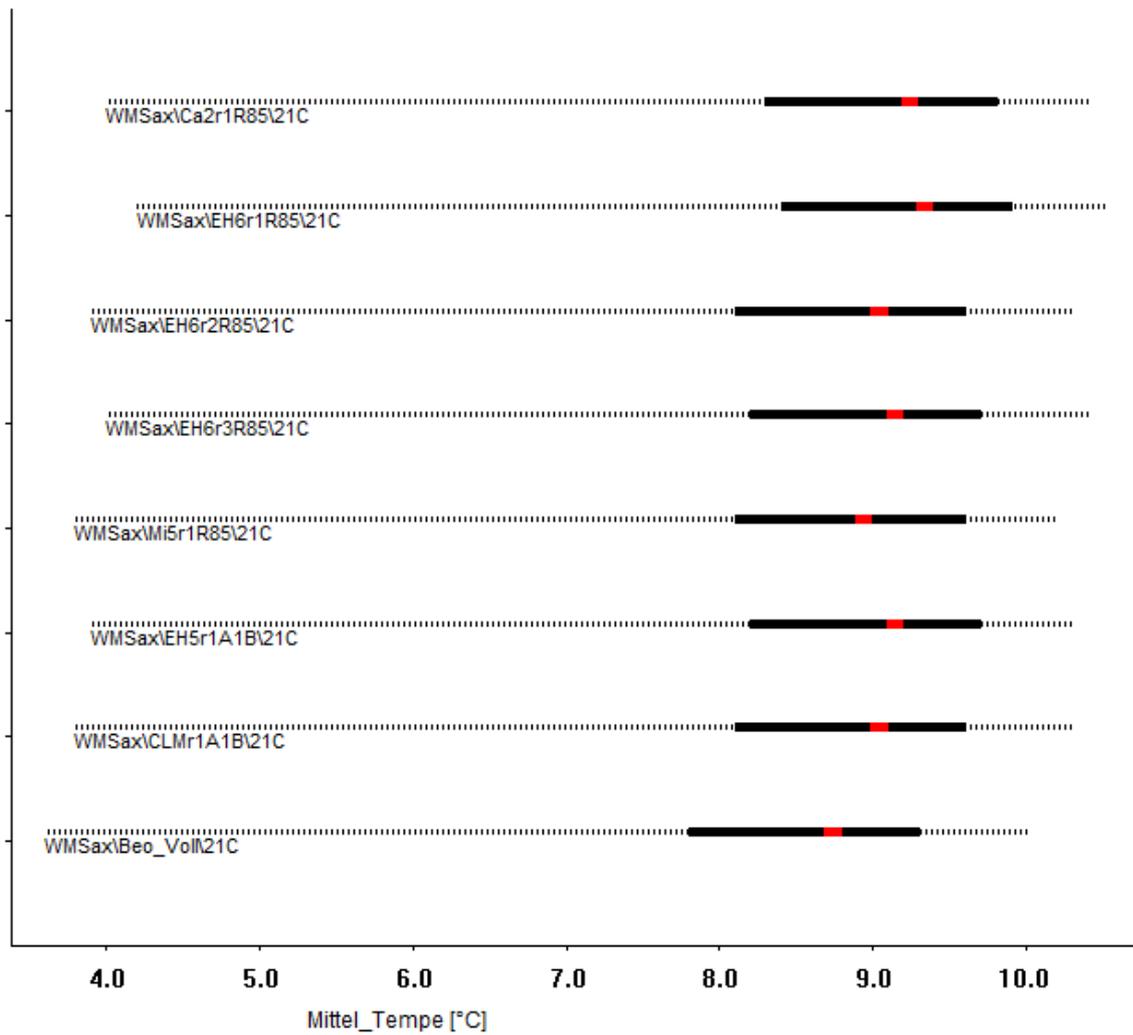


Abbildung 9: Jahresmitteltemperatur in Sachsen für das WEREX VI-Ensemble mit RCP85-Antrieb sowie die Klimamessungen (unterster Balken)

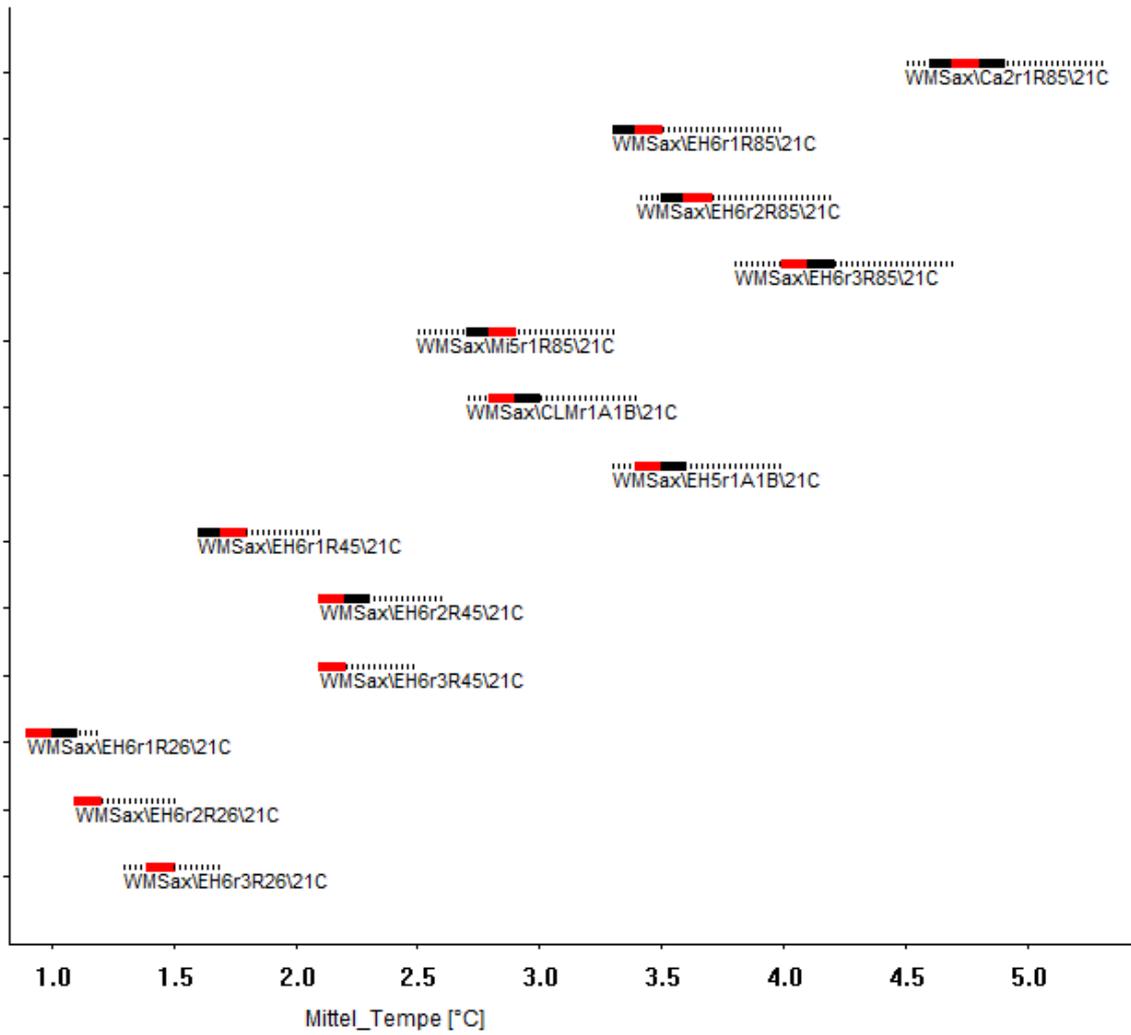


Abbildung 10: Änderung der Jahresmitteltemperatur in Sachsen zwischen 1971-2000 und 2071-2100 für das WEREX VI-Ensemble

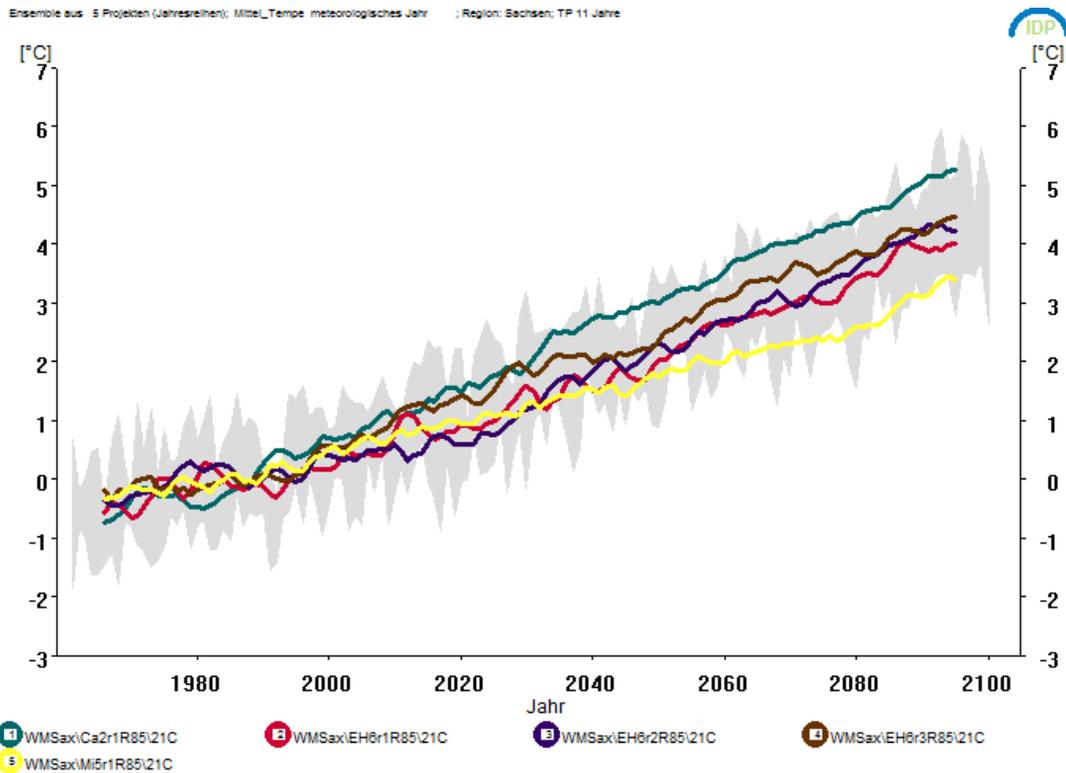


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der simulierten Jahresmitteltemperatur für die fünf Ensemblemitglieder mit dem Szenario RCP85 von 1951 bis 2100

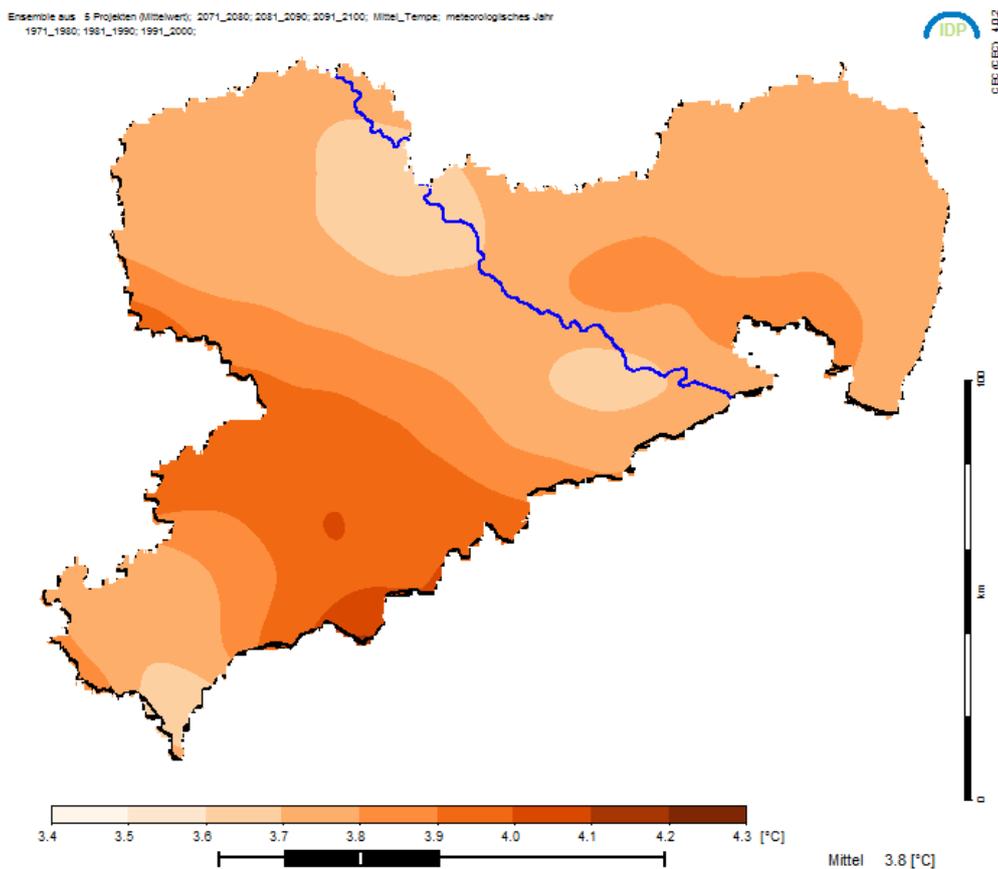


Abbildung 12: Änderung der Jahresmitteltemperatur in Sachsen als Mittel des Ensembles von fünf WEREX VI-Simulationen mit Antrieb RCP8.5

4.1.2 Ergebnisse Niederschlag

Ensemblegestützte Aussagen zum Niederschlag können ebenfalls mit den Resultaten der WEREX VI-Rechnungen getätigt werden. Wie Abbildung 13 zeigt, liegen die Niederschläge für das Untersuchungsgebiet im Zeitraum 1971-2000 relativ dicht beieinander. Dort sind die Resimulationen des Gegenwartsklimas (20C-Daten) und die Beobachtungen einander gegenübergestellt.

Werden Änderungen des Niederschlags betrachtet, ist es erfahrungsgemäß sinnvoll, diese sowohl für das Jahr als auch den Sommer und den Winter zu untersuchen. Eine entsprechende Darstellung findet sich in Abbildung 14. Es ist deutlich erkennbar, dass sowohl für den Jahresniederschlag als auch den Sommerniederschlag von den meisten Modellen eine Abnahme simuliert wird. Dabei ist anzumerken, dass Änderungen in einer Größenordnung von $\pm 10\%$ zu gering sind, um als signifikant betrachtet zu werden. Dieser Bereich ist in Abbildung 14 blau schraffiert. Im Sommer sind die simulierten Änderungen bei allen Modellen und Szenarios stärker als diese Schwelle, während beim Jahresniederschlag die Simulationen mit dem RCP26-Antrieb als relativ gering zu erachten sind. Der Winterniederschlag weist bei so gut wie allen Modellen und Szenarios leichte Zunahmen auf, die aber nicht alle das Maß einer Zunahme um 10% übersteigen.

Abbildung 15 zeigt den simulierten zeitlichen Verlauf der Niederschlagsentwicklung über den Zeitraum 1951 bis 2100. In dieser Abbildung sind die Ensemblemitglieder, die den Antrieb mit dem Treibhausgas-Szenario RCP85 besitzen (ein Lauf von ca. zwei, drei Läufen von MPI-ESM und ein Lauf von Mi5) dargestellt. Dazu kommen zum Vergleich Ensemblemitglieder, die mit dem SRES Szenario A1B angetrieben wurden, aber mit WEREX VI regionalisiert wurden (ECHAM 5 und die CCLM). Auch hier sind die Abnahmetendenzen im Sommer sowie in geringerem Maße im Jahr gut erkennbar; der Winter ist durch leichten Anstieg der Niederschlagsmenge über die Zeit charakterisiert. Es ist auch erkennbar, dass die zeitliche Entwicklung der A1B-Szenarioläufe denen mit RCP85 relativ ähnlich ist, nur im Winter zeigen diese beiden Modelle in der WEREX-Regionalisierung etwas stärkere Zunahmen als die Läufe mit dem RCP85-Szenario. Eine weitere Besonderheit ist in Abbildung 15 zu sehen: Das Modell Miroc5 weist auch im Winter auf leichte Abnahmen des Niederschlags hin. Wir erklären uns dieses Verhalten damit, dass bei MIROC5 (siehe Erläuterungen zu Tabelle 1) keine Felder der 1000 hPa-Fläche verfügbar waren und daraufhin wichtige Atmosphärengrößen aus der mittleren statt aus der unteren Atmosphäre verwendet werden mussten. Im Winter, wo die Atmosphäre in Bodennähe durch Inversionsbildung häufig von der Atmosphäre in höheren Luftschichten entkoppelt ist, hat dies einen Einfluss auf die Herstellung der Zusammenhänge zwischen dem am Boden auftretenden Niederschlag und den Verhältnissen in der freien Atmosphäre.

Für Abbildung 16 wurde das Ensemble der fünf WEREX-Simulationen mit RCP85-Antrieb gemittelt und in Kartenform für das Jahr, den Sommer und den Winter dargestellt. Dort ist besonders deutlich die Aufspaltung der Niederschlagssignale in sommerliche und jährliche Zunahme sowie winterliche leichte Abnahme zu sehen.

Schließlich findet sich in Abbildung 17 eine Zusammenschau von Klimasignalaussagen. Dort werden gemeinsam Temperatur- und Niederschlagssignale wiedergegeben. Die Regionalisierungsergebnisse der drei MPI-ESM Läufe mit RCP8.5 (Nr. 4, 5 und 6) und die des ECHAM5-Modells mit SRES A1B liegen relativ dicht beieinander, während der Lauf mit dem CanESM-Modell (Nr. 1) durch starke Niederschlags- und Temperatursignale charakterisiert ist. Die Regionalisierungen mit MIROC5 fallen durch ihr geringes Temperatursignal und geringes Niederschlagssignal auf.

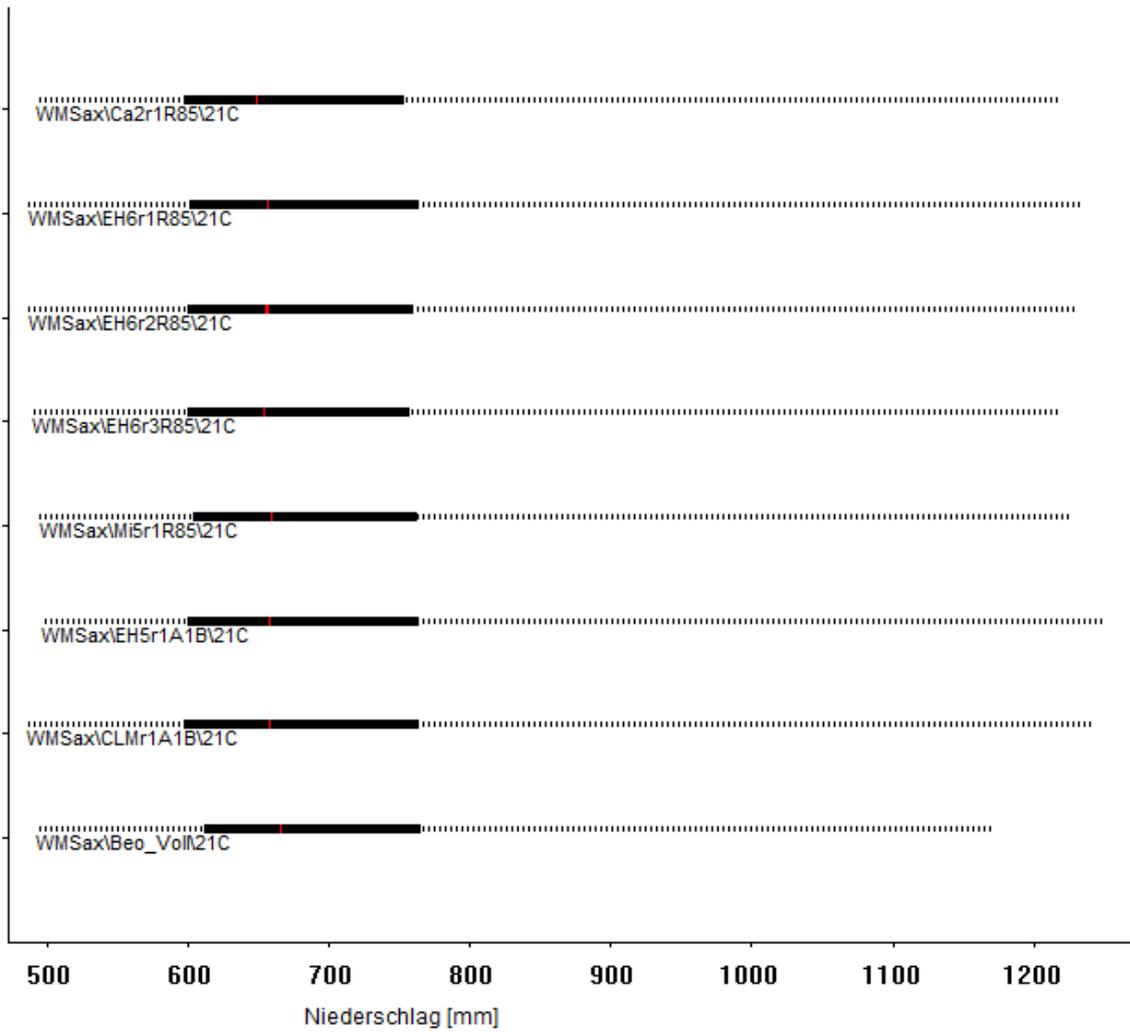
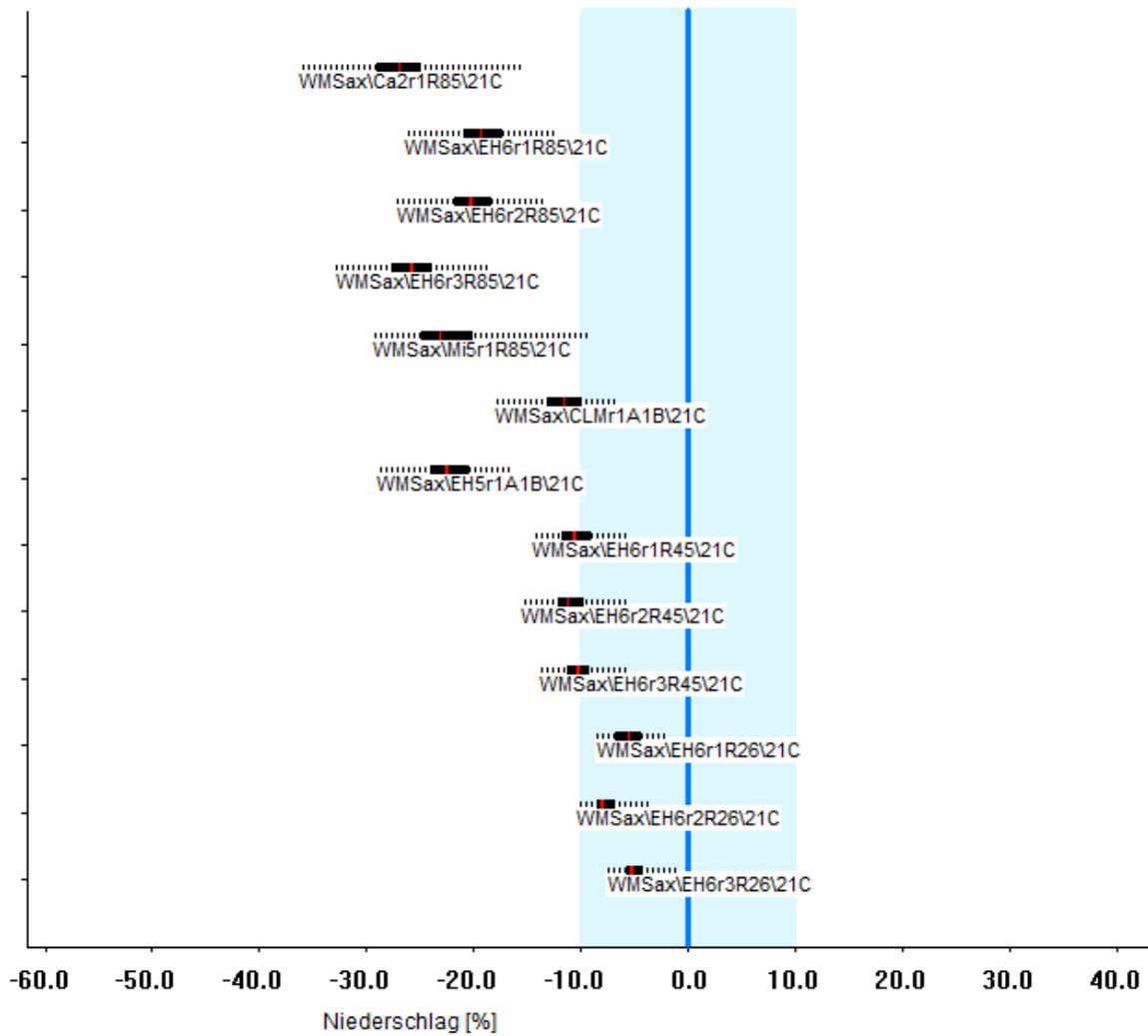
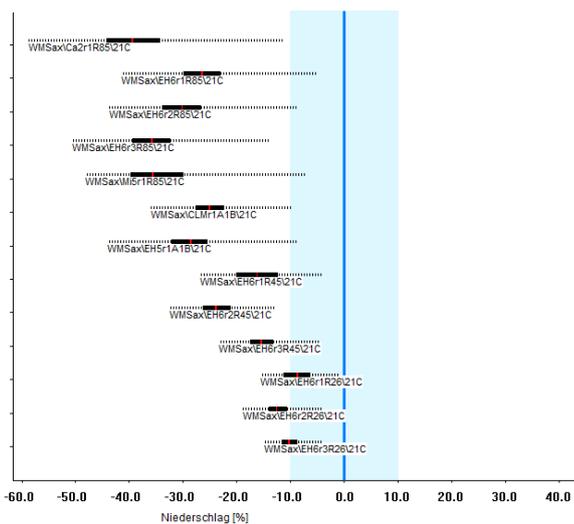


Abbildung 13: Jahresniederschlagssumme des Zeitraums 1971-2000 in Sachsen – Ergebnisse des WEREX VI-Ensembles (obere 7 Balken) und gemessener Niederschlagssummen (unterster Balken)



Ensemble aus 13 Projekten (Bänder der Häufigkeiten): 2071_2080; 2081_2090; 2091_2100; Niederschlag; mit Sommer (JJA)
1971_1980; 1981_1990; 1991_2000;



Ensemble aus 13 Projekten (Bänder der Häufigkeiten): 2071_2080; 2081_2090; 2091_2100; Niederschlag; mit Winter (DJF)
1971_1980; 1981_1990; 1991_2000;

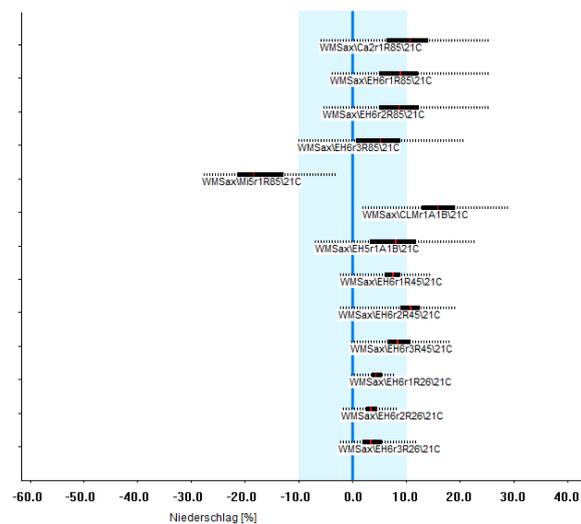
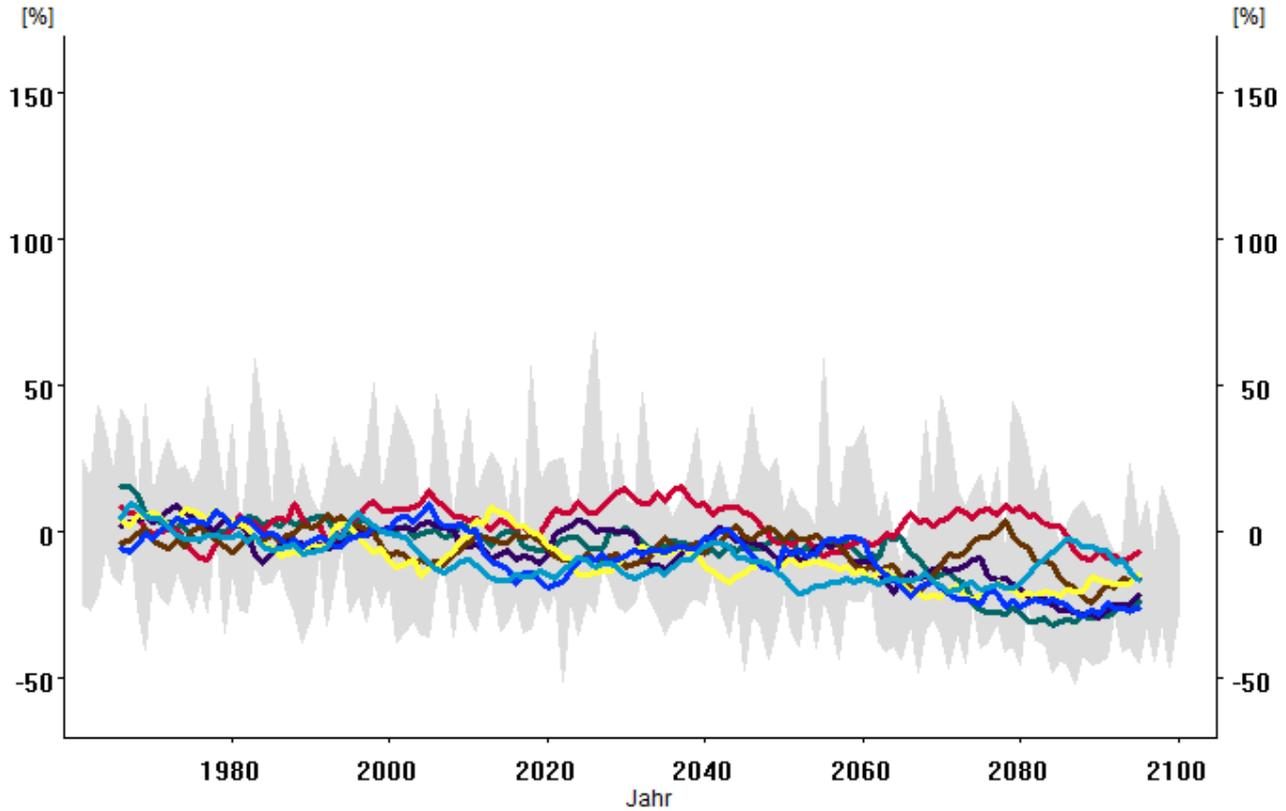
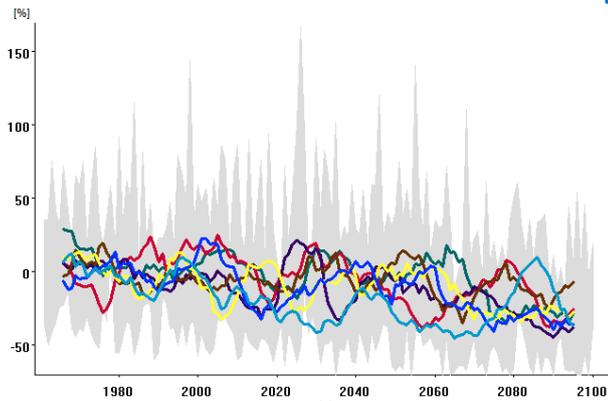


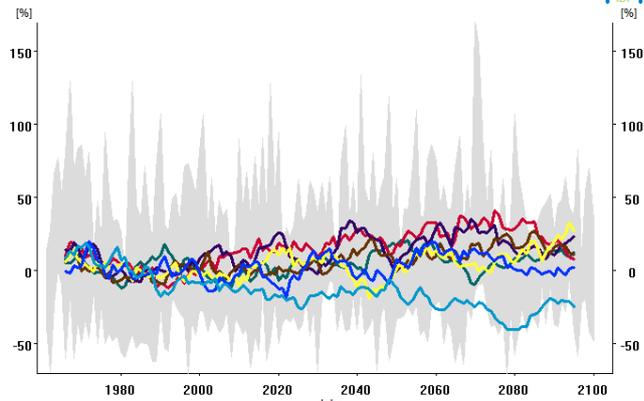
Abbildung 14: Ensemblebalkendiagramm für die prozentuale Änderung des Niederschlags zwischen den Perioden 1971-2000 (20C-Daten) und 2071-2100 Szenario RCP8.5 in Sachsen; oben: Jahresänderungen; unten links: Änderungen im Sommer; unten rechts: Änderungen im Winter



- 1 WMSaxiCa2r1R85\21C
- 2 WMSaxiCLMr1A1B\21C
- 3 WMSaxiEH5r1A1B\21C
- 4 WMSaxiEH6r1R85\21C
- 5 WMSaxiEH6r2R85\21C
- 6 WMSaxiEH6r3R85\21C
- 7 WMSaxiMi5r1R85\21C



- 1 WMSaxiCa2r1R85\21C
- 2 WMSaxiCLMr1A1B\21C
- 3 WMSaxiEH5r1A1B\21C
- 4 WMSaxiEH6r1R85\21C
- 5 WMSaxiEH6r2R85\21C
- 6 WMSaxiEH6r3R85\21C
- 7 WMSaxiMi5r1R85\21C



- 1 WMSaxiCa2r1R85\21C
- 2 WMSaxiCLMr1A1B\21C
- 3 WMSaxiEH5r1A1B\21C
- 4 WMSaxiEH6r1R85\21C
- 5 WMSaxiEH6r2R85\21C
- 6 WMSaxiEH6r3R85\21C
- 7 WMSaxiMi5r1R85\21C

Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf des simulierten Niederschlags des Jahres (oben), des Sommer (unten links) und des Winters (unten rechts) für die fünf Ensemblemitglieder mit dem Szenario RCP85 sowie zwei Ensemblemitglieder mit dem Szenario A1B von 1951 bis 2100

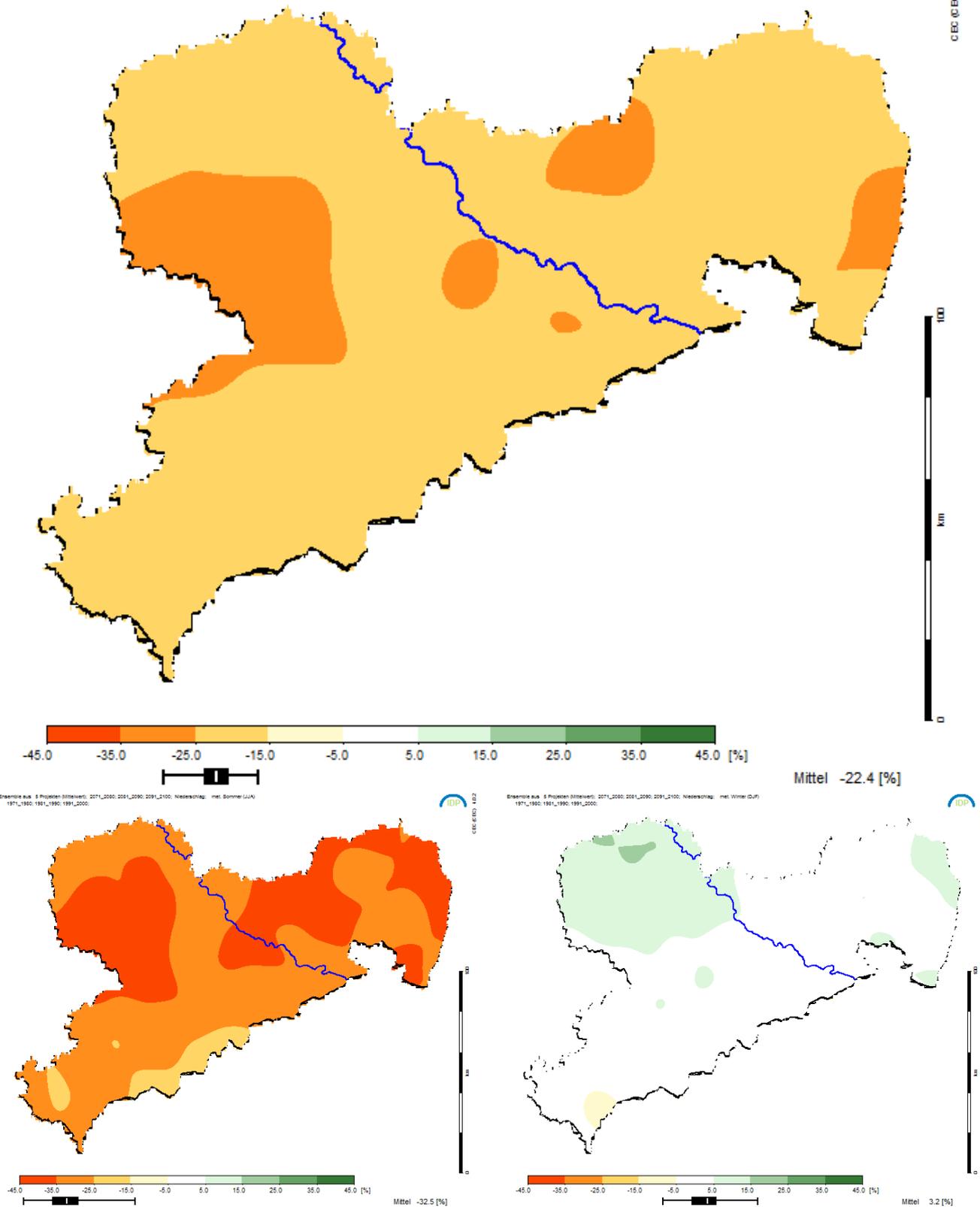


Abbildung 16: Prozentuale Änderung des Niederschlags zwischen 1971-2000 und 2071-2100 in Sachsen als Mittel des Ensembles von fünf WEREX VI-Simulationen mit Antrieb RCP8.5 (Jahr: oben; Sommer: unten links; Winter: unten rechts)

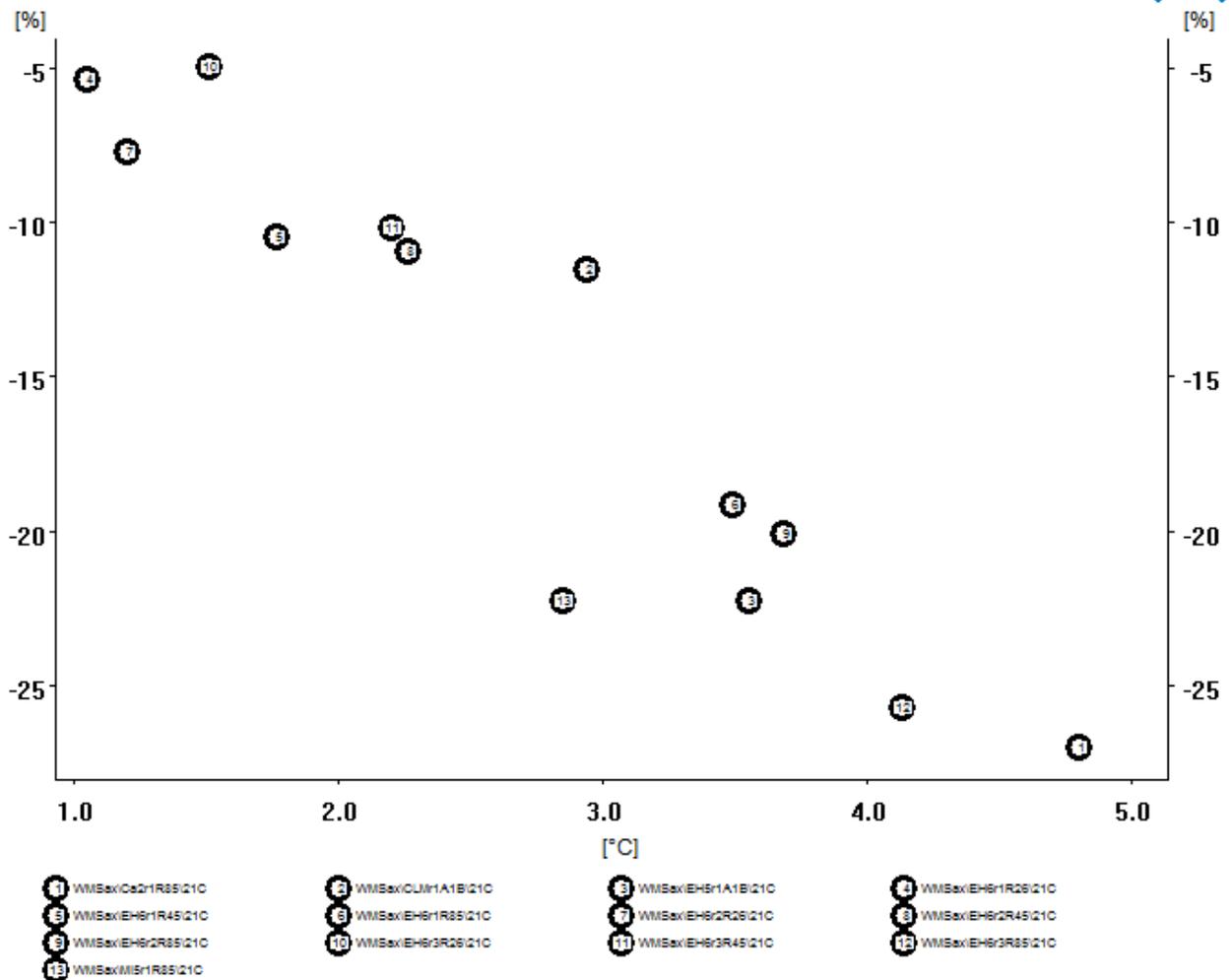


Abbildung 17: Darstellung der Temperatur- (x-Achse) und Niederschlagssignale (y-Achse) zwischen 1971-2000 und 2071-2100 für die Region Sachsen – Jahreswerte des Ensembles von WEREX VI-Regionalisierungen, davon 5 mit Antrieb des Treibhausgas-Szenarios RCP8.5 und als Ergänzung Regionalisierungen mit ECHAM5 A1B (Nr. 3) und der Kaskade ECHAM5 A1B → CCLM → WEREX VI (Nr. 2) – hinzu kommen Signale von MPI ESM Lauf 1 bis 3, angetrieben mit den Treibhausgas-Szenarios RCP4.5 und RCP2.6

4.2 KlaMuKo – Anwendungsbeispiele

Für die Ergebnisse mit KlaMuKo in diesem Bericht wurden mehrere Modelle und Modell-Läufe für die auch WER-EX VI-Regionalisierungen erfolgten analysiert (s. Tabelle 1). In einem ersten Schritt müssen die KlaMuKo-Klassen für verschiedene Zielgrößen aus Messdaten der Gegenwart für den Boden und Reanalysen für die freie Atmosphäre bestimmt werden. Die qualitätskontrollierten Stationsdaten, die für die Phase II des Vorhabens erstmals verfügbar waren (s. Abschnitt 2.2), bilden eine wichtige Grundlage dafür. In einem weiteren Schritt werden die so ermittelten KlaMuKo-Klassen in Simulationen mit verschiedenen Klimamodellen identifiziert und deren Häufigkeitsentwicklung betrachtet, woraus Trendentwicklungen verschiedener Extremklassen hergeleitet werden können. Die Trenduntersuchungen erfolgten für eine Reihe von Zielgrößen sowie spezifisch für jedes Modell und jede der drei Klimaregionen, sowie in Einzeluntersuchungen auch den 10 Niederschlagsräumen.

4.2.1 Beispiel 1: Maximumtemperatur im Sommer

Untersucht wurde die sommerliche Tagesmaximumtemperatur der Stationsgruppe „Flachland“ (unterhalb 300 m ü. NN). Die von KlaMuKo gefundenen wichtigsten Prädiktoren für die Maximumtemperatur im Sommer sind

- Relative Topographie 1000/850 hPa
- Vorticity 850 hPa
- Approximierte kurzwellige Einstrahlung
- Meridionalkomponente des thermischen Windes 1000/850 hPa
- Relative Feuchte in 850 hPa

Die multiple Korrelation zwischen den Prädiktoren und dem Prädiktand ist sehr hoch und beträgt 0,96, wobei die relative Topografie allein einen Beitrag von 0,94 zur Korrelation liefert. Infolge dieser Dominanz ist die Auswahl der weiteren Prädiktoren durchaus anders, wenn andere Klimaregionen oder Jahreszeiten betrachtet werden – die relative Topografie ist aber der bedeutendste Prädiktor.

Die 15 KlaMuKo-Klassen sind in Abbildung 18 übersichtsartig dargestellt. Es ist erstaunlich, wie gut die Klassifikation die Temperaturbereiche voneinander trennt. Für weitere Betrachtungen ist es sinnvoll, sie der Größe nach zu sortieren. Klasse 2 verfügt über das größte und Klasse 7 über das kleinste Mittel. Im Zuge des KlaMuKo-Verfahrens werden als Ausgangskonstellation die 15 einander unähnlichsten Tage ermittelt. Zur Erinnerung: Die Unähnlichkeit ist dabei nicht, wie sonst verbreitet praktiziert, über die Strömungsmuster definiert, es ist also keine morphologische Ähnlichkeit/Unähnlichkeit, die den Hintergrund für diesen Identifikationsprozess bildet. Vielmehr ist es die Ähnlichkeit/Unähnlichkeit von Konstellationen der ausgewählten Prädiktoren. Für den so gefundenen Tag kann die Wettersituation dargestellt werden.

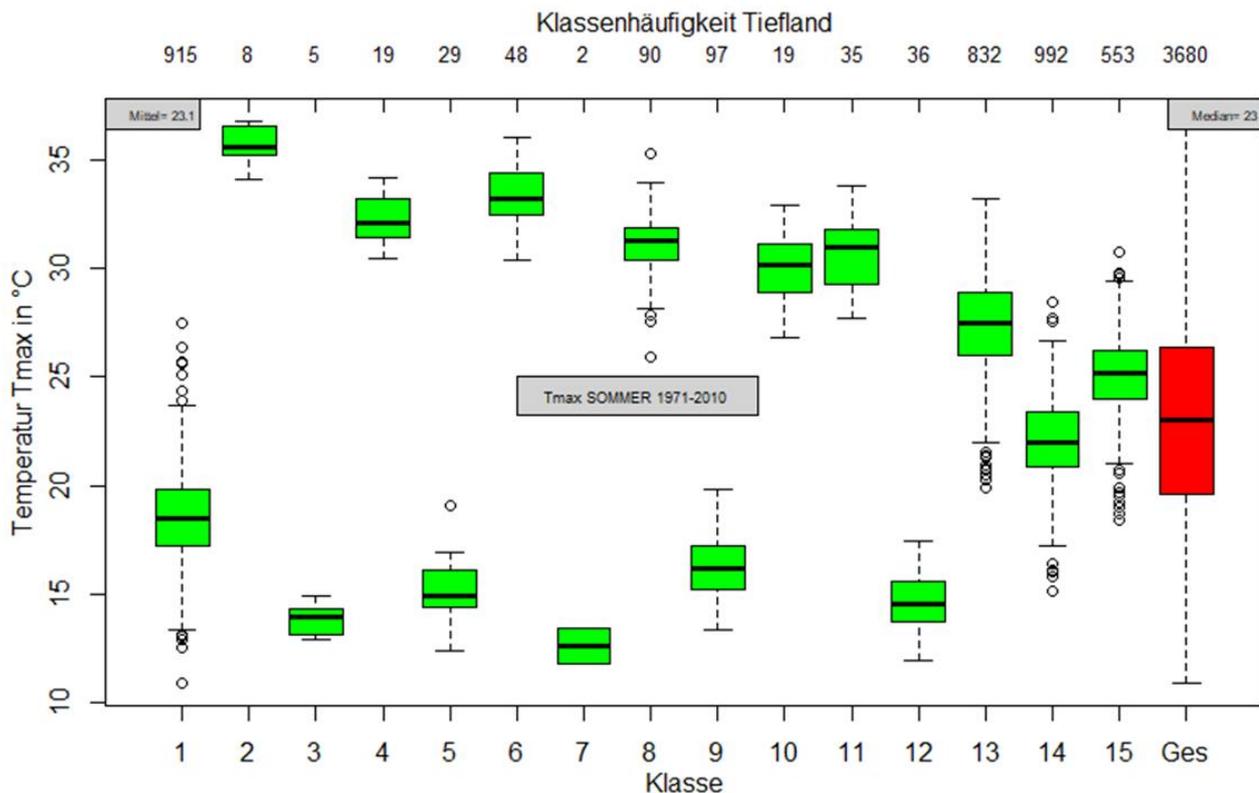


Abbildung 18: Box-Whisker-Darstellung der 15 KlaMuKo-Klassen für die Maximumtemperatur im Sommer, Daten von Tieflandstationen mit einer Höhe bis 300 m ü. NN

Das erste Beispiel ist die Wettersituation am 9. August 1992. Dieser Tag wurde von KlaMuKo als einer der Fälle mit einer besonderen Konstellation der Prädiktoren ausgewählt und bildet den Kern der KlaMuKo-Klasse 2. Er ist durch ein besonders hohes Tagesmaximum an den sächsischen Tieflandstationen charakterisiert: 36,8 °C. Die zugehörige Wettersituation zeigt Abbildung 19. An diesem Tag befand sich ein umfangreicher Höhenkeil über Mitteleuropa, in dessen Bereich zudem besonders hohe Werte der relativen Topografie 1000/500 hPa auftraten, das heißt die Luftmasse hatte einen besonders hohen Wärmeinhalt. Durch die Südwestanströmung gelangte die besonders heiße Luft auch nach Sachsen. Dieser Tag war auch in den anderen beiden Klimazonen Sachsen (Hügelland und Bergland) besonders heiß.

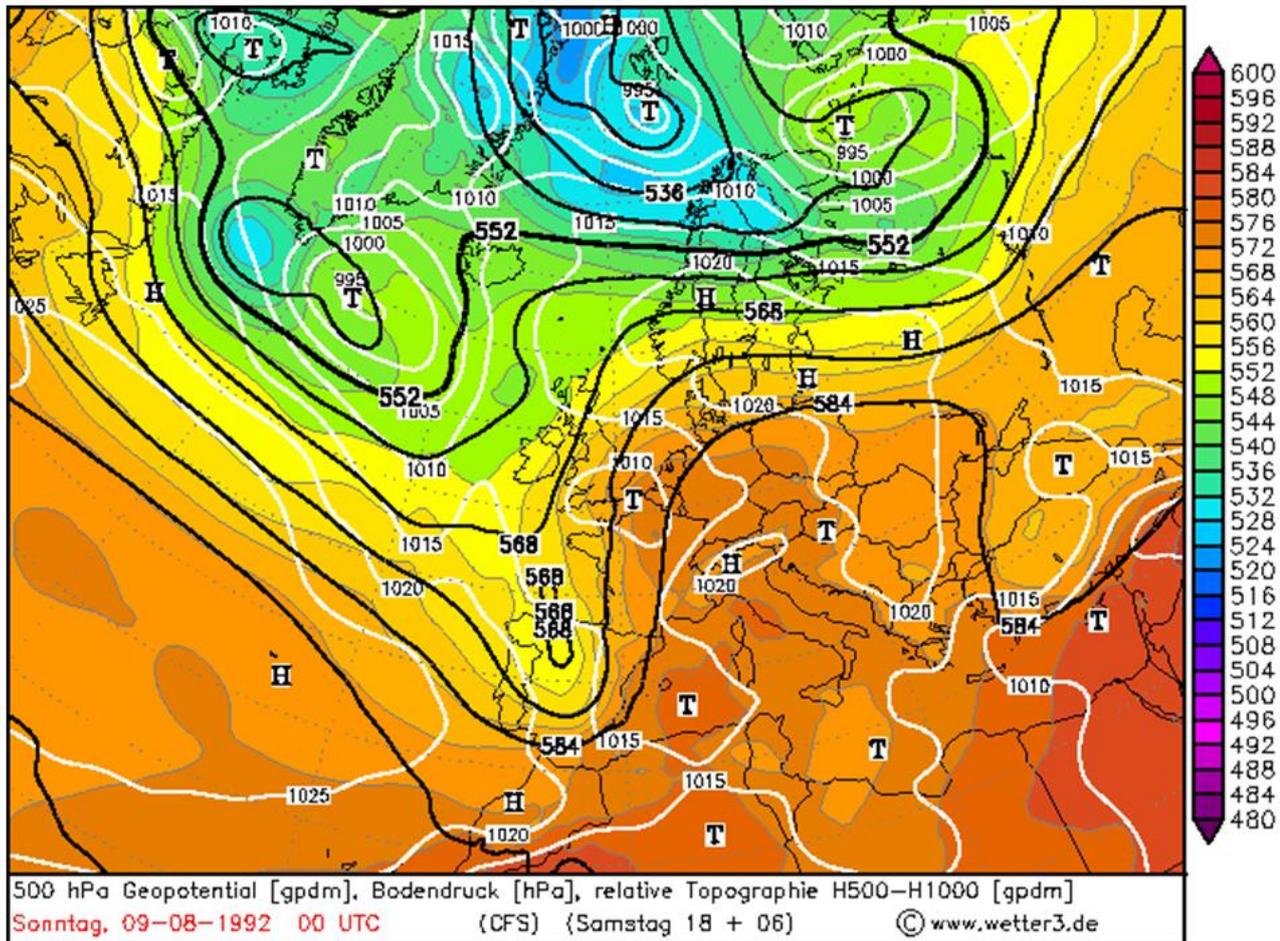


Abbildung 19: Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 9. August 1992, schwarze Linien: Geopotenzial in 500 hPa, weiße Linien: Bodendruck in hPa, Farbzonen: relative Topografie 1000/500 hPa

Die KlMuKo-Klasse 7 hat die niedrigsten Maximumtemperaturwerte an den Tieflandstationen Sachsens. Als Ausgangstag wurde vom Verfahren der 6. Juni 1986 wegen seiner besonderen Konstellation der Prädiktoren gewählt. Er ist durch ein besonders niedriges Tagesmaximum an den sächsischen Tieflandstationen charakterisiert: 11,8 °C. Die zugehörige Wettersituation zeigt Abbildung 20. Die Wettersituation war am 6. Juni 1986 durch einen ausgedehnten Trog in der Höhe und am Boden gekennzeichnet. Auch wurden besonders niedrige Werte der relativen Topografie 1000/500 registriert – ein besonders geringer Wärmeinhalt der Luftmasse, der zu sehr niedrigen Temperaturwerten in Sachsen führte. Dies gilt auch für die anderen beiden sächsischen Klimazonen (Hügelland und Bergland).

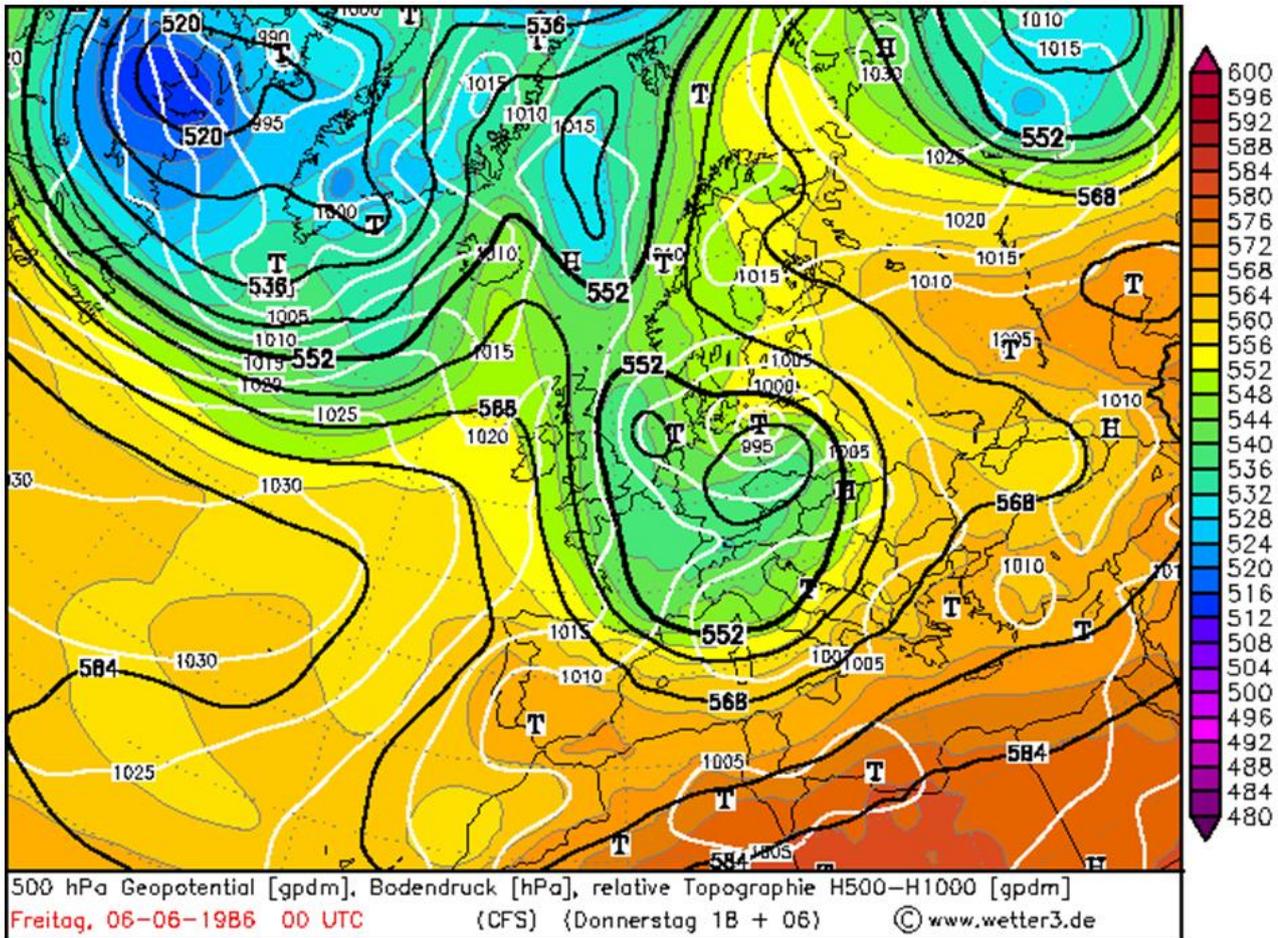


Abbildung 20: Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 6. Juni 1986, schwarze Linien: Geopotenzial in 500 hPa, weiße Linien: Bodendruck in hPa, Farbzonen: relative Topografie 1000/500 hPa

4.2.2 Beispiel 2: Maximumtemperatur im Winter

Untersucht wurde die winterliche Tagesmaximumtemperatur der Stationsgruppe „Flachland“ (unterhalb 300 m ü. NN). Die von KlaMuKo gefundenen wichtigsten Prädiktoren für die Maximumtemperatur im Winter sind

- Temperatur in 1000 hPa
- Vorticity in 850 hPa
- Approximierte kurzwellige Einstrahlung
- Meridionalkomponente des thermischen Winds zwischen 1000 und 850 hPa

Auch im Winter lässt sich die Tagesmaximumtemperatur mit einer Korrelation von 0,96 aus den wichtigsten Prädiktoren bestimmen. Anders als im Sommer ist aber nicht der Wärmehalt einer Luftschicht, wie ihn die relative Topografie bestimmt, sondern die Temperatur der bodennahen Luft die wichtigste Beschreibungsgröße. Das liegt daran, dass es im Winter verbreitet Inversionswetterlagen gibt, die den Austausch mit den höher gelegenen Luftschichten einschränken oder unterbinden. Folglich ist ein Temperaturmaß, das diese Luftschichten einbezieht, im Winter von geringer Relevanz.

Die 15 KlaMuKo-Klassen sind übersichtsartig in Abbildung 21 dargestellt. Die niedrigsten Maximumtemperaturwerte sind dabei in der Klasse 2 zu finden während sich die wärmsten Wintertage in Klasse 3 versammeln.

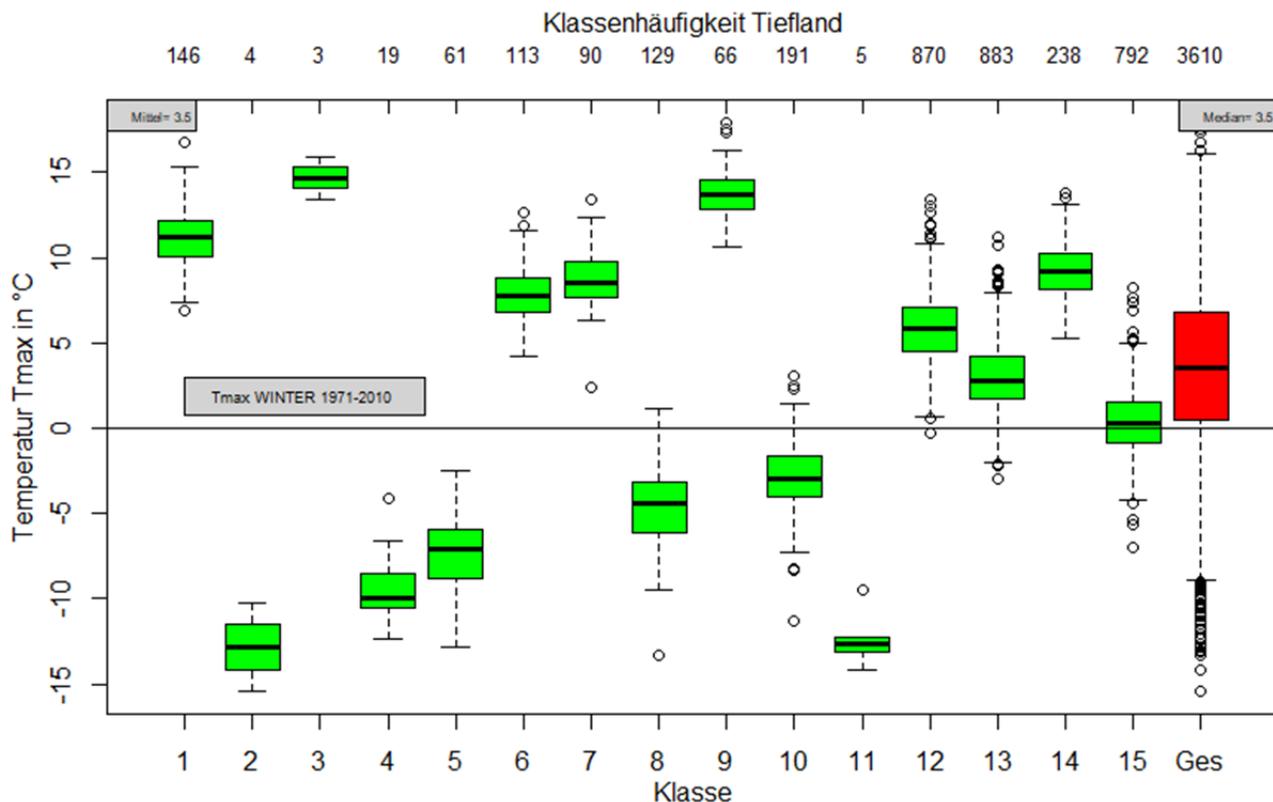


Abbildung 21: Box-Whisker-Darstellung der 15 KlaMuKo-Klassen für die Maximumtemperatur im Winter, Klassifikation mit Daten von Tieflandstationen mit einer Höhe bis 300 m ü. NN

Der Kerntag für die Klasse 2 ist der 11. Januar 1987. An diesem Tag trat eine besondere Konstellation der von KlaMuKo verwendeten Prädiktoren auf. Die Gruppe der Stationen des sächsischen Tieflands registrierte an diesem Tag eine Maximumtemperatur von -13 °C. Die zugehörige Wettersituation ist in Abbildung 22 dargestellt. Ein starkes, in der Höhe und am Boden ausgeprägtes Tief über dem westlichen Mittelmeer sowie ein Hoch über dem Nordmeer und Skandinavien sorgten in Mitteleuropa für eine nordöstliche Strömung, mit der sehr kalte Luft nach Mitteleuropa gelangte.

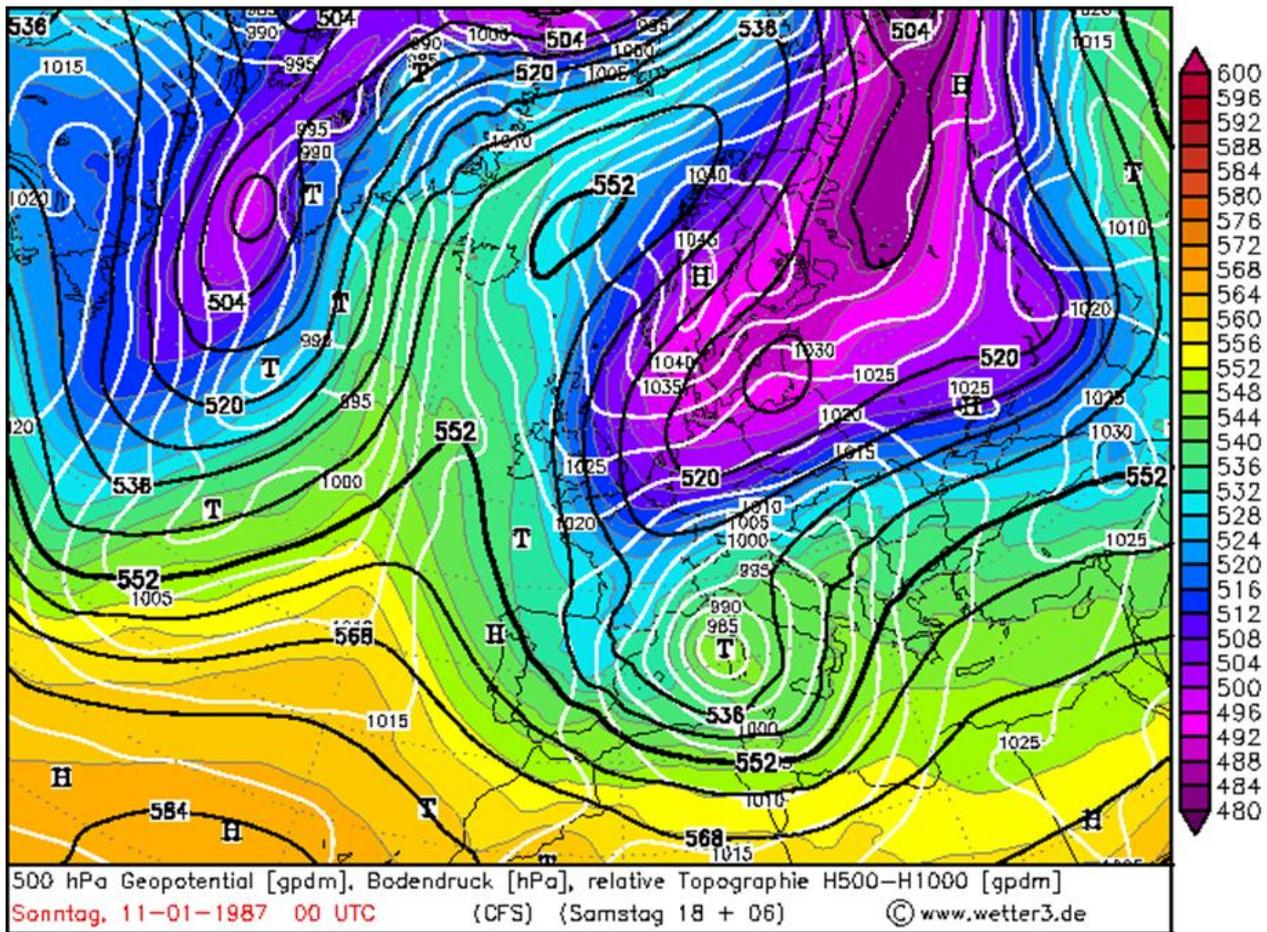


Abbildung 22: Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 11. Januar 1987, schwarze Linien: Geopotenzial in 500 hPa, weiße Linien: Bodendruck in hPa, Farbzonen: relative Topografie 1000/500 hPa

Am 10. Januar 1991, dem Kerntag der KlMuKo-Klasse 3 wurden besonders hohe Tagesmaxima verzeichnet. In der Tiefland-Region, deren Stationen für die Analyse eingesetzt wurden, erreichte die Temperatur an diesem Tag einen Höchstwert von +15,9 °C. Die Wettersituation an diesem Tag ist in Abbildung 23 wiedergegeben. Steuerungszentren waren an diesem Tag umfangreiche Tiefdruckzonen über dem Nordmeer und Skandinavien sowie eine starke Hochdruckzone über Nordafrika und dem Mittelmeer. Diese Anordnung sorgte für eine Zufuhr ungewöhnlich warmer Luft nach Mitteleuropa aus südwestlicher Richtung.

Da die meteorologischen Verhältnisse im Winter oft in unterschiedlichen Geländehöhen unterschiedlich sind (Stichwort: Inversionen), kommen Tage vor, an denen im Tiefland besonders niedrige Temperaturwerte erreicht werden, während dies beispielsweise im Bergland nicht der Fall ist. Auch bei Analysen der wärmsten und kältesten Klassen im Hügel- und Bergland zeigt sich dies. Allerdings ist in jeder der drei Regionen im Winter die Temperatur in 1000 hPa für die Beschreibung des Tagesmaximums die wichtigste Größe.

Hinweis: Bei der Minimumtemperatur sind die Witterungssituationen der kältesten und der wärmsten Klasse relativ ähnlich. Allerdings ist der wichtigste Prädiktor die Pseudopotentielle Temperatur. Das ist ein Maß für den Feuchteinhalt der Luft und die daraus resultierende latente Wärme. Die Minimumtemperatur hängt also stark davon ab, wie viel Feuchte in der Luft enthalten ist.

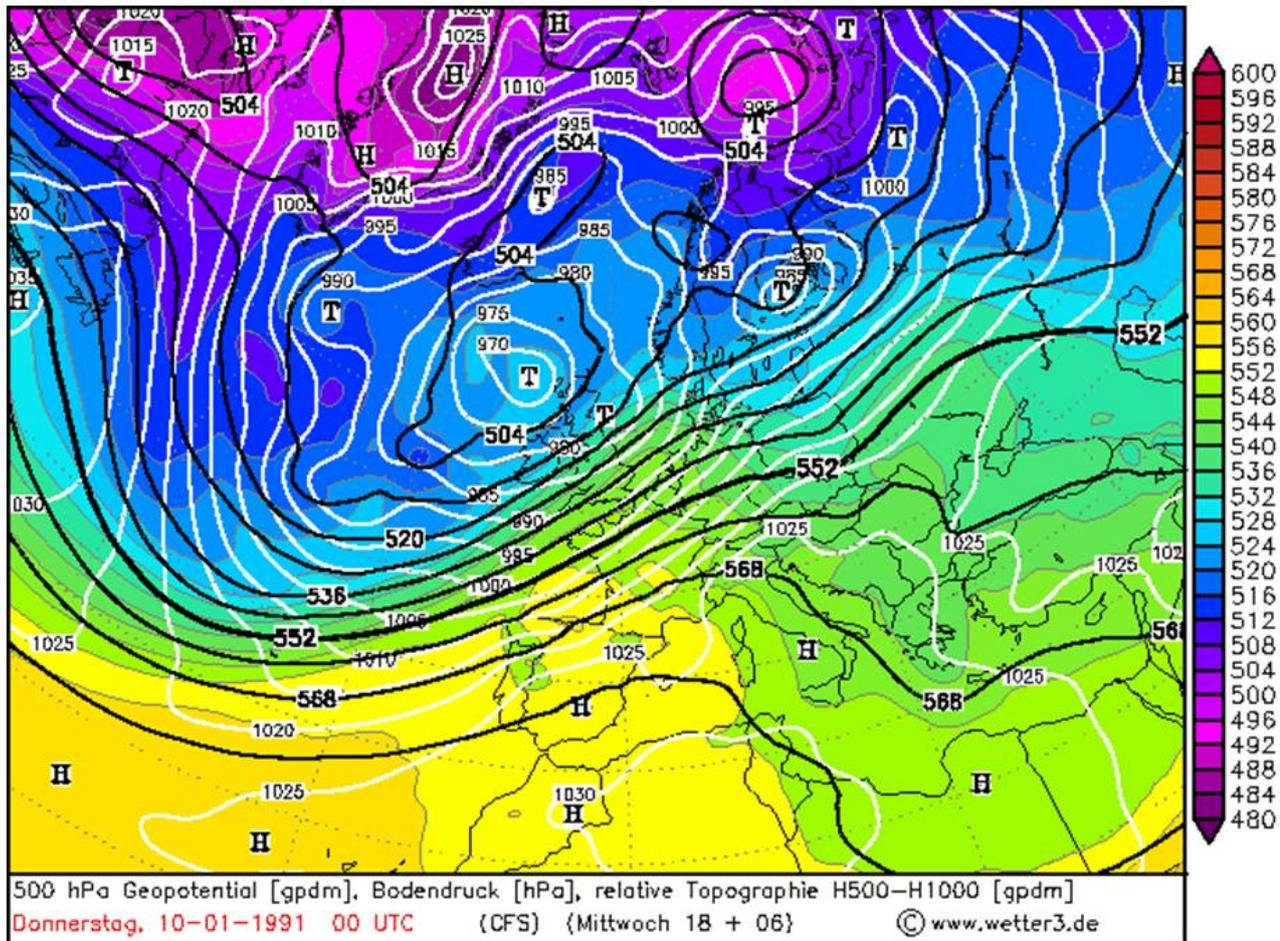


Abbildung 23: Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 10. Januar 1991, schwarze Linien: Geopotenzial in 500 hPa, weiße Linien: Bodendruck in hPa, Farbzonen: relative Topographie 1000/500 hPa

4.2.3 Beispiel 3: Schwellwertüberschreitungen der Temperatur

Bei den bisher vorgestellten Untersuchungen wurde der Wert der Temperatur in den Mittelpunkt gestellt und die Klassifikation identifizierte Konstellationen von atmosphärischen Größen, die besonders hohe oder niedrige Temperaturwerte mit sich bringen. Alternativ sind Schwellwertüber- bzw. Unterschreitungen ein geeignetes Maß, um das regionale Extremverhalten zu untersuchen. Im Fall von KlaMuKo wird nach Kombinationen atmosphärischer Prädiktoren gesucht, die besondere Relevanz für das Auftreten von diesen Extremen besitzen. Anders als bei der Klassifikation der Temperaturwerte erfolgt hier eine Fokussierung, denn viele ebenfalls auftretende Temperaturwerte werden gar nicht einbezogen.

Ein weiterer Ansatz ist, nur die Tage zu betrachten, an denen die Maximumtemperatur beispielsweise über 25 °C gelegen hat (Sommertage). Im Tiefland reduziert sich die Zahl der betrachteten Tage von 3.680 (die Sommermonate von 40 Jahren, jeder Sommer mit einer Länge von 92 Tagen, auf 1.274. Im Hügelland sind es 927 Tage und im Bergland 161 Tage.

Wird KlaMuKo so betrieben, dass 15 Klassen nur für Tage im Temperaturbereich oberhalb von 25 °C gebildet werden sollen, so ist die Trennschärfe der Klassen größer und die Klassenunterteilung feiner gestaffelt (s. Tabelle 2). Die multiple Korrelation ist mit 0,9 etwas geringer als bei einer der Vorschrift einer Klassenbildung über den gesam-

ten Temperaturbereich (dort 0,96 und höher) – allerdings ist die relative Topografie, zumindest im Flachland und im Hügelland, der Ausschlag gebende Prädiktor. Im Bergland ist das betrachtete Kollektiv deutlich kleiner, Tagesmaxima oberhalb von 25 °C werden dort nur selten erreicht. Interessanterweise sind dort auch Feuchte- und Labilitätsgrößen von höherer Relevanz als die relative Topografie – der Feuchteinhalt der Luft und die Wolkenbildung haben an den hoch gelegenen Stationen den Ausschlag gebenden Einfluss.

In Tabelle 2 werden die KLaMuKo-Klassen für die drei Klimazonen Sachsens und verschiedene Prädiktoren dargestellt. Es ist anzumerken, dass die Klassen dort nicht in der Reihenfolge, wie sie von KLaMuKo erzeugt werden enthalten sind, sondern in einer Größensortierung, was den Vergleich der Resultate erleichtert. In der jeweils oberen Zeile eines Blocks der Tabelle ist die Zählung, wie oft diese Klasse im Zeitraum 1971-2010 identifiziert wurde enthalten. Der Inhalt des ersten Zeilenblock (Maximumtemperatur TX, Tiefland, Sommer) ist zudem in Abbildung 18 visualisiert. Der Inhalt des achten Zeilenblocks (Maximumtemperatur TX, Tiefland, Winter) ist in Abbildung 21 dargestellt.

Tabelle 2: Belegungszahl (jeweils obere Zeile) und Klassenmittelwert (jeweils untere Zeile) für Maximumtemperatur (TX) und damit verbundene Klimaindikatoren in den Klimaregionen Sachsens des Zeitraums 1971-2010

Klasse/ Prediktand	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TX Som	8	48	19	90	35	19	832	553	992	915	97	29	36	5	2
Tief	35,7	33,4	32,3	31,1	30,7	30,1	27,4	25,1	22,1	18,5	16,3	15,1	14,6	13,8	12,6
TX Som	15	20	70	21	181	402	720	1242	346	297	174	52	94	42	4
Hügel	33,6	32,0	31,1	30,3	28,8	26,2	24,7	20,9	17,6	16,5	15,5	14,6	13,6	13,1	11,9
TX Som	11	70	77	126	129	45	932	939	843	365	54	55	27	6	1
Berg	29,4	26,6	25,2	24,0	23,2	21,1	20,5	17,3	14,1	11,0	10,3	8,7	8,4	7,7	5,7
>25°C Som	4	4	16	5	90	132	108	458	122	163	27	76	21	7	41
Tief	35,9	35,6	34,1	33,5	32,2	30,2	30,0	27,9	26,7	26,5	26,0	26,0	25,7	25,6	25,5
>25°C Som	5	16	16	16	25	42	306	383	2	44	17	3	48	3	1
Hügel	34,3	32,8	32,6	31,7	30,9	30,7	28,5	26,7	26,2	26,1	25,8	25,7	25,5	25,4	25,2
>25°C Som	1	1	5	13	10	6	1	5	35	50	18	1	11	3	1
Berg	30,1	28,5	28,5	28,4	27,6	26,7	26,6	26,5	26,4	26,3	25,9	25,7	25,6	25,6	25,1
>30°C Som	2	6	2	9	37	5	45	109	12	2	37	1	4	1	1
Tief	36,8	35,7	35,3	33,3	33,0	32,5	32,3	31,2	31,1	31,0	30,9	30,8	30,3	30,1	30,1
TX Win	3	66	146	238	90	113	870	883	792	191	129	61	19	5	4
Tief	14,7	13,8	11,2	9,2	8,7	7,8	5,8	3,0	0,3	-2,9	-4,5	-7,3	-9,4	-12,4	-12,9
TX Win	17	52	34	210	298	447	808	519	510	494	122	68	25	2	4
Hügel	13,5	12,6	11,3	9,0	7,3	4,5	4,4	1,6	0,2	-2,5	-3,9	-7,2	-9,9	-12,9	-13,3
TX Win	3	26	151	348	3	67	743	1280	719	195	31	21	17	3	3
Berg	12,5	9,3	7,4	5,0	4,8	2,9	2,5	-0,8	-4,6	-6,8	-10,2	-10,7	-12,3	-14,1	-16,3
<0°C Win	11	2	18	59	84	164	5	243	170	3	20	2	1	2	3
Tief	-0,5	-0,6	-0,7	-1,0	-1,1	-1,2	-1,3	-2,9	-5,7	-9,7	-9,8	-11,1	-12,7	-13,5	-13,7
<0°C Win	10	2	10	3	128	110	166	201	291	34	6	19	8	2	4
Hügel	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-1,2	-1,8	-2,3	-4,5	-7,6	-8,5	-9,5	-11,1	-12,6	-14,1
<0°C Win	4	37	1	54	476	635	220	421	31	38	11	1	1	2	2
Berg	-0,4	-0,7	-1,1	-1,2	-1,4	-2,5	-4,4	-6,7	-8,7	-10,9	-12,4	-13,1	-15,5	-15,6	-16,8

Wie zu erwarten, sind die Klassen mit relativ hohen Werten und diejenigen mit relativ niedrigen Werten durch geringe Belegungszahlen charakterisiert. Auf diese ist bei der Betrachtung von Extremen das Augenmerk zu legen. Die stark belegten Klassen in der Mitte der Verteilung sind hingegen nicht der Fokus von Analysen. Es zeigt sich zudem, dass die Unterschiede zwischen Tiefland und Hügelland relativ gering sind, während die Bergstationen ein deutlich anderes Klimaregime umfassen.

Die KLaMuKo-Klassen, wie sie für die Minimumtemperatur und die Frosttage (Minimum unter 0 °C) bestimmt werden sind in Tabelle 3 aufgelistet. Wie sich zeigt, besitzen die „warmen“ Klassen, also diejenigen mit hoher Minimumtemperatur im Sommer für die drei Regionen relativ ähnlich Mittelwerte (16 bis 18,5 °C) während sich die Differenzierung nach Regionen im Sommer eher bei den „kalten“ Klassen zeigt. Für die winterlichen Minimumtemperaturwerte ist hingegen eine relativ große Ähnlichkeit zwischen den Tiefland- und die Hügellandstationen durch alle Klassen vorhanden, während die Bergstationen deutlich niedrigere Klassenmittelwerte aufweisen. Die Frosttage im Winter sind in allen Regionen recht zahlreich, von den rund 3.600 jeweils analysierten Tagen sind im Tiefland 2.181 Frosttage. Im Hügelland sind es 2.534 und im Bergland 3.236 Frosttage (also nahezu alle Tage!). Den Bereich der Extreme bilden hier die Klassen 10 bis 15 ab.

Tabelle 3: Belegungszahl (jeweils obere Zeile) und Klassenmittelwert (jeweils untere Zeile) für Minimumtemperatur (TN) und damit verbundene Klimaindikatoren in den Klimaregionen Sachsens des Zeitraums 1971-2010

Klasse/ Prediktand	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TN Som	7	78	30	335	1	697	2	1629	258	2	369	218	39	12	3
Tief	18,6	17,6	17,5	15,9	15,4	15,0	13,4	12,2	11,7	10,4	9,7	8,4	7,2	6,2	2,4
TN Som	5	31	95	34	11	725	952	844	390	1	15	557	12	6	2
Hügel	16,1	16,0	15,8	15,3	15,0	13,3	12,3	10,2	8,8	8,6	8,5	7,3	4,4	4,2	1,5
TN Som	5	35	94	101	61	805	917	1009	565	43	19	11	6	8	1
Berg	18,7	16,4	15,8	14,3	13,9	12,6	10,1	7,8	5,4	4,5	2,7	2,5	2,1	1,4	-0,8
TN Win	7	10	19	124	535	8	1272	1029	401	117	4	20	46	15	3
Tief	7,7	6,5	6,3	5,7	3,2	3,0	0,3	-3,7	-7,8	-11,7	-13,8	-14,7	-14,9	-18,6	-22,2
TN Win	13	23	11	4	181	1	894	296	1427	47	524	77	69	37	6
Hügel	6,2	5,8	4,8	4,5	3,6	2,9	1,1	-0,1	-3,4	-5,9	-9,4	-13,4	-14,9	-17,6	-21,0
TN Win	2	24	49	27	148	132	800	1087	799	262	161	87	25	6	1
Berg	3,8	3,4	2,3	2,2	0,8	-1,2	-1,9	-4,2	-7,5	-10,4	-12,3	-15,1	-18,3	-21,3	-25,9
<0°C Win	1	9	8	57	17	677	1	582	584	185	27	12	16	2	3
Tief	-0,6	-0,7	-1,0	-1,2	-1,8	-1,9	-2,9	-2,9	-7,2	-11,4	-13,3	-16,3	-17,8	-18,4	-22,2
<0°C Win	4	21	2	400	11	74	3	1213	608	73	73	35	7	5	5
Hügel	-0,5	-0,5	-0,8	-1,3	-1,3	-1,8	-3,1	-3,7	-8,8	-13,7	-14,4	-16,3	-19,7	-19,9	-21,4
<0°C Win	5	5	42	30	398	11	810	940	853	73	43	19	1	4	2
Berg	-0,4	-0,8	-1,1	-1,3	-2,4	-2,8	-3,0	-5,6	-9,6	-13,9	-17,0	-17,4	-20,1	-22,0	-23,5

4.2.4 Beispiel 4: Niederschlag im Sommer

Untersucht wurde für dieses Beispiel der Niederschlag der Stationsgruppe „Bergland“ (oberhalb von 600 m ü. NN). Die von KLaMuKo für diesen Bereich gefundenen wichtigsten Prädiktoren sind:

- Vorticity in 850 hPa,
- Horizontale Differenz des Geopotenzials in Ost-West-Richtung in 1000 hPa,
- Dampfdruck im Wolkenkondensationsniveau in 500 hPa,
- Betrag des Geopotenzialgradienten in 700 hPa,
- Horizontale Stromfelddivergenz in 850 hPa.

Damit wird eine multiple Korrelation von 0,53 mit dem Sommerniederschlag erreicht; das ist deutlich weniger als bei der Temperatur, aber die Größe Niederschlag ist auch sehr viel komplexer und in diesem Lichte ist ein Wert über 0,5 beachtlich hoch. Die Prädiktoren beschreiben im Wesentlichen dynamische Verhältnisse in der Atmosphäre – für das Auftreten von Niederschlag ist es förderlich, wenn ein Wirbel in der Region zu finden ist und die Luft mit relativ hoher Geschwindigkeit strömen kann.

Die von KLaMuKo identifizierten 15 Klassen sind in Abbildung 24 dargestellt. Es fällt auf, dass die einzelnen Box-Whisker-Bestandteile deutlich anders aussehen als bei der Temperatur (Abbildung 18 und Abbildung 21). Es ist eine Stärke von KLaMuKo, besondere Atmosphärenzustände zu isolieren. Daher kommt es vor, dass Klassen gebildet werden, die nur sehr wenige Tage enthalten. Jede dieser Klassen beinhaltet eine Konfiguration der im Vorfeld ermittelten Prädiktoren, die sich maximal von allen anderen unterscheidet. Besonders interessant ist, dass das Verfahren auf objektive Weise die beiden Tage mit dem stärksten Niederschlag – 12.08.2002 (209 mm als Stationsmittel) und 08.08.1978 (72,9 mm als Stationsmittel) – in einer Klasse zusammenfasst. Weitere bemerkenswerte Klassen sind 12 und 14, in denen 292 bzw. 134 Tage zusammengefasst sind, die als Mittel rund 10 mm Niederschlag besitzen. Das ist ungewöhnlich, denn bei einer solchen Vielzahl von Tagen, an denen bestimmte einander ähnliche atmosphärische Bedingungen herrschten, ist es relativ wahrscheinlich, dass in einigen Fällen sehr wenig oder kein Niederschlag gefallen ist.

Die Wettersituationen an den beiden Tagen, die zur Klasse 5 gehören, ist in Abbildung 25 dargestellt. In beiden Fällen liegt ein starkes Bodentief über der Region; hinzu kommt ein Reservoir an Warmluft südöstlich der Region, was einen reichlichen Feuchtenachschub für die Niederschlagsprozesse bewirkt. Insbesondere fällt in den Zeitraum um den 12. August 2002 das Starkniederschlagsereignis, bei dem zwischen 6 Uhr am 12. August und 6 Uhr am 13. August an der Station Zinnwald-Georgenfeld 312 mm Niederschlag registriert wurden und verbreitet für denselben Zeitraum im Erzgebirgsraum 150 bis 250 mm Niederschlag auftraten.

In den tiefer gelegenen Klimaregionen wurden von KLaMuKo in stärkerem Maße Feuchtegrößen als bedeutende Prädiktoren identifiziert, ohne dabei dynamische Größen wie Vorticity und Divergenz außer Acht zu lassen. Die multiplen Korrelationen sind dort von ähnlicher Größenordnung und liegen bei 0,55. Anmerkung: Im Winter treten geringere tägliche Niederschlagssummen auf als im Sommer – in der Bergregion bis zu rund 45 mm, im Hügelland und im Flachland bis rund 30 mm. Die relevanten Prädiktoren beinhalten Maße für das Vorhandensein von Wolken (z. B. Strahlung oder Feuchte) sowie einige dynamische Größen (z. B. Vorticity oder Geopotenzialgradienten). Die multiplen Korrelationen sind aber etwas höher als im Sommer und liegen zwischen 0,55 und 0,65, je nach Klimaregion.

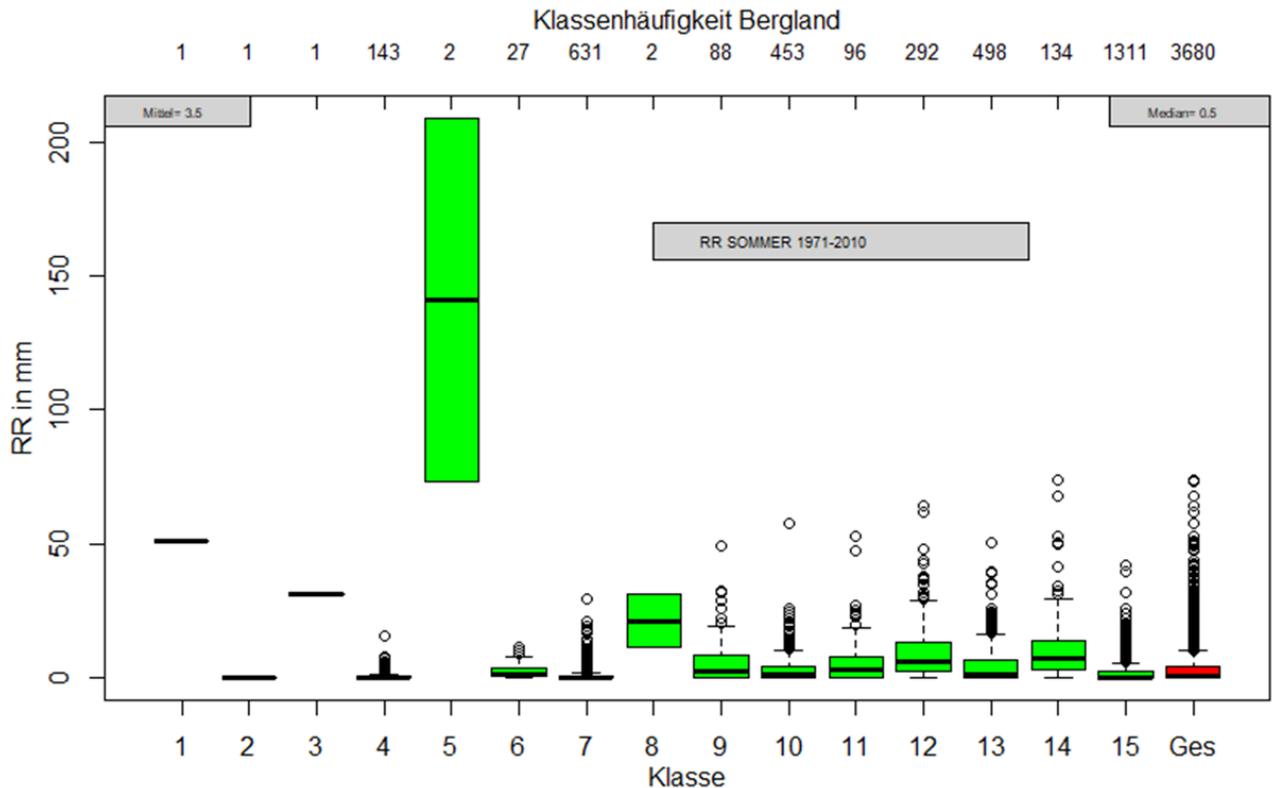


Abbildung 24: Box-Whisker-Darstellung der 15 Klamuko-Klassen für den Niederschlag im Sommer mittels Daten von Bergstationen mit einer Höhe über 600 m ü. NN

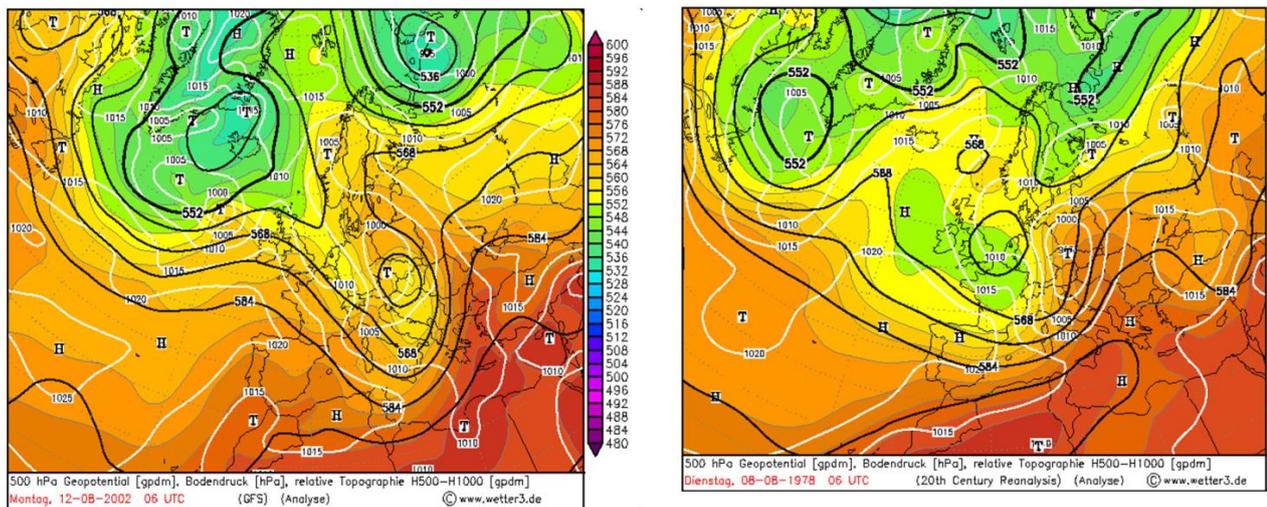


Abbildung 25: Wettersituation über dem atlantisch-europäischen Sektor am 12. August 2002 (links) und am 8. August 1978 (rechts) – Schwarze Linien: Geopotenzial in 500 hPa, Weiße Linien: Bodendruck in hPa, Farbzonen: Relative Topografie 1000/500 hPa

4.2.5 Beispiel 5: Schwellwerte des Niederschlags

Auch beim Niederschlag kann alternativ zum Ansatz in Abschnitt 4.2.4 nicht der Wert, sondern die Überschreitung eines Schwellwerts als Prädiktand analysiert werden. Analog zum Vorgehen bei der Temperatur werden dafür die KlaMuKo-Klassifikationen nur für diejenigen Tage durchgeführt, bei denen das Flächenmittel der jeweiligen Klimaregion einen bestimmten Schwellwert übersteigt. Für den Sommer und eine Schwelle von 10 mm werden dann statt des vollen Kollektivs von 3.680 Tagen lediglich 189 Tage im Flachland, 250 Tage im Hügelland bzw. 371 Tage im Bergland analysiert. Bei einer Schwelle des Flächenmittels von 20 mm sind es im Tiefland 41 Tage, im Hügelland 63 Tage und im Bergland 105 Tage. Die Flächenmittelschwelle von 30 mm wird nur im Sommer im Bergland und im Hügelland erreicht, allerdings an lediglich rund 20 Tagen in den untersuchten 40 Jahreszeiten. Im Winter, wo die täglichen Niederschlagsmengen geringer sind, kann die Schwelle von 10 mm analysiert werden (Tiefland 57 Tage, Hügelland 83 Tage, Bergland 189 Tage). Die Schwelle von 20 mm im Winter wird nur im Bergland an einer geringen Zahl von Tagen (23) im Flächenmittel überschritten. Die Schwelle von 30 mm wird in keiner der Regionen im winterlichen Flächenmittel des Niederschlags übertroffen.

Die von KlaMuKo ermittelten Klassen mit ihrer Belegungszahl und dem Klassenmittelwert des Niederschlags sind in Tabelle 4 für die Betrachtung der Niederschlagssummen sowie der Untermengen von Tagen, an denen Schwellwerte von 10, 20 oder 30 mm übertroffen werden, dargestellt. Es fällt auf, dass bei den Schwellwertüberschreitungen, aber auch bei der Klassifikation des Niederschlags selbst, relativ viele Klassen mit nur einem Mitglied gebildet werden, das ist bei den Schwellwerten eine Folge des relativ kleinen Kollektivs, das mit KlaMuKo untersucht wird. Aber auch bei der Betrachtung aller Tage ohne die Auswahl der Tage mit Schwellwertüberschreitung sind die Extremwerte offenkundig durch deutlich voneinander unterscheidbaren Konstellationen der Prädiktoren charakterisiert, sonst würden sie nicht eigene Klassen bilden. Das ist die Ursache, dass gleiche Mengen an Niederschlag unterschiedliche Ursachen haben können. Die Fokussierung auf Schwellwerte hat eine drastische Reduktion der betrachteten Fälle zur Folge. Das hat zwei Auswirkungen: (i) Die gebildeten Klassen haben eine deutlich stärkere Differenzierung – nicht so sehr bei den Einzelereignissen, aber im „Mittelfeld“; (ii) die Korrelation nimmt zu, weil das Verfahren durch den Ausschluss von Tagen unterhalb der Schwelle die Strukturen in den Prädiktoren deutlicher erkennen kann.

Tabelle 4: Belegungszahl (jeweils obere Zeile) und Klassenmittelwert (jeweils untere Zeile) für den Niederschlag (RR) und mehrere Klimaindikatoren in den Klimaregionen Sachsens des Zeitraums 1971-2010

Klasse/ Prediktand	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RR Som	1	1	1	402	1	37	242	107	272	298	9	68	2052	2	195
Tief	72,9	71,2	37,5	7,1	7,0	4,5	4,3	3,2	2,3	2,0	1,9	1,4	1,1	0,5	0,5
RR Som	2	1	26	33	263	44	54	78	376	396	1127	92	901	283	4
Hügel	62,2	43,9	10,3	9,0	8,9	8,6	7,1	4,5	4,1	2,2	1,6	1,3	1,3	0,4	0,0
RR Som	2	1	1	2	134	292	88	96	498	453	27	1311	631	143	1
Berg	141,0	50,7	31,2	21,0	10,5	9,1	6,2	5,8	4,4	3,1	2,8	2,0	1,2	0,8	0,0
>10 mm	1	1	1	9	7	1	5	12	1	24	78	2	45	1	1
Som Tief	72,9	71,2	58,3	25,5	24,6	19,6	18,9	17,9	17,2	17,1	15,9	14,4	14,0	12,5	112
>10 mm	1	1	6	6	5	6	5	9	1	144	13	3	15	2	33
Som Hügel	82,1	42,2	32,9	29,6	25,2	23,8	21,1	19,6	17,5	16,9	16,1	14,3	14,2	13,6	12,9
>10 mm	1	3	9	1	4	313	1	1	26	3	4	2	1	1	1
Som Berg	209,0	63,8	30,5	25,9	21,5	18,7	17,1	16,5	15,7	14,9	14,9	12,7	12,4	12,1	10,3
>20 mm	1	1	1	1	12	1	2	2	2	1	5	3	6	2	1
Som Tief	72,9	71,2	58,2	37,5	32,9	32,3	30,4	27,0	26,3	24,5	23,6	22,7	22,0	21,3	20,2
>20 mm	1	1	16	8	3	1	3	1	23	1	1	1	1	1	1
Som Hügel	82,1	74,5	35,2	32,6	31,5	30,5	25,2	24,9	24,4	24,3	23,8	23,7	22,2	21,3	20,2
>20 mm	1	9	2	1	3	1	8	14	36	3	1	23	1	1	1
Som Berg	209,0	53,8	52,0	50,5	37,6	35,0	31,1	29,8	29,1	28,9	27,0	27,0	23,4	23,3	22,5
>30 mm	1	1	4	1	1	1	2	20	2	1	1	5	1	1	2
Som Berg	209,0	72,9	66,8	52,8	50,5	50,5	40,9	40,5	39,6	35,0	34,9	34,0	31,1	30,8	30,4
RR Win	67	55	47	16	316	277	9	152	2295	10	183	8	170	2	3
Tief	5,8	5,1	4,7	4,6	3,9	2,3	2,3	2,1	0,8	0,3	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0
RR Win	111	31	340	128	140	7	25	29	2246	171	5	205	169	1	2
Hügel	5,7	5,0	4,8	4,2	3,7	2,5	1,2	1,0	1,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,0	0,0
RR Win	1	1	74	7	19	220	388	61	84	1	6	2679	50	13	6
Berg	13,0	13,0	11,3	11,3	10,4	6,8	6,0	3,7	2,5	2,0	1,7	1,2	1,0	0,4	0,3
>10 mm	1	2	5	2	3	2	1	10	12	3	4	3	2	6	1
Win Tief	29,9	21,6	20,0	15,7	15,5	14,8	13,0	12,9	12,2	12,0	11,8	11,4	11,3	11,1	11,0
>10 mm	2	1	3	1	11	2	9	14	9	3	2	6	12	5	3
Win Hügel	24,6	23,6	19,2	18,1	16,8	14,8	14,2	13,3	13,1	12,9	12,9	12,2	12,0	11,7	10,6
>10 mm	1	2	9	15	4	29	37	39	7	1	35	3	1	4	2
Win Berg	32,9	31,5	25,4	16,0	15,3	15,3	14,9	14,4	13,8	13,8	13,7	13,3	12,8	11,0	10,5

4.2.6 Entwicklungen über die Zeit, Beispiele mit dem Modell MPI ES5 Lauf 1 RCP8.5

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde anhand von Beispielen gezeigt, welche Klassen KlaMuKo bildet, wenn die Datenbasis aus Klimadaten der Gegenwart für die verschiedenen Prädiktanden (Maximumtemperatur, Minimumtemperatur, Niederschlag) besteht – als Werte und auf die Teilmenge der Tage mit Schwellwertüberschreitungen angewandt. Nun erfolgt der Schritt hin zur Analyse von Klimamodell-Daten. Dies erfordert eine Ermittlung der Prädiktoren aus den Daten des Modells. Mit ihnen und den bereits ermittelten KlaMuKo-Klassendefinitionen wird bestimmt, wie häufig die KlaMuKo-Klassen vom Modell in den einzelnen Dekaden repro-

duziert werden. In diesen zeitlichen Verläufen der Klassenhäufigkeiten werden lineare Trends bestimmt. Damit sind Aussagen zur zeitlichen Entwicklung von Extremen möglich.

Maximumtemperatur

Anhand eines Beispiels (Tabelle 5) soll in Langform für alle Dekaden zwischen 1951-1960 und 2091-2100 gezeigt werden, welche zeitliche Entwicklung vorliegt. Weitere Beispiele (Tabelle 6 und folgende) geben die Resultate in verkürzter Form wieder, die auf die Klassenbelegung am Anfang und am Ende des Zeitraums fokussiert, sowie den prozentualen Trend wiedergibt.

In der Langform zeigen die ersten 15 Datenzeilen die prozentualen Häufigkeiten der 15 KlaMuKo-Klassen (zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden nicht die Absolutzahlen der Klassenbelegung verwendet, sondern ihr prozentualer Anteil) für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100. Die Zeilensummen betragen 100. Darunter folgt in einer blassrot unterlegten Zeile eine Angabe zum Trend. Dieser wurde aus den darüberstehenden 15 Prozentangaben der jeweiligen Klasse bestimmt. Er ist also in prozentualen Einheiten aufgeführt und gibt diesen Trend pro 100 Jahre an. Für die Zeilen A1951 und A2100 wurde zunächst mit Hilfe der ebenfalls bekannten Absolutzahlen der Häufigkeiten eine Trendgeradengleichung bestimmt. Danach wurde die Trendgeradengleichung angewandt und damit der Wert für das erste und das letzte Jahrzehnt bestimmt. Dabei ergeben sich auf Grund der Geradengleichung auch Nachkommastellen bei den Anzahlen. Ein Beispiel aus Tabelle 5: Bei der Klasse 4 steigt der prozentuale Anteil an der Gesamtheit aller Klassen von etwas über 1 % in den ersten Dekaden auf rund 7 % zum Ende des 21. Jahrhunderts an. Die Gesamtzahl der Fälle (ermittelt aus der Trendgeraden!) der Klasse 4 steigt von 4,4-maligem Auftreten in der Dekade 1951-1980 auf ein 52,5-maliges Auftreten in der Dekade 2091-2100 an. Es sei angefügt, dass bei Ermittlung eines negativen Wertes für eine Dekade die Geradengleichung die Anzahl auf 0 gesetzt wird, wie es beispielsweise in den ersten drei Klassen der Fall ist. Eine wichtige Angabe findet sich in der hellrot unterlegten letzten Zeile der Tabelle. Dort ist der jeweilige Klassenmittelwert (KMW) aufgeführt, wie er aus den Klimadaten bestimmt wurde. Im konkreten Fall der Maximumtemperatur im Sommer an den Tieflandstationen kann dies aus dem ersten Zeilenblock von Tabelle 2 nachgeprüft werden. Dieser Zahl ist zu entnehmen, ob es sich z. B. um „kalte“ oder „warme“ Klassen bezüglich des Flächenmittels der Maximumtemperatur in der entsprechenden Klimaregion handelt.

Einige aufschlussreiche Sachverhalte sind in Tabelle 5 zu konstatieren.

- Die acht wärmsten Klassen zeigen durchweg einen Anstiegstrend, der in prozentualen Einheiten mindestens 3 %, zum Teil über 5 % beträgt.
- Wie per Regressionsgerade aus den absoluten Häufigkeiten der Klassen bestimmt, sind die fünf wärmsten Klassen am Anfang des Zeitraums in den Modellrechnungen so gut wie abwesend. Sie nehmen aber im Laufe des 21. Jahrhundert auf Zählungen von 40 bis 50 pro Jahrzehnt zu, das ist eine beachtliche Veränderung des Anteils.
- Besonders starke Rückgangsentwicklungen sind bei den Klassen mit starker Belegung (Nr. 9 und 10) zu verzeichnen, die aber wegen ihrer Klassenmittelwerte nicht den Extremen zuzurechnen sind.
- Die „kalten Klassen“ mit einem Mittelwerte der Maximumtemperatur für die verwendeten Stationen zwischen rund 15 und 13 °C zeigen ebenfalls Abnahmetendenzen, wiewohl diese nicht so stark sind wie die Zunahmetendenzen der „warmen Klassen“.

Zusammenfassend sind aus den Rechnungen dieses Klimamodells (MPI ESM mit dem Treibhausgas-Szenario RCP8.5) deutliche Anstiege für die Häufigkeit des Auftretens von Temperaturextremen in der Untersuchungsregion zu erwarten.

Tabelle 5: Häufigkeit (in Prozent) der 15 KLaMuKo-Klassen für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100 sowie prozentualer Trend und Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Maximumtemperatur im Sommer für sächsische Klimastationen in einer Höhe bis 300 m ü. NN

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1951-60	0,0	0,5	0,1	1,7	1,1	3,0	10,6	16,4	23,2	29,7	7,7	1,0	3,4	0,1	1,4
1961-70	0,0	0,1	0,0	1,0	0,4	1,4	4,1	16,6	29,3	37,6	5,3	0,2	2,5	0,1	1,2
1971-80	0,1	0,0	0,2	1,1	1,2	3,2	11,0	16,4	30,0	29,2	4,3	0,4	1,8	0,1	0,9
1981-90	0,0	0,4	0,1	0,8	1,2	3,5	9,7	18,3	32,5	28,7	2,5	0,2	1,4	0,0	0,8
1991-00	0,0	0,4	0,1	1,6	1,2	2,8	9,9	16,1	30,4	28,6	4,7	0,3	2,1	0,2	1,5
2001-10	0,2	0,5	0,6	1,9	2,6	3,8	12,1	17,1	26,9	28,9	3,0	0,1	1,3	0,0	0,9
2011-20	0,2	0,9	0,8	3,2	2,9	3,2	13,4	17,8	31,4	23,2	1,5	0,0	1,3	0,0	0,3
2021-30	0,2	0,3	0,7	2,4	1,8	3,6	11,7	18,2	31,1	25,8	2,5	0,0	1,4	0,0	0,3
2031-40	1,0	1,7	1,7	4,7	2,8	5,1	16,8	18,2	27,0	16,8	2,2	0,0	1,2	0,0	0,8
2041-50	0,5	1,1	1,5	2,3	3,9	4,5	10,8	24,6	28,7	18,6	2,0	0,1	1,0	0,0	0,5
2051-60	2,3	2,0	3,0	5,5	3,0	5,0	17,4	22,4	26,0	11,5	1,3	0,0	0,2	0,0	0,3
2061-70	1,8	2,1	2,7	3,5	4,2	5,1	16,0	25,4	28,2	10,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,2
2071-80	3,0	3,2	4,1	5,2	5,4	5,9	15,8	20,6	25,5	10,3	0,7	0,0	0,2	0,0	0,1
2081-90	5,8	3,8	5,1	4,5	5,1	6,8	17,6	22,6	21,5	7,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
2091-00	7,0	5,2	4,9	7,2	7,1	6,6	18,7	21,7	14,7	6,6	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
Trend (%)	4,1	3,0	3,8	3,7	4,0	3,1	7,5	5,6	-5,7	-21,1	-4,4	-0,4	-2,1	-0,1	-0,9
A1951	0,0	0,0	0,0	4,4	1,4	18,8	71,9	143,2	286,0	327,8	51,9	4,3	24,2	0,9	11,7
A2100	52,3	39,0	48,7	52,5	52,6	59,1	168,2	215,3	212,4	56,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KMW	35,7	33,4	32,3	31,1	30,7	30,1	27,4	25,1	22,1	18,5	16,3	15,1	14,6	13,8	12,6

In der Folge werden die Daten anhand von verkürzten Tabellen dargestellt, bei denen der Teil mit den prozentualen Anteilen der einzelnen Dekaden ausgeblendet ist und die Aussagen aus den untersten vier Zeilen gewonnen werden.

Die Entwicklung der KLaMuKo-Klassen für die Maximum-Temperatur der Bergregion auf Grund der Daten des MPI-ESM Lauf 1, RCP8.5 ist in Tabelle 6 dargestellt. Die Klassenmittelwerte sind auch im dritten Zeilenblock von Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 6: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5. Prädiktand: Maximumtemperatur im Sommer für sächsische Klimastationen im Bergland Höhe über 600 m ü. NN

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend (%)	2,0	6,3	1,4	10,5	1,6	-0,5	10,1	2,5	-10,1	-14,6	-1,3	-1,5	-5,6	-0,2	-0,4
A1951	0,0	0,0	1,8	0,0	22,9	15,3	97,2	222,4	272,1	214,5	13,7	16,2	70,3	1,9	4,4
A2100	25,4	80,6	19,6	135,8	42,8	8,5	227,0	254,4	142,1	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KMW	29,4	26,6	25,2	24,0	23,2	21,1	20,5	17,3	14,1	11,0	10,3	8,7	8,4	7,7	5,7

Für die ersten fünf Klassen, die jeweils Tage mit Temperaturextremen zusammenfassen, ist das Grundmuster vergleichbar der Analyse von Klimaprojektionen für die Tieflandstationen (vgl. Tabelle 5): In der Gegenwart seltene Klassen nehmen zum Teil stark zu. Die Trends sind allerdings in ihrer Stärke nicht so einheitlich wie im Tiefland: Es gibt Klassen mit einem Zunahmetrend von etwas über 1 % in 100 Jahren, wobei auch mehr als 10 % Anstieg projiziert werden (Klasse 4). Im Bereich der nichtextremen Klassen 6 bis 10 gibt es deutliche Abnahme-, aber auch deutliche Zunahmetrends. Bei den „kalten Klassen“ 11 bis 15 ist zu konstatieren, dass die ihnen zu Grunde liegenden Atmosphäreigenschaften am Ende des 21. Jahrhunderts von diesem Klimamodell mit diesem Treibhausgas-Szenario quasi nicht mehr simuliert werden.

Minimumtemperatur

Trend bei den Minimumtemperaturwerten im Winter in der Bergregion in der Projektion mit MPI ESM Lauf 1, RCP8.5 werden in Tabelle 7 gezeigt. Am auffälligsten sind die relativ starken Zunahmen bei Klassen, deren Mittelwert relativ hoch ist (Klassen 1 bis 5), Abnahmen der Häufigkeit sind bei den „kalten Klassen“ zu verzeichnen. Insbesondere die Klassen, in denen Atmosphärenzustände zusammengefasst sind, die zu extrem niedrigen Minimumtemperaturwerten an den Bergstationen führen, werden tendenziell am Ende des 21. Jahrhunderts verschwunden sein.

Tabelle 7: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Minimumtemperatur im Winter für sächsische Klimastationen im Bergland Höhe über 600 m ü. NN

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend %	4,1	7,8	7,8	3,7	2,9	0,0	-1,7	-7,8	-8,6	-4,9	-1,3	-1,3	-0,2	-0,4	-0,1
A1951	9,6	0,0	72,6	20,8	103,4	5,8	170,1	252,1	174,4	68,5	15,5	14,6	2,3	3,8	1,3
A2100	60,8	98,1	171,6	67,1	139,8	5,9	149,1	154,1	66,5	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KMW	-0,4	-0,8	-1,1	-1,3	-2,3	-2,8	-3,0	-5,6	-9,6	-13,9	-17,0	-17,4	-20,1	-22,0	-23,5

Kenntage der Temperatur (Sommertage, tropische Nächte)

Tabelle 8 zeigt die Untersuchungsergebnisse mit denjenigen Klassen, die KlaMuKo in Klimamessungen identifizierte und bei denen das Mittel über die Stationen der Klimaregion über 25 °C lag (vgl. Abschnitt 4.2.3). Diese Klassen wurden, wie in den vorigen Beispielen, in den Projektionen des Klimamodells MPI ESM Lauf 1, RCP8.5 wiedererkannt und bezüglich der klassenspezifischen Trends dargestellt. Auch wenn die einzelnen KlaMuKo-Klassen nun feiner differenziert sind – der Vorteil ist begrenzt, denn die Trendentwicklungen bei den Extremen verteilen sich nun

auf mehr Klassen. Im Beispiel wurde mit einer Klassifikation gearbeitet, die die besonderen Atmosphärenzustände herausarbeitet, die mit Temperaturwerten des Bereichs oberhalb von 25 °C in Zusammenhang stehen. Zudem wurden nur Tage berücksichtigt, an denen die Schwelle an allen Stationen der Region übertroffen wurde.

Tabelle 8: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Selektion der Tage Maximumtemperatur über 25 °C im Sommer für sächsische Klimastationen im Tiefland (Höhe unter 300 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	1,1	2,1	0,6	4,7	5,2	6,8	0,5	5,4	1,8	2,6	-1,0	2,5	0,4	-34,5	1,8
A1951	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,2	0,0	46,8	17,5	43,3	110,4	4,2	6,4	677,1	18,5
A2100	14,5	27,6	7,7	60,2	66,4	112,6	6,0	116,6	40,3	76,7	97,7	36,5	11,9	233,4	41,9
KMW	35,9	35,7	34,1	33,5	32,2	30,2	30,0	27,9	26,6	26,5	26,0	26,0	25,7	25,6	25,5

Alternativ können die Daten für KlaMuKo auch anders aufbereitet werden. Dafür wird für jeden Tag der Anteil der Stationen berechnet, an dem die Schwelle überschritten wird. Bei fünf Stationen in einer Region kann der neue Prädiktand also die Werte 0 (keine Station hatte eine Schwellwertüberschreitung), 0,2 (Überschreitung an einer Station), 0,4 (Überschreitung an zwei Stationen), 0,6 (Überschreitung an drei Stationen), 0,8 (Überschreitung an vier Stationen) oder 1,0 (Überschreitung an allen Stationen) annehmen. Anders ausgedrückt, es ist die Wahrscheinlichkeit, dass an einem Tag eine Schwellwertüberschreitung zu verzeichnen ist. Untersucht werden alle Tage einer Jahreszeit.

Anmerkung: Aus den Klimadaten des Zeitraums 1971-2010 konnte eine multiple Korrelation von 0,83 für die Rekonstruktion des Prädiktanden durch die optimalen Prädiktoren ermittelt werden. Das liegt zwar unterhalb der Korrelation von 0,96, die für die Rekonstruktion des Prädiktanden Maximumtemperatur gefunden wurde (s. Abschnitt 4.2.1), aber der Prädiktand ist ja auch nicht der Bereich aller auftretenden Temperaturwerte, sondern umfasst nur eine kleine Anzahl verschiedener Werte, von denen deutlich mehr als die Hälfte = 0 sind. Für das KlaMuKo-Verfahren bedeutet das eine Reduktion der Wirksamkeit, aber unter diesen Umständen ist eine Korrelation von 0,83 ebenfalls beachtlich.

Die nachstehende Tabelle 9 zeigt die Trendentwicklungen der KlaMuKo-Klassen für den Prädiktanden Wahrscheinlichkeit, dass die Maximumtemperatur an einer oder mehreren Stationen über 25 °C liegt.

Tabelle 9: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass die Maximumtemperatur über 25 °C liegt (Sommertage); Untersucht wurden die Tage des Sommers für die sächsische Klimaregion Tiefland (Höhe unter 300 m ü. NN).

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	3,6	6,2	7,0	0,6	7,9	0,9	6,8	-2,9	-16,1	-0,7	-5,1	-3,7	-0,1	-1,2	-3,8
A1951	0,0	0,0	4,5	9,0	37,2	10,0	127,5	310,1	229,8	8,1	68,8	85,0	0,9	11,9	43,2
A2100	46,9	79,3	95,2	17,3	138,9	22,1	214,6	273,0	23,1	0,0	3,0	42,9	0,0	0,0	0,0
KMW	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Insgesamt 6 der 15 KlaMuKo-Klassen besitzen den Klassenmittelwert 1,0. Das heißt, in ihnen sind so gut wie ausschließlich Tage versammelt, an denen an allen Stationen der Klimaregion eine Schwellwertüberschreitung auftrat. Das ist keineswegs zu erwarten. Die Klassen 1 und 2 besitzen tatsächlich nur Tage mit einem Prädiktandenwert von 1. Bei den nachfolgenden Klassen ist durch Rundung ein Wert von 1,0 tabelliert, hier mischen sich in die Klassenmitglieder einige Tage, an denen der Prädiktand unter 1,0 liegt – allerdings sind es sehr wenige. Jede der Klassen steht zudem für eine andere Konstellation der Atmosphärenfaktoren (Prädiktoren), so dass daraus geschlossen werden kann, dass das Auftreten von Überschreitungen der 25 C-Schwelle bei der Maximumtemperatur an allen Stationen auf Grund von ganz unterschiedlichen Ursachen erfolgt.

Tropische Nächte mit einer nächtlichen Minimumtemperatur über 20 °C sind im Klima der Gegenwart sehr selten: 79 Fälle wurden in den Jahren 1971-2010 an den Klimastationen im Tiefland registriert. Dennoch sind sie wegen der Klimawirkung sehr wichtig, so dass es sinnvoll ist, ihre modellierte Entwicklung zu betrachten. Tabelle 10 zeigt für die Projektionen mit dem Modell MPI ESM Lauf 1, RCP8.5 diese Entwicklung auf.

Tabelle 10: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass die Minimumtemperatur über 20 °C liegt (Tropennächte); Untersucht wurden die Tage des Sommers für die sächsische Klimaregion Tiefland (Höhe unter 300 m ü. NN).

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	0,4	1,0	0,9	0,6	1,3	2,9	0,9	6,4	13,6	-0,1	-13,7	-1,9	-0,1	-12,4	0,7
A1951	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	236,5	0,6	177,4	27,7	2,2	476,3	10,0
A2100	4,7	13,0	12,8	7,6	16,9	36,8	11,7	82,3	406,1	0,0	0,7	2,8	0,0	317,4	19,1
KMW	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Die Aufbereitung der Klimadaten zur Bestimmung der KlaMuKo-Klassen erfolgte als Wahrscheinlichkeit, dass an einer oder mehreren Stationen eine Tropennacht auftrat (1,0: alle Stationen, 0,0: keine Station). Dazu sei eine Betrachtung der Verhältnisse vorausgeschickt, wie sie in den Klimamessungen erkennbar ist. Die unterste Zeile von Tabelle 10 gibt für jede KlaMuKo-Klasse den zugehörigen Mittelwert des Prädiktanden (also einer Zahl zwischen 0 und 1) an. Die für die Reproduktion des Prädiktanden „Tropennächte“ gefundenen Prädiktoren (Absolute Feuchte in 850 hPa sowie Größen der Temperaturschichtung und -advektion) ergeben einen multiplen Korrelationskoeffizienten von 0,42. Dies ist ein recht niedriger Wert, der darauf hinweist, dass es bei dieser Größe eine zu beachtende Restunsicherheit der Beschreibung durch die KlaMuKo-Klassen gibt.

Zunächst ist bemerkenswert, dass es keine Klasse gibt, in der Tage enthalten sind, an denen an allen Tieflandstationen eine Tropennacht auftrat. Am 13.08.2003, auf dem Höhepunkt der starken Hitzewelle, fehlte das Auftreten an nur einer Station. An 72 der 79 Tage mit Tropennächten trat die Schwellwertüberschreitung an mindestens der Hälfte der Stationen auf, an 36 Tagen gab es eine Tropennacht nur an einer der Stationen in der Klimaregion. Die KlaMuKo-Klassen 1 bis 8 enthalten jeweils eine Mixtur aus Tagen mit unterschiedlichem Anteil an Stationen mit Tropennächten. Es kommt sogar vor, dass in diesen KlaMuKo-Klassen Tage ohne Tropennächte (Prädiktand = 0) enthalten sind. Das liegt daran, dass die Klassifikation extreme atmosphärische Zustände gruppiert. An einigen dieser Tage wird die Schwelle für die Tropennächte knapp verfehlt, aber sie sind dennoch zutreffend in eine Extremklasse einsortiert. Zu den Trends: In der Wiedererkennung mit MPI ESM Lauf 1 sind die Klassen 1 bis 8 dadurch charakterisiert, dass sie vom Modell in der Gegenwart nur sehr selten oder gar nicht reproduziert werden, um dann aber zum Ende des 21. Jahrhunderts zu Zählungen zwischen rund 5 und rund 80 pro Dekade – letzteres

aber in einer Klasse, in der der Anteil der Tropennächte relativ gering ist. Wie bei der Betrachtung der Schwellwert-überschreitung von 25 °C bei der Maximumtemperatur (Tabelle 9) weist die Vielzahl von Klassen mit Tropennächten darauf hin, dass es verschiedene Konstellationen der relevanten atmosphärischen Parameter gibt, die in Zusammenhang mit Tropennächten stehen. Es ist aber bei der Interpretation Vorsicht geboten, weil die Zahl der „Beispiele“ im Gegenwarts-klima zum Aufbau zuverlässiger statistischer Beziehung gering ist und weil die Klassifikation eine relativ geringe Korrelation hervorbringt.

Niederschlag

Zur Erinnerung: Die mit WEREX VI ermittelten Niederschlagveränderungen weisen auf Abnahmen im Sommer und Jahr sowie leichte Zunahmen im Winter hin (s. Abschnitt 4.1), allerdings mit einer Methodik, die auf die Beschreibung der mittleren Verhältnisse abzielt. KlaMuKo wiederum fokussiert auf die Extreme, allerdings nicht in der räumlichen Auflösung, wie es bei WEREX VI der Fall ist, sondern für drei Klimaregionen Sachsens und, in einer zusätzliche aufbereiteten Datenbasis, auch für 10 Räume (vgl. Abschnitt 2.2.2). Bei der Interpretation ist außerdem zu beachten, dass die Beschreibung der komplexen Zusammenhänge, in die Niederschlagsereignisse eingebettet sind, relativ große Restunsicherheiten mit sich bringen, was sich in multiplen Korrelationen wiederfindet, die deutlich unter denjenigen der Temperaturgrößen liegen – abgesehen von einigen Ausnahmen bei speziellen Temperaturkennzahlen (Tropennächte), deren Korrelationen geringer als beim Niederschlag sind.

In der Folge wird überwiegend der Niederschlag in der Bergregion (Stationshöhe über 600 m ü. NN) betrachtet, da dort aufgrund der relativ hohen Niederschlagsmengen mögliche Strukturen in den Extremen relativ ausgeprägt sein dürften.

Tabelle 11 gibt die projizierten Entwicklungen der KlaMuKo-Klassen wieder. Deren Klassenmittelwerte sind in der untersten Zeile wiedergegeben (vgl. Abschnitt 4.2.4 und Tabelle 4). Es fällt auf, dass die Konstellation der atmosphärischen Bedingungen, die zu besonders starken Regenereignissen im Klima der Gegenwart geführt hat (Klasse 1 mit einem Klassenmittelwert von über 140 mm) von den Modelldaten projiziert wird. Allerdings ist in dieser Klasse ein Trend praktisch nicht vorhanden. Bei den Klassen 2 bis 8 werden Abnahmetrends unterschiedlicher Größenordnung von -0,1 bis -3% projiziert. Relativ deutliche Abnahmetrends gibt es bei den Klassen 5 und 6, die bereits bei der Vorstellung der KlaMuKo-Klassen (Abschnitt 4.2.4) hervorgehoben wurden, weil sie relativ häufig auftreten und dabei einen verhältnismäßig hohen Mittelwert des Niederschlags beinhalten.

Tabelle 11: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag im Sommer für sächsische Klimastationen im Bergland (Höhe über 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	0,0	-0,1	-0,3	-0,6	-3,0	-0,9	-0,5	-0,3	10,9	-2,0	-0,6	-2,0	-0,4	-4,6	4,3
A1951	6,1	2,8	6,4	11,0	78,4	35,6	116,9	23,0	81,9	127,3	106,7	65,1	36,9	199,8	21,9
A2100	6,7	1,0	3,2	3,0	38,7	23,5	110,9	19,2	221,7	101,8	99,5	40,0	31,6	140,5	77,7
KMW	140,9	50,7	31,2	21,0	10,5	9,1	6,2	5,8	4,4	3,1	2,9	2,0	1,2	0,8	0,0

Wird die Analyse der zeitlichen Entwicklungen für die Vegetationsperioden 1 (VP1, Tabelle 12) und 2 (VP2, Tabelle 13) vorgenommen, so fällt zunächst auf, dass bei der VP1 eine Konstellation auftrat, in der die Wiedererkennung der KlaMuKo-Klassen im Modell unzureichend war. Zumindest lässt sich im Vergleich mit den Ergebnissen für den Sommer (Tabelle 11) konstatieren, dass die Extremklassen in der VP1 deutlich geringere mittlere Niederschlags-

mengen als die KlaMuKo-Klassen für den Sommer repräsentieren. In der VP2 ist ein ähnliches Trendverhalten der Extremklassen wie im Sommer zu erkennen: Leichte Abnahmen oder Gleichbleiben, aber keine Zunahmen.

Tabelle 12: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 1 (April, Mai, Juni) für sächsische Klimastationen im Bergland (Höhe über 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	-0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
A1951	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	887,8	0,0	29,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
A2100	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	880,6	0,0	21,9	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
KMW	37,4	21,6	15,5	9,1	8,4	8,1	6,0	5,6	2,2	1,5	1,0	0,3	0,3	0,1	0,0

Tabelle 13: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 2 (Juli, August, September) für sächsische Klimastationen im Bergland (Höhe über 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-1,1	0,0	-0,2	-0,8	0,0	-7,4	0,4	-1,2	-3,5	-0,3	6,8	6,8	0,7	-0,7	0,4
A1951	20,8	0,0	2,2	24,5	1,3	298,9	31,6	60,3	89,8	32,4	200,9	82,5	37,3	14,8	22,7
A2100	7,2	0,4	0,3	14,4	1,2	204,0	36,1	44,5	45,1	28,7	289,1	170,0	46,3	5,5	27,6
KMW	72,9	67,8	50,7	44,9	21,6	10,6	7,9	5,1	4,6	3,8	2,3	0,8	0,6	0,0	0,0

Die Ergebnisse in den Tabellen 11, 12 und 13 (Bergregion mit Stationshöhe über 600 m ü. NN) betrachten einen Prädiktanden, der sich aus den Niederschlagsmengen an den drei Klimastationen der Region 3 (vgl. Abschnitt 2.2.1) bestimmt. Alternativ wurden auch Analysen mit dem Niederschlag der sechs Niederschlagsstationen und der Klimastation im Raum 5 (westliches Erzgebirge, vgl. Abschnitt 2.2.2) vorgenommen, der (i) eine andere räumliche Fokussierung besitzt als die Region 3 in der Stationen oberhalb von 600 m ü. NN zusammengefasst sind und (ii) die mittlere Niederschlagsmenge aus mehr Stationen ermittelt als das bei Region 3 möglich ist.

Durch die räumliche Fokussierung wird die Interpretation der zeitlichen Entwicklungen der Extremniederschläge nicht einfacher, denn es kommen in den Ergebnissen sowohl Abnahme- als auch Zunahmetrends vor. Dies trifft auch für den Niederschlag in der Vegetationsperiode 1 im Raum 5 (westliches Erzgebirge) zu (Tabelle 14). Andererseits finden sich bei dieser räumlichen Fokussierung in der Vegetationsperiode 2 durchaus deutlicher erkennbare Trendentwicklungen im 21. Jahrhundert, wie Tabelle 15 zeigt.

Tabelle 14: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 1 (April, Mai, Juni) für das westliche Erzgebirge (Raum 5)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-0,4	0,3	0,3	-1,1	-0,8	-1,5	-1,4	0,7	-2,6	7,6	-1,2	8,1	-5,3	-1,0	-1,7
A1951	7,3	8,7	37,1	25,7	13,3	24,9	38,2	22,9	218,8	57,2	30,0	141,8	126,3	90,3	77,4
A2100	2,5	12,6	41,4	11,7	3,0	5,8	20,5	31,8	184,9	154,8	15,1	245,7	57,6	77,3	55,5
KMW	52,6	50,9	38,2	28,6	26,5	12,4	11,2	9,9	7,0	4,5	2,9	2,7	1,7	1,6	0,8

Tabelle 15: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag in der Vegetationsperiode 2 (Juli, August, September) für das westliche Erzgebirge (Raum 5)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-1,3	-0,1	0,0	-0,4	-4,7	-4,3	-0,5	3,0	-1,6	0,3	3,8	3,8	1,7	0,4	-0,3
A1951	29,4	2,3	5,5	7,9	142,3	215,5	111,0	75,1	92,2	7,1	101,1	58,2	29,0	33,2	10,7
A2100	12,4	0,6	5,9	3,0	82,2	160,4	104,6	114,2	72,1	10,9	150,3	106,6	50,9	38,4	7,3
KMW	61,9	52,6	25,4	24,3	13,9	6,7	4,7	4,7	2,5	1,5	1,5	0,9	0,6	0,5	0,0

Das Extremverhalten des Niederschlags im Winter wird von KlaMuKo nicht einheitlich dargestellt (s. Tabelle 16). Die Trends für die vier niederschlagsreichsten Klassen sind sehr gering und weisen auf leichte Abnahmen hin, während die Klassen 5 und 7, die sowohl für relativ viele Fälle (bei Klasse 5 zumindest am Ende des 21. Jahrhunderts) als auch für relativ hohe Niederschlagsmengen stehen, Zunahmetrends aufweisen. Die Klasse 6 wiederum zeigt ein leichtes Abnahmeverhalten. Ein solches wenig einheitliches Verhalten ist zum Teil sicher dadurch verursacht, dass Extremniederschläge der Größenordnung wie im Sommer im Winter nicht vorkommen und das auf Extreme abzielende Verfahren dadurch weniger erfolgreich arbeitet.

Tabelle 16: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Niederschlag im Winter für sächsische Klimastationen im Bergland (Höhe über 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-0,0	-0,1	-0,7	-0,5	5,7	-0,3	1,1	-2,9	3,5	-0,1	1,1	-5,0	-0,2	-0,4	-1,3
A1951	0,3	2,1	61,3	25,6	10,0	32,5	188,1	75,8	85,3	4,3	10,4	329,3	28,2	19,3	29,8
A2100	0,0	1,5	52,4	19,0	81,7	28,8	202,3	39,6	129,1	3,4	24,7	266,5	25,6	14,0	13,9
KMW	13,0	13,0	11,3	11,3	10,4	6,8	6,0	3,7	2,5	2,0	1,7	1,2	1,0	0,4	0,2

Die in Tabelle 16 beschriebenen Trends basieren auf der Analyse aller Tage der Jahreszeit. Ein wenig deutlicher werden die Trends im Winter, wenn bei der KlaMuKo-Analyse eine Klassifizierung angewandt wird, bei der nur Tage oberhalb einer Niederschlagsmenge von 10 mm betrachtet werden (Tabelle 17). Das sind für die Bestim-

mung der Klassenmittelwerte aus den Klimadaten der Bergregion 189 statt 3.610 Wintertage. Bei den beiden niederschlagsreichsten Klassen sind auch in dieser Aufbereitungsform keine deutlichen Trends zu erkennen, aber die Klassen 3 bis 8 weisen deutliche Zunahmen auf. Dies kann daran liegen, dass bei dieser Klassifikation sowohl hinreichend viele Tage analysiert werden können, als auch die Wettersituationen mit geringem Niederschlag (wie es bei der Analyse aller Tage in Tabelle 16 der Fall ist) das Verfahren in seiner Effizienz reduzieren.

Tabelle 17: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KLaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Selektion der Tage mit Niederschlag über 10 mm im Winter für sächsische Klimastationen im Bergland (Höhe über 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-0,1	0,1	2,4	4,0	3,5	2,3	5,1	4,2	-2,6	2,2	-10,4	0,2	-1,0	-9,7	-0,3
A1951	0,9	0,5	7,1	14,6	26,2	48,0	168,8	162,0	36,8	0,0	240,8	11,0	29,5	152,3	6,6
A2100	0,0	1,4	37,4	64,7	70,1	76,5	233,3	215,4	4,5	27,3	106,4	13,6	16,7	35,2	2,5
KMW	32,9	31,5	25,4	16,0	15,3	15,3	14,9	14,4	13,8	13,8	13,7	13,3	12,8	10,9	10,5

Anmerkung 1 – wenn im Winter nur Tage mit mehr als 20 mm analysiert werden, verliert sich die Einheitlichkeit der Trends wieder. Das liegt an der sehr kleinen Datenbasis in den Klimadaten, denn es werden lediglich 23 von 3.610 Tagen betrachtet. Eine Schwelle von 30 mm wird im Winter zu selten erreicht, als dass eine KLaMuKo-Klassifikation sinnvoll wäre.

Anmerkung 2 – im Sommer sorgt eine Reduktion der betrachteten Tage auf Schwellwertüberschreitungen von 10, 20 oder 30 mm nicht für eine Verbesserung der Einheitlichkeit der Zu- oder Abnahmetrends. Dort ist offenkundig die Klassifikation auf der Basis aller Tage (s. Tabelle 11) sinnvoll, die hinreichende Trennschärfe der Extremklassen bietet.

Anmerkung 3 – bei den Temperaturindikatoren wurde eine alternative Betrachtung angewandt, bei der der Prädiktand die Wahrscheinlichkeit ist, dass an einer oder mehreren Stationen ein bestimmter Schwellwert überschritten wird. Auch diese Betrachtungsweise führt bei den Niederschlagsextremen nicht zu einheitlichen Trends in den Extremklassen der Regionen und Jahreszeiten. Zudem liegt die multiple Korrelation zwischen dem Prädiktanden und den gefundenen Prädiktoren mit 0,3 bis 0,4 sehr niedrig.

Für die beiden nachstehenden Auflistungen (Tabelle 19 und Tabelle 20) wurde eine andere Aufbereitungsform gewählt. Bisherige Analysen von Schwellwertüberschreitungen orientierten sich an festen Schwellwerten (z. B. 25 °C oder 10 mm) – bestimmt aus den Klimadaten des Zeitraums 1971-2010. Hier wurde stattdessen das 90-Perzentil, also eine Schwelle, die von 10 % der Werte übertroffen wird, als Schranke angesetzt. Diese ist je nach Region unterschiedlich. Auch bei dieser Perzentil-Betrachtung wurde die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass an einer oder mehreren Stationen diese Schwelle übertroffen wird; das heißt der Wertebereich des Prädiktanden liegt zwischen 0 (an keiner Station wurde die Schwelle überschritten) und 1 (an allen Stationen wurde die Schwelle überschritten). Die Perzentile wurden für das ganze Jahr bestimmt, sind aber an den Stationen unterschiedlich (Tabelle 18).

Tabelle 18: Perzentile des Niederschlags, ermittelt aus den Messungen im Zeitraum 1971-2010 für die Klimastationen in Sachsen

Station	Region	Perzentil 90	Perzentil 95
Kubschütz	Tiefland	5,5 mm	9,0 mm
Dresden-Klotzsche	Tiefland	5,6 mm	9,2 mm
Görlitz	Tiefland	5,5 mm	9,2 mm
Leipzig-Holzhausen	Tiefland	5,1 mm	8,8 mm
Flughafen Leipzig-Halle	Tiefland	4,5 mm	7,7 mm
Garsebach bei Meißen	Tiefland	5,3 mm	8,7 mm
Oschatz	Tiefland	4,8 mm	8,0 mm
Chemnitz	Hügelland	6,0 mm	10,0 mm
Dippoldiswalde	Hügelland	6,5 mm	10,5 mm
Bad Elster	Hügelland	6,6 mm	10,1 mm
Plauen	Hügelland	4,8 mm	8,0 mm
Fichtelberg	Bergland	9,4 mm	14,2 mm
Marienberg	Bergland	7,3 mm	11,2 mm
Zinnwald-Georgenfeld	Bergland	8,1 mm	13,1 mm

Tabelle 19: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass der Niederschlag oberhalb des 90-Perzentils des Zeitraums 1971-2010 liegt; Jahreszeit: Sommer (Stationen oberhalb von 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-0,4	-1,7	-3,7	-0,8	0,8	-0,2	-2,9	0,5	-1,1	2,3	-1,0	0,6	4,3	0,2	3,0
A1951	7,7	49,1	166,2	46,2	4,6	34,5	232,9	12,6	32,2	107,0	30,0	14,6	70,7	73,3	38,5
A2100	2,7	27,7	118,8	35,8	14,4	31,4	195,1	19,3	17,8	136,9	17,5	22,3	127,2	75,3	77,7
KMW	1,0	0,8	0,6	0,6	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0

Tabelle 20: Prozentualer Trend für 100 Jahre sowie Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade für die 15 KlaMuKo-Klassen; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Wahrscheinlichkeit, dass der Niederschlag oberhalb des 90-Perzentils des Zeitraums 1971-2010 liegt; Jahreszeit: Winter (Stationen oberhalb von 600 m ü. NN)

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Trend	-0,1	0,0	0,5	-0,4	-1,1	3,3	-0,1	3,4	0,7	-1,2	-3,0	-0,8	0,0	0,6	-1,8
A1951	1,4	0,5	3,3	22,6	80,1	160,3	4,6	63,8	36,9	45,7	366,7	44,5	19,0	0,1	52,6
A2100	0,2	0,8	9,0	17,4	66,8	201,4	3,9	106,3	45,6	31,1	328,5	34,8	19,1	7,2	30,5
KMW	1,0	1,0	0,7	0,7	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Die KlaMuKo-Klassifikationen, bestimmt aus den Klimamessungen im Zeitraum 1971-2010, verfügen über eine multiple Korrelation um 0,5. Sie sind also in ihrer Beschreibungsgüte etwas besser als die Betrachtungen mit festen Schwellwerten. Bezüglich der Trends ist festzustellen dass diese sowohl im Sommer (Tabelle 19) als auch im Winter (Tabelle 20) nicht einheitlich in dieselbe Richtung weisen, wiewohl im Sommer ein leichtes Überwiegen der Abnahmetrends und im Winter zumindest bei einigen Klassen ein leichter Zunahmetrend auftritt.

4.2.7 Gegenüberstellung von Niederschlagstrends in Klimaregionen und Klimaräumen

Wie in der einleitenden Beschreibung in Abschnitt 1.4 erwähnt, ist KlaMuKo vom Wesen her keine Regionalisierungsmethode. Vielmehr aggregiert sie die Daten einer Mindestzahl von Stationen aus einer Klimaregion, um stabil einsetzbar zu sein. Es sind aber nur wenige Klimastationen vorhanden, die zur Aufteilung in drei Klimaregionen Sachsens dienen (s. Abschnitt 2.2.1). Damit beschränkt sich die räumliche Vielfalt, Entwicklungen in spezifischen Regionen betrachten zu können. Beim Niederschlag sind deutlich mehr Stationen vorhanden. Damit lassen sich in Sachsen 10 Niederschlagsräume definieren (s. Abschnitt 2.2.2). Inwiefern diese räumliche Verfeinerung auch für KlaMuKo sinnvoll ist, soll in diesem Abschnitt in einer Zusatzuntersuchung des Niederschlags betrachtet werden. Dazu werden die 15 KlaMuKo-Klassen für jeden der 10 Räume aus den Messungen des Zeitraums 1971 bis 2010 ermittelt. Danach erfolgt eine Wiedererkennung dieser Klassen in Lauf 1 von MPI ESM, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5. Der Übersicht halber werden nur die Trends der fünf niederschlagsstärksten KlaMuKo-Klassen K1 bis K5 betrachtet und in Tabelle 21 dargestellt. Anmerkung: Die Ergebnisse für einen der Räume (Raum 5, westliches Erzgebirge) wurden bereits in einem Vergleich der Niederschlags-Ergebnisse aus dem Sommer und den beiden Vegetationsperioden eingeführt (s. Tabelle 14 und Tabelle 15).

Die Trends sind nur in wenigen Regionen und bei wenigen Extremklassen deutlich. Im Sommer besteht für die Stationsgruppen eine Neigung zu Abnahmen der Häufigkeit der Niederschlagsklassen. Vereinzelt wurden aber auch Zunahmen gefunden. Noch deutlicher ist die Uneinheitlichkeit im Winter erkennbar. Verbreitet sind die Trends benachbarter Klassen gegenläufig. Dies gilt sowohl für die drei Klimaregionen R1 bis R3 als auch die 10 Niederschlagsräume.

Es besteht der Eindruck, dass die Kombination der Anforderungen Niederschlag + Extreme + Kleinräumigkeit an die Ergebnisse mit der KlaMuKo-Methodik sehr ambitioniert ist und nur mit Einschränkungen interpretierbar ist.

Tabelle 21: Prozentuale 100-jährige Trends des projizierten Niederschlags in den stärksten 5 Extremklassen (K1 bis K5) für die drei Klimaregionen Sachsens (R1 bis R3) und die 10 Klimaräume (1 bis 10); Modell: MPI ESM Lauf 1 RCP8.5; positive Trends von mehr als 1,0% hellrot, stark positive Trends von mehr als 3% dunkelrot; negative Trends über -1,0% hellblau und stark negative Trends über -3% dunkelblau unterlegt

Region/ Raum	R1	R2	R3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Som K1	-0,1	-0,9	0,0	-0,0	-0,2	0,1	0,0	-0,4	0,1	-0,1	-0,7	-0,8	-1,1
Som K2	-0,5	-0,1	-0,1	-1,1	-1,1	-0,2	0,0	0,3	-0,7	-0,4	-0,2	1,0	0,1
Som K3	0,0	-1,7	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-1,0	0,3	0,0	-0,0	-0,5	-0,5	0,5
Som K4	-1,3	-5,2	-0,6	-0,3	-2,0	-0,9	0,0	-1,1	-0,2	-0,2	-0,7	-0,8	-0,4
Som K5	-0,2	-0,2	-3,0	-4,8	-4,8	-2,3	1,9	-0,8	-1,1	0,3	-1,7	-0,7	-0,1
Win K1	0,4	1,0	-0,0	-2,2	-0,1	-0,0	-2,3	-0,4	1,4	-0,2	-0,4	-0,1	0,8
Win K2	-1,9	0,1	-0,1	0,4	6,6	0,9	2,2	-0,2	-1,0	-2,1	1,7	0,7	0,3
Win K3	1,7	0,4	-0,7	1,0	-1,2	-0,7	2,7	-0,1	0,1	-0,3	0,5	0,9	2,9
Win K4	0,3	3,7	-0,5	1,4	0,5	-0,0	17,1	1,7	1,9	-0,1	-3,5	-4,0	-1,5
Win K5	0,6	-3,7	5,7	2,4	-7,0	-0,6	-1,0	-1,8	-3,8	0,0	-0,4	1,8	1,6

4.2.8 Das KlaMuKo-Ensemble – Vergleich von Szenarios, Modellen und Modell-Läufen

Im Rahmen von WMSax 2.0 wurden die Extremklassen für eine Reihe von verschiedenen Modellprojektionen erstellt. Das Ensemble umfasst drei Läufe von MPI ESM (die Analysen in Abschnitt 4.2.6 umfassten nur Betrachtungen von Lauf 1 und dem Szenario RCP8.5) mit den Szenarios RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 sowie das Modell CanESM2 Lauf 1 RCP8.5. In diesem Abschnitt wird eine Übersichtsbetrachtung der Ergebnisse dieses Ensembles gegeben. Es wird dabei auf die von den einzelnen Projektionen ermittelten Trends der 15 KlaMuKo-Klassen fokussiert. Diese beruhen jeweils auf Klassen, die aus Klimadaten für die verschiedenen Klimaregionen Sachsens ermittelt und dann in den einzelnen Modellprojektionen wiedererkannt wurden.

Die in den Tabellen 22 bis 25 verwendete Nomenklatur der Modelle ist wie folgt: MPI ESM Lauf 1 RCP2.6 → MP1_R26 bis MPI ESM Lauf 3 RCP8.5 → MP3_R85 und CanESM2 Lauf 1 RCP8.5 → CA2_R85.

Aus Tabelle 22 werden mehrere Sachverhalte anhand des ausgewählten Prädiktanden in den Untersuchungen der einzelnen Modellprojektionen deutlich:

- Die drei Läufe von MPI ESM sind in den KlaMuKo-Ergebnissen einander relativ ähnlich: Die ersten acht Klassen zeigen ausnahmslos Zunahmen und die Klasse 10 den stärksten Rückgang.
- Nahezu stringent ist von Szenario RCP2.6 zu Szenario RCP8.5 eine Verstärkung der klassenspezifischen Trends zu verzeichnen. Dies ist nicht selbstverständlich, zeigt aber, dass die verschiedenen RCP-Szenarios mit gleichsinniger Verstärkung/Abschwächung der KlaMuKo-Klassen verbunden sind.
- Die Ergebnisse von RCP4.5-Läufen zeigen nur geringe Verstärkungen/Abschwächungen im Vergleich zu den RCP2.6-Läufen. Die größeren Sprünge liegen zwischen dem Szenarios RCP4.5 und RCP8.5.
- Das Modell CanESM2, RCP8.5 zeichnet sich, wie schon in den WEREX-Untersuchungen (s. Abschnitt 4.1) gezeigt, durch besonders starke Klimaentwicklungen aus. Dies wird auch anhand der KlaMuKo-Klassen für die Maximumtemperatur im Sommer an den Tieflandstationen deutlich. Die wärmste Klasse hat dort auch die mit Abstand größten Zuwachsraten (von nahe 0 in der Dekade 1951-1960 auf rund 375 pro Dekade im Zeitraum

2091-2100!). Dies ist ein Hinweis, dass unterschiedliche Modelle deutlich unterschiedliche Projektionen, insbesondere im Bereich der Extreme mit sich bringen. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen des ReKliEs-De Vorhabens (HÜBENER ET AL., 2017).

Tabelle 22: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KLaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für die Maximumtemperatur im Sommer der Tieflandregion Sachsens (Stationshöhen unter 300 m ü. NN)

Klasse/ Modell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
KMW	35,7	33,4	32,3	31,1	30,7	30,1	27,4	25,1	22,1	18,5	16,3	15,1	14,6	13,8	12,6
MP1_R26	0,5	0,8	0,8	1,6	1,5	1,3	3,5	3,1	0,6	-8,4	-3,2	-0,4	-1,3	-0,1	-0,5
MP1_R45	0,8	1,4	1,8	2,1	1,9	2,3	5,7	5,3	-0,3	-13,5	-4,1	-0,5	-2,0	-0,1	-0,9
MP1_R85	4,1	3,0	3,8	3,7	4,0	3,1	7,5	5,6	-5,7	-21,1	-4,4	-0,4	-2,0	-0,1	-0,9
MP2_R26	0,3	0,7	0,4	0,9	0,9	0,9	2,8	3,7	1,5	-7,2	-2,5	-0,3	-1,2	-0,0	-0,9
MP2_R45	0,5	1,2	0,9	1,7	1,4	1,8	4,3	5,2	2,7	-13,2	-3,1	-0,3	-1,7	-0,1	-1,1
MP2_R85	4,5	3,2	2,9	4,2	3,8	2,0	7,4	6,8	-5,3	-22,5	-3,6	-0,3	-1,8	-0,1	-1,2
MP3_R26	0,1	0,6	0,3	1,1	1,5	1,1	2,9	2,4	3,5	-7,5	-3,0	-0,6	-1,7	0,0	-0,6
MP3_R45	0,4	1,3	1,3	2,0	2,0	1,6	4,5	4,5	3,5	-13,2	-4,3	-0,7	-2,1	0,0	-0,9
MP3_R85	5,5	3,4	3,4	4,3	4,2	3,1	8,9	4,1	-6,8	-21,4	-4,8	-0,8	-2,2	0,0	-0,9
CA2_R85	29,4	7,2	4,2	3,1	4,3	0,6	-0,2	-7,6	-15,7	-17,5	-3,9	-0,5	-2,9	-0,3	-0,3

Die beiden Teilfiguren von Abbildung 26 zeigen die Unterschiede zwischen den KLaMuKo-Ergebnissen von MPI-ESM Lauf 1 RCP8.5 und CanESM2 RCP8.5 in anderer Weise aufbereitet. In diesem Diagramm sind die Absolutzahlen des Zeitraums 1971-2000 (blaue Balken) denjenigen des Zeitraums 2071-2100 (rote Balken) gegenübergestellt. Dazu sind die Klassenmittelwerte (gelbe Kreuze, skaliert mit der rechten y-Achse) eingezeichnet, die ja aus Klimamessungen ermittelt wurden und für die Läufe einer Region für alle Modelle und Treibhausgas-Szenarios dieselben sind. Das bedeutet, die Anstiegs- bzw. Rückgangstendenzen in den Extremklassen sind mit KLaMuKo feststellbar. Die Quantifizierung dieser ist aber wegen der Modellspezifika, die im Bereich der Extreme besonders groß sind, problematisch.

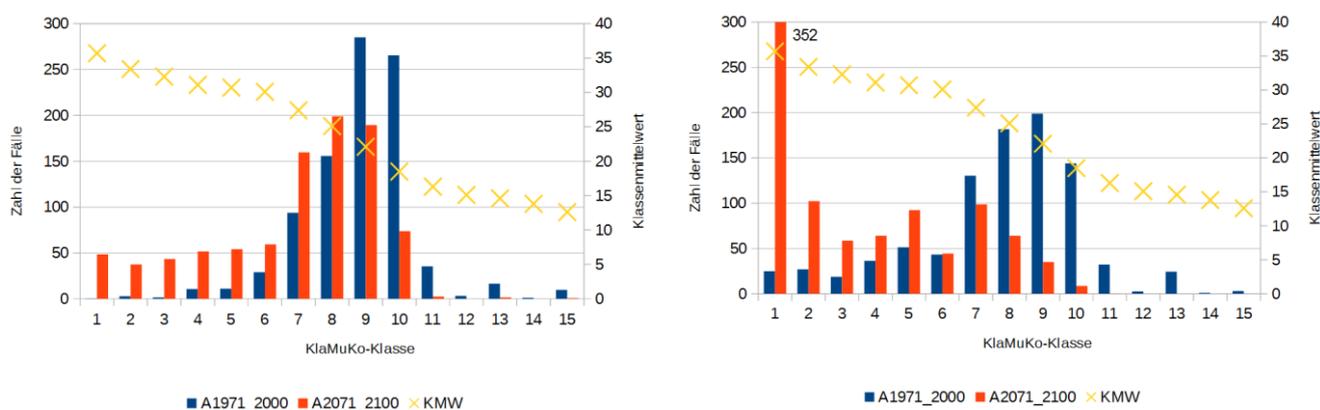


Abbildung 26: Häufigkeit der KLaMuKo-Klassen im Vergleich zweier Klimamodelle; links: MPI-ESM Lauf 1 RCP8.5 und rechts: CanESM2 Lauf 1 RCP8.5; Prädikand: Maximumtemperatur im Sommer; Region: Flachland; blaue Balken: Anzahl der im Modell wiedergefundenen Tage 1971-2000; rote Balken: Anzahl der im Modell wiedergefundenen Tage 2071-2100; gelbe Kreuze: Klassenmittelwerte

Das Ensemble der KLaMuKo-Analysen für die Minimumtemperatur an den Bergstationen im Winter (s. Tabelle 23) zeigt folgende Charakteristika, von denen einige auch bei den Analysen der Maximumtemperatur der sächsischen Flachlandstationen (s. Tabelle 22) sichtbar sind:

- Die drei Läufe von MPI ESM sind in den KLaMuKo-Ergebnissen einander relativ ähnlich: In den ersten sieben KLaMuKo-Klassen, die den „warmen“ Teil der Verteilung darstellen, zeigen ausschließlich Anstiegsraten der Häufigkeit. Der stärkste Rückgang wird entweder in Klasse 8 oder 9 ermittelt.
- Nahezu stringent ist von Szenario RCP2.6 zu Szenario RCP8.5 eine Verstärkung der klassenspezifischen Trends zu verzeichnen; dies ist als weiteres Indiz zu werten, dass die verschiedenen RCP-Szenarios auch mit gleichsinniger Verstärkung/Abschwächung der KLaMuKo-Klassen verbunden sind.
- Die Ergebnisse von RCP4.5-Läufen zeigen nur geringe Verstärkungen/Abschwächungen im Vergleich zu den RCP2.6-Läufen. Die größeren Sprünge liegen zwischen dem Szenarios RCP4.5 und RCP8.5.
- Der analysierte Lauf von CanESM2, Lauf 1, RCP8.5 zeigt gegenüber den MPI ESM-Läufen mit RCP8.5 zwar auch stärkere Zuwachsraten in den wärmsten KLaMuKo-Klassen und stärkere Rückgänge in den Klassen 8 und 9, da dieses Modell die Neigung hat, sowohl mittlere Temperaturanstiegsraten als auch das Verhalten der Temperaturextremklassen stärker wiederzugeben. Allerdings ist dieser Effekt beim untersuchten Minimumtemperaturindikator nicht so deutlich wie bei der Maximumtemperatur im Sommer.

Tabelle 23: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KLaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für die Minimumtemperatur im Winter in der Bergregion Sachsens (Stationshöhen über 600 m ü. NN)

Klasse/ Modell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
KMW	3,8	3,4	2,3	2,2	0,8	-1,2	-1,9	-4,2	-7,5	-10,4	-12,3	-15,1	-18,3	-21,3	-25,9
MP1_R26	0,2	1,4	0,5	0,6	5,5	3,5	2,2	-2,4	-2,0	-3,0	-1,3	-3,1	-1,4	-0,6	-0,1
MP1_R45	0,2	2,1	1,4	0,9	6,2	2,3	2,9	-4,2	-2,0	-3,1	-1,5	-3,1	-1,4	-0,5	-0,0
MP1_R85	1,5	5,3	2,6	2,2	9,3	6,2	1,4	-8,1	-7,2	-4,5	-2,1	-4,3	-1,6	-0,5	-0,1
MP2_R26	0,2	0,9	1,3	0,8	2,1	1,4	3,1	-1,7	-1,1	-2,0	-0,9	-3,0	-0,7	-0,4	-0,1
MP2_R45	0,4	2,0	1,9	1,2	5,8	3,5	3,6	-3,8	-5,2	-3,3	-1,1	-3,4	-0,9	-0,6	-0,1
MP2_R85	1,2	5,0	2,8	2,3	7,4	3,6	3,1	-5,6	-6,8	-4,3	-1,9	-4,8	-1,3	-0,6	-0,1
MP3_R26	0,2	1,2	1,6	1,0	5,5	3,7	1,9	-1,0	-3,6	-2,0	-2,7	-3,9	-1,6	-0,3	-0,3
MP3_R45	0,4	1,6	2,0	1,6	7,0	4,7	3,3	-2,3	-5,8	-3,1	-2,4	-4,7	-1,6	-0,3	-0,3
MP3_R85	1,8	5,3	3,9	3,6	8,9	6,5	2,9	-7,2	-9,3	-4,6	-3,4	-5,8	-1,9	-0,4	-0,3
CA2_R85	3,9	6,5	4,5	3,1	4,5	4,0	2,5	-9,5	-10,3	-4,5	-2,2	-1,8	-0,3	-0,2	-0,1

Die Ensemble-Ergebnisse der KLaMuKo-Klassifikationen für den Niederschlag an den Bergstationen (Stationshöhe über 600 m ü. NN) im Sommer und Winter sind in Tabelle 24 und Tabelle 25 aufgelistet. Daraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Klassen mit extremem Niederschlag (KLaMuKo-Klassen 1 bis 4) besitzen sowohl im Sommer als auch im Winter nur sehr schwache oder gar keine Trends im Bereich von ± 1 %. Bei vielen anderen Klassen, die nicht dem Bereich der Extreme zugewiesen werden können, ist dies auch der Fall.
- Erst in der fünftstärksten Klasse, die in beiden Jahreszeiten durch ein Klassenmittel von rund 10 mm Niederschlag gekennzeichnet ist und nicht den starken Extremen zuzurechnen ist, sind Abnahmetrends in der Größenordnung von -2,5 % bis zu -6 % erkennbar. Tendenziell sind diese Trends der Klasse 5 beim Szenario RCP8.5

ausgeprägt. Es sei daran erinnert, dass die Klasse 5 zwar nicht die größten Niederschlagsmengen beschreibt, aber dennoch Bedeutung besitzt, da sie zumindest im Sommer im Identifikationszeitraum (1971-2010) rund 130 Tage umfasst und somit eine herausgehobene Repräsentativität besitzt.

- Die verschiedenen Läufe von MPI ESM sind sowohl bezüglich der Belegungsstärke der KlaMuKo-Klassen bei gleichem Szenario, als auch bezüglich der Verstärkungen/Abschwächungen von RCP2.6 zu RCP8.5 von starker Ähnlichkeit geprägt. Zudem zeigt sich auch beim Niederschlag und mehreren KlaMuKo-Klassen, welche relativ großen Unterschiede zwischen Projektionen mit RCP2.6 und RCP8.5 zu erwarten sind.
- Die Ergebnisse mit dem Modell CanESM2, Lauf 1, RCP8.5 unterscheiden sich nur wenig von denjenigen der MPI ESM-Läufe mit RCP8.5, insbesondere bei den Klassen, die für extremen und mittleren Niederschlag stehen.
- Insgesamt ist es bei dieser Untersuchung des Niederschlags dennoch überraschend, dass das Verfahren die Klassen 5 und 7 in der Mehrheit der untersuchten Läufe mit nennenswerten Anstiegsraten und die Klasse 12 mit nennenswerten Rückgangsraten identifiziert

Tabelle 24: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KlaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für den Niederschlag im Sommer in der Bergregion Sachsens (Stationshöhen über 600 m ü. NN)

Klasse/ Modell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
KMW	140,9	50,7	31,2	21,0	10,5	9,1	6,2	5,8	4,4	3,1	2,8	2,0	1,2	0,8	0,0
MP1_R26	-0,1	0,0	-0,3	-0,1	-0,6	-0,1	1,0	0,1	2,5	-0,4	0,2	-0,9	0,4	-2,9	1,2
MP1_R45	0,1	-0,0	-0,4	-0,4	-1,9	-0,7	1,1	-0,1	4,5	-0,9	-0,1	-0,6	-0,6	-2,6	2,6
MP1_R85	0,0	-0,1	-0,3	-0,6	-3,0	-0,9	-0,5	-0,3	10,9	-2,0	-0,6	-2,0	-0,4	-4,6	4,3
MP2_R26	0,4	-0,1	-0,3	-0,6	0,1	-0,6	0,5	-0,1	4,1	-1,6	1,2	-1,3	-0,3	-2,5	1,1
MP2_R45	0,1	-0,2	-0,4	-0,7	-1,5	-0,7	-0,0	-0,5	6,1	-0,6	0,1	-2,0	-0,3	-2,5	3,1
MP2_R85	0,2	-0,1	-0,4	-1,0	-2,4	-0,6	0,5	-0,5	11,3	-2,4	-1,3	-2,7	-0,7	-4,7	4,7
MP3_R26	0,4	-0,1	-0,3	-0,4	0,2	-0,9	1,3	-0,3	3,0	-0,8	-0,5	-1,1	-0,4	-1,3	1,1
MP3_R45	0,1	-0,1	-0,2	-0,5	-0,2	-1,1	1,1	-0,8	5,9	-1,4	0,3	-1,9	-0,7	-2,9	2,2
MP3_R85	0,3	-0,1	-0,5	-1,0	-1,9	-1,9	2,4	-1,0	10,7	-3,8	-1,3	-1,9	-1,3	-4,3	5,5
CA2_R85	0,7	-0,1	0,1	-1,1	-4,6	-0,3	0,4	0,7	10,1	-2,0	-0,8	-2,8	-1,3	0,3	0,5

Tabelle 25: Prozentuale 100-jährige Trends der 15 KLaMuKo-Klassen in unterschiedlichen Klimaprojektionen für den Niederschlag im Winter in der Bergregion Sachsens (Stationshöhen über 600 m ü. NN)

Klasse/ Modell	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
KMW	13,0	13,0	11,3	11,3	10,4	6,8	6,0	3,7	2,5	2,0	1,7	1,2	1,0	0,4	0,2
MP1_R26	0,0	-0,1	0,5	0,2	1,4	-0,0	2,4	-1,9	1,3	0,5	0,6	-4,2	0,6	0,1	-1,2
MP1_R45	0,1	-0,1	0,8	0,5	2,3	0,1	0,6	-2,1	1,4	0,2	0,7	-4,2	-0,0	0,1	-0,4
MP1_R85	-0,0	-0,1	-0,7	-0,5	5,7	-0,3	1,1	-2,9	3,5	-0,1	1,1	-5,0	-0,2	-0,4	-1,3
MP2_R26	0,0	-0,1	1,1	-0,3	1,9	-0,1	2,7	-0,8	-0,0	0,3	0,3	-3,1	-1,6	-0,1	-0,3
MP2_R45	-0,0	-0,1	0,8	-0,6	2,8	-1,1	2,4	-1,5	2,2	0,1	0,5	-3,5	-1,6	0,2	-0,8
MP2_R85	-0,0	-0,2	0,7	-0,3	5,7	-0,6	3,1	-2,5	3,5	-0,1	1,2	-7,7	-1,5	-0,5	-0,7
MP3_R26	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	1,7	0,2	2,5	-0,8	2,2	-0,1	0,3	-5,3	-0,1	-0,2	-0,2
MP3_R45	0,0	0,0	-1,0	-0,6	1,8	-0,3	2,4	-1,3	2,3	-0,1	0,2	-3,2	0,0	-0,3	0,1
MP3_R85	0,1	-0,1	0,1	-0,2	5,9	-0,2	3,3	-2,1	3,7	-0,3	0,6	-8,4	-0,7	-0,6	-1,6
CA2_R85	0,0	-0,1	2,0	-0,1	6,2	0,4	5,6	-0,1	2,0	-0,1	0,6	-11,6	-3,7	-0,5	-0,8

4.3 WMSax2.0 – Variante der KLaMuKo-Methodik mit unteretzten NCAR-Daten

Es war im Ursprung angenommen worden, dass das KLaMuKo-Verfahren bezüglich der Niederschlagsextreme durch einen weiteren Aufbereitungsschritt verbesserte Aussagen für die Zukunftsentwicklungen ermöglichen könnte. Bei diesem Schritt sollte die Datenbasis für KLaMuKo eingedenk folgender Überlegungen modifiziert werden:

- Jede Modellprojektion wird im „Regelfall“ mit den von den Modellierungsgruppen veröffentlichten zeitlichen Verläufen der atmosphärischen Parameter in den verschiedenen Höhenschichten von KLaMuKo analysiert. Daraus werden die für KLaMuKo notwendigen 130 potenziellen Prädiktoren gewonnen, aus denen im Zuge der KLaMuKo-Analysen die fünf relevantesten identifiziert werden.
- Bei der Erstellung der Projektionen für die WEREX-Analysen wurde durch das Verfahren mit einem Wettergenerator eine Abfolge von Episoden erzeugt, die das Klima am Boden in Abhängigkeit der sich wandelnden Häufigkeitsverteilungen von Temperatur- bzw. Niederschlagsklassen. Die sich wandelnden Häufigkeitsverteilungen wurden aus den Modellprojektionen ermittelt.
- Infolge der WEREX-Analysen entstanden „Baupläne“ für die Zeitreihen an den Stationen, in denen für den Zeitraum 1951-2100 festgelegt wurde, für welchen Tag der Zukunft welcher Tag aus den gemessenen Daten des Zeitraums 1971-2010 zu verwenden ist.
- Diese „Baupläne“ sollten benutzt werden, um die Daten der Klimamodelle zu verändern. Angenommen, für den mit WEREX simulierten Zeitraum vom 4.-15. April 2044 sollen Tage aus dem gemessenen Klima am Boden aus dem 9.-20. April 1999 verwendet werden. Die Idee bestand darin, um im Beispiel zu bleiben, auch im Klimamodell die Daten der oberen Atmosphäre für den 9.-20. April 1999 aus NCAR-Daten an die Stelle 4.-15. April 2044 zu setzen. Dieser Schritt sollte durchlaufend für den Zeitraum 1951-2100 durchgeführt werden und so eine modifizierte Zeitreihe für die verschiedenen Atmosphärenschichten der Modelle ergeben.

- Aus diesen so modifizierten Zeitreihen der atmosphärischen Parameter sollten dann die 130 potenziellen Prädiktoren bestimmt werden, die KlaMuKo für die Identifikation der jeweils zu ermittelnden relevanten Prädiktoren benötigt.

Leider stellte es sich im Zuge der Analysen mit der umfangreich modifizierten Datenbasis und des Einsatzes von WMSax2.0, also von KlaMuKo mit dem modifizierten Datensatz heraus, dass die einzelnen Klassen nicht, wie erwartet, bessere Verknüpfungen der projizierten Zukunft in der freien Atmosphäre mit den zu untersuchenden Extremen wiederspiegeln, was sich aus Tabelle 26 und Tabelle 27 ableiten lässt.

Der Analyseweg, der zu Tabelle 26 führte, unterschied sich nicht von den in Kapitel 4.2 gegebenen Beispielen mit der KlaMuKo-Methodik. Dort, wie bei den Daten für Tabelle 26, wurden (i) die KlaMuKo-Klassen unter Verwendung von Stationsdaten mit Messungen aus dem Zeitraum 1971-2010 sowie der NCAR-Reanalysen desselben Zeitraums gewonnen und (ii) erfolgte in den vom Modell simulierten Daten der freien Atmosphäre für den Zeitraum 1951-2100 eine Wiedererkennung der von KlaMuKo ermittelten Charakteristika. Bodendaten werden bei dieser Vorgehensweise benötigt, um die Klassen zu generieren.

Tabelle 26: Häufigkeit (in Prozent) der WMSax2.0-Klassen für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100 sowie prozentualer Trend und Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Mitteltemperatur im Sommer

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1951-60	0,0	0,2	1,4	7,6	7,4	6,9	21,9	22,5	15,0	7,4	4,2	2,7	2,3	0,0	0,6
1961-70	0,1	0,1	1,8	7,4	6,5	4,9	21,8	26,0	17,4	5,2	4,5	2,3	1,3	0,0	0,7
1971-80	0,2	0,9	3,4	8,0	5,5	7,9	25,1	23,0	14,1	6,3	2,7	1,3	0,9	0,0	0,5
1981-90	0,3	1,3	3,3	7,4	7,4	6,7	25,3	21,7	15,2	6,0	1,8	1,7	1,1	0,0	0,7
1991-00	0,2	1,0	2,3	11,0	8,3	5,3	19,7	24,8	13,0	6,1	3,3	1,5	2,2	0,1	1,3
2001-10	0,7	1,5	3,9	10,5	7,8	5,8	25,1	22,5	12,7	4,0	2,6	1,2	1,1	0,2	0,3
2011-20	0,9	2,6	7,3	15,1	10,3	8,3	27,7	15,7	8,2	2,6	0,5	0,4	0,2	0,0	0,2
2021-30	2,6	2,6	10,2	12,6	9,5	9,0	22,1	18,5	8,8	2,2	0,9	0,5	0,3	0,2	0,0
2031-40	5,1	6,1	11,4	14,0	11,2	8,5	22,6	14,9	3,8	1,6	0,5	0,2	0,0	0,0	0,0
2041-50	6,1	5,3	11,3	14,5	12,3	8,9	20,2	14,7	3,5	1,6	0,3	0,5	0,3	0,0	0,4
2051-60	13,6	12,0	10,5	15,9	10,0	10,9	15,7	8,2	1,7	1,1	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0
2061-70	12,1	12,9	15,2	19,3	9,5	11,6	12,7	4,6	1,1	0,5	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0
2071-80	16,6	12,0	16,1	16,3	7,9	10,8	13,8	4,1	1,1	0,5	0,1	0,2	0,4	0,0	0,0
2081-90	31,3	11,7	14,5	14,0	6,0	7,1	9,0	3,8	0,8	0,9	0,0	0,3	0,7	0,0	0,0
2091-00	39,0	12,7	11,2	14,8	7,2	4,9	4,2	2,7	1,2	0,8	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0
Trend (%)	23,2	10,8	10,7	7,2	1,1	2,0	-11,9	-17,9	-13,4	-5,1	-3,3	-1,6	-1,1	-0,0	-0,6
A1951	0,0	0,0	7,1	69,5	70,7	59,1	252,9	254,9	158,4	61,9	34,2	18,8	14,2	0,5	7,0
A2100	299,0	139,5	144,8	161,7	84,7	84,9	99,2	24,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
KMW	23,1	22,3	21,0	19,3	17,8	17,4	15,1	12,2	9,7	9,0	7,2	7,2	6,3	5,2	4,9

Auch wenn mit der Mitteltemperatur ein anderer Temperatur-Prädiktand hinsichtlich seiner modellierten Zeitentwicklung untersucht wurde wie in Abschnitt 4.2.6, so sind doch bei den Sachverhalten in Tabelle 26 und in Tabelle 5 ähnliche Grundmuster vorhanden:

- Die wärmsten Klassen besitzen eine deutlichen Zunahmetrend (im Fall der Mitteltemperatur in Tabelle 26 noch deutlicher als bei der Maximumtemperatur in Tabelle 5)
- Es gibt einen „Umkehrpunkt“ in Form einer Klasse, ab der nicht mehr Anstieg sondern Rückgang der Häufigkeit stattfindet.
- Warme Klassen mit hohen Klassenmittelwerten nehmen von nahe 0 % Anteil in der Gegenwart auf rund 10 bis 20 % zu. Spiegelbildlich verschwinden zum Ende des 21. Jahrhunderts kalte Klassen ausnahmslos.
- Der Temperaturwertebereich wird von den Klassen relativ gut aufgelöst und zufriedenstellend auf die 15 KLaMuKo-Klassen verteilt.

Bei der in diesem Kapitel beschriebenen WMSax2.0-Variante (Daten für Tabelle 27) lief die Aufbereitung und Anwendung wie folgt ab:

- Zunächst wurden die synthetisierten Bodenzeitreihen, die der Wettergenerator von WEREX VI mit dem Antrieb durch Daten von MPI ESM Lauf 1 RCP8.5 erzeugt hatte, verwendet, um ein „projiziertes Klima am Boden“ zu erhalten.
- Für die freie Atmosphäre wurden die zu den Segmenten der Zeitreihen zugehörigen Segmente aus den NCAR-Reanalysen eingesetzt und eine Trendbehandlung, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben durchgeführt.
- Im so erzeugten Datensatz wurde für Tabelle 27 der Zeitraum 2061-2100 verwendet, um für den Prädiktanden Mitteltemperatur im Sommer KLaMuKo-Klassen zu ermitteln.
- Die aus 2061-2100 ermittelten KLaMuKo-Klassen wurden für den gesamten modellierten Zeitraum wiedererkannt und damit die tabellierten Häufigkeitsverteilungen ermittelt.

Wird der mit WMSax2.0 aus der Periode 2061-2100 ermittelte Bestand an KLaMuKo-Klassen hingegen zur Feststellung der Häufigkeiten in den Dekaden zwischen 1951-1960 und 2091-2100 benutzt, so ist das Bild sehr viel uneinheitlicher (Tabelle 27):

- Im Bereich der warmen Klassen gibt es sowohl Beispiele für das Verhalten „von 0 in der Gegenwart auf Anteile von 5 bis 20 % am Ende des 21. Jahrhunderts“ als auch das Verhalten „zahlreich in der Gegenwart und in der Zukunft mit wenig Trend“ als auch das Verhalten „rückläufiger Anteil in der Häufigkeitsverteilung für Dekaden am Ende des 21. Jahrhunderts“.
- Neben dem Auftreten von Zunahme- und Abnahmetrends in benachbarten Klassen sind die Trends benachbarter Klassen auch sehr unterschiedlich in ihrem Anteil.
- Auch bei den kalten Klassen sind die Trends bezüglich Stärke und Richtung uneinheitlich.
- Der Wertebereich der Mitteltemperatur wird sehr ungleichmäßig auf die Klassen verteilt: 11 der 15 Klassen besitzen einen Mittelwert zwischen 20 und 26 °C während ein analoges Temperaturintervall bei den KLaMuKo-Klassen, die auf Messungen beruhen, sich auf 6 Klassen verteilt.
- Weitere Untersuchungen mit anderen Bestimmungsperioden für die WMSax2.0-Klassen (1961-2000, 2001-2040, 2031-2070 – hier nicht tabelliert) zeigen vergleichbare Uneinheitlichkeiten bezüglich der Trends, Klassengrößen und repräsentierten Temperaturintervalle. Zudem werden die Klassen nicht mehr aufgrund der relativen Topografie gebildet, die erfahrungsgemäß für die Temperatur eine zentrale Rolle spielt. Für jede Bestimmungsperiode werden für Temperatur-Prädiktanden andere Prädiktoren gewählt, beispielsweise, die Temperatur der

850 hPa-Fläche aber auch dynamische Größen wie Advektion und Vorticity oder Labilitätsmaße. Die Situation verbessert sich nicht, wenn andere Prädiktanden (Niederschlag, Schwellwerte) untersucht werden.

Tabelle 27: Häufigkeit (in Prozent) der WMSax2.0-Klassen für die Dekaden 1951-1960 bis 2091-2100 sowie prozentualer Trend und Anzahl der Klassenmitglieder in der ersten und der letzten Dekade; Modell: MPI ESM Lauf 1, RCP8.5; Prädiktand: Mitteltemperatur im Sommer – Variante mit NCAR-Reanalysen

Klasse/ Dekade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1951-60	8,7	0,2	3,1	19,2	1,1	4,0	0,0	4,6	0,0	2,8	0,0	36,2	19,4	0,6	0,0
1961-70	8,8	0,0	2,0	17,4	2,4	4,1	0,2	3,3	0,0	3,8	0,1	38,8	18,7	0,4	0,0
1971-80	6,0	0,0	3,7	22,9	1,2	7,4	0,1	4,7	0,0	3,4	0,0	34,8	15,0	0,9	0,0
1981-90	12,7	0,2	2,4	25,2	1,7	5,0	0,0	2,5	0,0	2,6	0,0	29,9	16,8	0,9	0,0
1991-00	10,2	0,1	3,5	19,1	3,3	5,2	0,2	4,0	0,0	4,0	0,0	31,2	18,9	0,2	0,0
2001-10	6,7	0,0	3,0	19,6	3,0	6,8	0,0	4,0	0,0	3,5	0,0	35,3	17,4	0,5	0,0
2011-20	10,5	0,1	3,4	26,8	2,4	5,0	0,2	2,5	0,0	2,8	0,0	32,3	13,4	0,5	0,0
2021-30	8,2	0,3	3,2	21,7	4,6	5,8	0,2	2,9	0,0	4,8	0,0	33,7	14,2	0,2	0,0
2031-40	9,2	1,3	4,8	21,5	4,3	6,3	0,2	2,5	0,0	3,2	0,0	32,8	13,3	0,5	0,0
2041-50	8,7	0,3	2,8	20,1	7,3	6,3	0,4	1,6	0,0	2,4	0,0	32,2	16,1	1,7	0,0
2051-60	9,6	2,5	6,0	18,9	9,2	7,2	0,4	2,2	0,0	3,2	0,0	27,0	11,7	1,8	0,2
2061-70	8,2	2,7	4,5	17,6	12,9	9,3	0,9	2,0	0,0	1,8	0,3	27,3	11,0	1,3	0,2
2071-80	5,0	1,7	2,8	15,9	12,8	10,5	1,5	1,6	0,0	2,8	0,0	31,0	12,4	1,4	0,4
2081-90	7,2	3,5	6,6	16,0	16,0	11,2	1,5	2,3	0,2	1,0	1,1	18,5	9,9	4,1	1,0
2091-00	7,5	4,2	5,1	11,3	18,0	10,3	2,2	1,7	0,0	1,4	0,0	25,1	8,9	2,5	1,6
Trend (%)	-1,5	2,7	1,9	-4,8	11,8	4,5	1,3	-1,9	0,1	-1,3	0,3	-8,8	-6,7	1,7	0,8
A1951	87,4	0,0	22,4	210,9	0,0	35,2	0,0	38,3	0,0	35,2	0,0	342,7	176,3	0,3	0,0
A2100	68,7	35,3	47,3	149,0	149,0	93,1	16,2	13,7	0,6	18,2	3,5	228,9	90,1	21,9	9,7
KMW	26,1	25,8	25,3	24,8	24,6	24,1	24,0	23,8	23,3	22,3	21,8	18,7	14,7	14,3	7,2

Zusammengefasst: Die Stringenz, die bei den KlaMuKo-Klassen aus unmodifizierten Daten gefunden wurde, geht bei den WMSax2.0-Klassen verloren. Damit sind stimmige Interpretationen von zukünftigen Trends bei den Extremen mit Ergebnissen von WMSax2.0 nicht möglich. Diese aus der praktischen Umsetzung erfolgte Erkenntnis entspricht nicht der Erwartung. Als Erklärungsansatz postulieren wir, dass durch die Nutzung der NCAR Daten auch eine gewisse Episodenhaftigkeit mit Sprüngen zwischen den einzelnen Zeitabschnitten in die Zeitreihen der Prädiktoren eingeführt wurde, während ein Klimamodell-Lauf Zeitreihen „wie aus einem Guss“ beinhaltet. Zudem liegen den Analysen mit KlaMuKo-Klassen aus unmodifizierten Daten immer die gleichen Klassen für die Wiedererkennung zu Grunde, während die WMSax2.0-Klassen aus jeder der Bestimmungsperioden unterschiedlich sind und keinen homogenen Datenbestand für die Wiedererkennung liefern.

5 Zusammenfassung und Ergebnisse

Im Vorhaben WMSax2.0 wurden mehrere Aspekte der Projektion eines zukünftigen Klimas zusammengeführt:

- Unterfütterung mit aufwändig qualitätskontrollierten Klimadaten
- Anwendung der aktuellen Version des statistischen Klimaregionalisierungsverfahrens WETTREG/WEREX in der Fassung WEREX VI
- Nutzung eines Ensembles von antreibenden Modellen
- Nutzung von Klima-Projektionen mit verschiedenen Treibhausgas-Szenarios
- Anschluss an bisherige Studien durch die Nutzung von Antriebsdaten mit dem Treibhausgasszenario SRES A1B
- Nutzung einer „Modellkaskade“, bei der zunächst ein dynamisches regionales Klimamodell eine erste Regionalisierung durchführte und die daraus folgenden Projektionen mit WEREX VI regionalisiert wurden
- Starker Fokus auf Extreme und deren zukünftige Entwicklung
- Weiterentwicklung eines Klassifikationsverfahrens, das für verschiedene Klimaregionen atmosphärische Bedingungen mit Extrem-Potenzial identifiziert
- Anwendung dieses Klassifikationsverfahrens auf eine Vielzahl von Zielgrößen und Klimaindikatoren am Boden
- Projektion der Entwicklung des Extremverhaltens in einem Ensemble von mehreren Modellläufen und Modellen; Vergleich dieser Entwicklung unter der Maßgabe unterschiedlicher Treibhausgas-Szenarios.

5.1 Datensituation

Die Qualitätskontrolle, die im Zuge des LfULG-Vorhabens „Analyse und Bewertung der gemessenen meteorologischen Datengrundlage im Freistaat Sachsen sowie Erzeugung eines Klima-Referenzdatensatzes“ durchgeführt wurde, ergibt eine hervorragende Datenbasis sowohl für die Phasen „Wetterlagenklassifikation“, „Identifikation der Zusammenhänge“ und „Wettergenerator“ von WEREX VI als auch für die Klassifikationsphase von KlaMuKo. Es stand nicht zu erwarten, dass die Zahl der nutzbaren Klimastationen sich durch die Qualitätskontrolle vergrößern würde.

Mit diesen Daten und den Erkenntnissen der LfULG-Studie „Verfahren zur objektivierten Ausweisung von Klima- und Klimaänderungsräumen“ (BERNHOFER und BARFUS, 2017) lassen sich für Sachsen drei repräsentative Klimaregionen definieren, die durch hinreichend viele Klimastationen abgesichert sind. Die speziellen orografischen Gegebenheiten Sachsens sorgen zudem für eine Höhenschichtung des Stationskollektivs:

- Tiefland – Stationshöhen unter 300 m ü. NN (7 Klimastationen),
- Hügelland – Stationshöhen zwischen 300 und 600 m ü. NN (4 Klimastationen),
- Bergland – Stationshöhen über 600 m ü. NN (3 Klimastationen).

Die Zusammenstellung eines Ensembles von Klimamodellen als Eingang für die Regionalisierungen mit WEREX VI hatten sich nach der Datenverfügbarkeit, dem angestrebten Projektumfang und der Verzahnung mit der Anwendung des KlaMuKo-Verfahrens zu richten. Breiten Raum erhielt dabei das MPI ESM (Nachfolger des MPI-Modells

ECHAM5), von dem drei Läufe und jeweils drei RCP-Treibhausgasszenarios genutzt wurden. Hinzu kamen je ein Lauf von CanESM2, das als Modell mit relativ hohem Temperatursignal ausgewiesen ist und MIROC5, das über ein relativ niedriges Temperatursignal verfügt.

Das Extremklassen-Verfahren KlaMuKo nutzte dabei erstmal auch ein Ensemble von Modellen, während in einer Machbarkeitsstudie und der ersten Phase des WMSax2.0-Vorhabens lediglich ein Modell-Lauf zum Einsatz kam. Es umfasst die Läufe von MPI ESM mit den verschiedenen Treibhausgas-Szenarios sowie das Modell CanESM2.

5.2 WEREX VI

Im Zuge der Regionalisierungen mit WEREX konnten Ergebnisse mehrerer Modelle und Treibhausgas-Szenarios in Ensemblebetrachtung verglichen werden. Die Besonderheit von WEREX, gegenüber der Variante WETTREG des statistischen Regionalisierungsverfahrens ist eine Fokussierung auf die Spezifika des Klimas im Raum Sachsen.

Wichtige Erkenntnisse aus diesem Teil des Projektes sind:

- Bei den Analysen der Temperatur konnten in den Regionalisierungen von WEREX die Größenordnungen der Klimasignale, wie sie auch in anderen Untersuchungen (z. B. ReKliEs-De) gefunden wurden, bestätigen.
- Beim Niederschlag weisen die WEREX VI-Ergebnisse auf eine Entwicklung zu einem insgesamt trockener werdenden Klima hin. Dies zeigt sich insbesondere im Sommer mit Rückgängen durchaus im Bereich von 25 %, während der Winterniederschlag entweder nur wenig Veränderungen zeigt oder leicht zunimmt.
- Die drei Läufe von MPI ESM führen auch bezüglich der Regionalisierungen mit WEREX VI zu einander ähnlichen Resultaten
- Klimasignale im Vergleich zwischen den Szenarios RCP2.6 und RCP8.5 zeigen sehr deutliche Ausschläge im Fall des Szenarios mit hohem Treibhausgasanteil in der Atmosphäre. Die Unterschiede zwischen RCP2.6 und RCP4.5 sind hingegen nur gering.
- Die Betrachtung des „Versionssprungs“ von ECHAM ergab, dass die WEREX VI-Regionalisierungen von MPI ESM und ECHAM5 keine nennenswerten Unterschiede aufweisen.
- Die Kaskade ECHAM5 → CLM → WEREX VI mit dem Treibhausgas-Szenario SRES A1B ergab Temperatursignale, die denjenigen des relativ „kalten“ Modells MIROC5 vergleichbar sind.

5.3 KlaMuKo

Während das WEREX/WETTREG-Verfahren seine Stärke bei den Entwicklungen des mittleren Klimas besitzt, zielt KlaMuKo auf die Extreme ab. Es zeigt sich, dass die Aufteilung in Klassen, von denen mehrere bevorzugt Extreme enthalten, durch das Verfahren sehr gut durchgeführt wird. Dabei ist zu beachten, dass KlaMuKo auch Klassen erzeugt, die keine Extreme enthalten und für die Analysen keine große Bedeutung besitzen. Es sei daran erinnert, dass KlaMuKo im Gegenwartsklima Eigenschaften der Atmosphäre identifiziert, die mit Extremen am Boden verbunden sind – es benötigt dafür aus Repräsentativitätsgründen eine Mindestanzahl von Klimastationen, was zur Bildung der drei Klimaregionen führte. KlaMuKo ist also kein Regionalisierungsverfahren, aber es kann auf verschiedene Regionen angewandt werden und extrem-bezogene Spezifika herausarbeiten.

Wichtige Erkenntnisse aus diesem Teil des Projektes sind bezüglich der Klassifikation:

- Die Klassifikation von Temperatureigenschaften und ihren Extremen ist von KlaMuKo mit hoher Güte möglich. Beschreibungen der Klassen für Maximum- und Minimumtemperaturwerte erreichen dabei Korrelationen von 0,95 und darüber. Bei der Klassifikation der Niederschlagswerte liegen die Korrelationen bei erstaunlich hohen Werten bis 0,65.
- In unterschiedlichen Regionen (Höhenstufen) sind durchaus verschiedene Faktoren für das Auftreten von Extremen festzustellen. Dabei ist die Ähnlichkeit zwischen Tiefland- und Hügellandstationen, d. h. insgesamt unterhalb von 600 m ü. NN relativ groß, während die Bergstationen ein anderes Klimaregime mit anderen Kausalketten für die Extreme bilden.
- Die zur Beschreibung einer Zielgröße (Prädiktand) wichtigsten Atmosphärenparameter (Prädiktoren) sind auch in den Jahreszeiten unterschiedlich – am deutlichsten sind diese Unterschiede zwischen dem Winter und den übrigen Jahreszeiten.
- Die Belastbarkeit von Aussagen nimmt ab, je dichter der Prädiktand am absoluten Extrem liegt.
- Es gibt eine Rangfolge der Beschreibungsgüte für die betrachtete Zielgröße:
 - (i) Wertebereich, so wie ihn die Zielgröße vorgibt;
 - (ii) Fokussierung auf die Fälle, an denen Schwellwerte überschritten werden;
 - (iii) Wahrscheinlichkeit, dass an einem beliebigen Tag das Perzentil einer Größe an einer oder mehreren Stationen überschritten wird;
 - (iv) Wahrscheinlichkeit, dass an einem beliebigen Tag der Schwellwert an einer oder mehreren Stationen überschritten wird;
 - (v) Ja/Nein-Entscheidung, ob der Schwellwert an allen Stationen der Klimaregion überschritten wird.

Nach der Identifikation der KlaMuKo-Klassen bestand die nächste Aufgabe darin, sie in den Projektionen mit verschiedenen Klimamodell-Läufen und Modellen wiederzufinden und so eine Entwicklung der Häufigkeit von Faktoren, die in der Gegenwart zu Extremen führen, festzustellen. Zu den Neuerungen in diesem Vorhaben gehörte genau dieser Ensemble-Vergleich und seine Interpretationsmöglichkeiten. Wichtige Erkenntnisse aus diesem Teil des Projektes sind bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Extremklassen:

- Zeitliche Entwicklungen von Temperaturextremklassen zeichnen das klarste Bild: Mehrere benachbarte Klassen im Bereich der hohen Temperaturwerte zeigen gleichsinnig und mit relativ hoher Veränderungsrate einen Anstieg. Selbst bei den Klassen, die nicht mehr zu den warmen Extremen gehören setzt sich dieses Verhalten fort, wobei es verbreitet einen „Umkehrpunkt“ gibt, d. h. eine Klasse unterhalb des Anstiegs und oberhalb des Rückgangs zu verzeichnen ist. Die Temperaturklassen zeigen dieses Verhalten zudem in gleicher Art in den verschiedenen Klimaregionen.
- Es kommt oft vor, dass Klassen, die am Anfang so gut wie bedeutungslos in der Mixtur erscheinen, am Ende des 21. Jahrhunderts 5-10 % aller Tage repräsentieren – ein weiteres Indiz für „Die Ausnahme von heute ist die Regel von morgen.“
- Bei der Minimumtemperatur zeigt sich, dass die „warmen“ Klassen in ihrem Veränderungsverhalten mit klarerer Anstiegstendenz in den Projektionen der Modelle reproduziert werden als die Klassen am „kalten“ Ende der Verteilung. Allerdings ist diesen „kalten“ Klassen gemeinsam, dass sie zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht mehr im Modell gefunden werden. Außerdem findet sich bei der Minimumtemperatur ebenfalls das bei der Maximum-

temperatur festgestellte Verhalten mit gleichsinnigen Entwicklungen in den „warmen“ bzw. „kalten“ Klassen und dem „Umkehrpunkt“ (s. o.)

- Werden bei der Klassenbildung die Tage selektiert, an denen eine Schwellwertüberschreitung stattfindet, so ist dies für die Deutlichkeit, mit der die Spezifika von Extremen herausgearbeitet werden, förderlich. Allerdings werden diese einzelnen Klassen im Rahmen der Bestimmung zeitlicher Entwicklungen nicht so klar in den Modellprojektionen herausgearbeitet, wie es bei einer Analyse, die sich auf die Gesamtheit der Tage erstreckt, der Fall ist. So sind die Besetzungszahlen benachbarter Klassen in den Rechnungen, die auf der reduzierten Tageszahl basieren, deutlich weniger gleichmäßig. Es ist zu konstatieren, dass sich die Veränderungen lediglich auf mehr Extremklassen verteilen, deren gemeinsame Tendenz keinen zusätzlichen Informationsgehalt besitzt.
- Eine alternative Zielgröße zur oben erwähnten Analyse von Schwellenwerten ist die Wahrscheinlichkeit, dass an einer oder mehreren Stationen einer Region ein Schwellenwert überschritten wird. Der Wertebereich der Zielgröße ist dabei allerdings relativ gering (verglichen mit dem Wertebereich, wenn die Temperatur als solche die Zielgröße ist), denn er liegt zwischen 1 (alle Stationen der Klimaregion haben eine Schwellwertüberschreitung) und 0 (keine Station der Klimaregion hat eine Schwellwertüberschreitung) mit so vielen Zwischenstufen, wie es Stationen in der Klimaregion gibt. Je höher die Schwelle ist, d. h. je seltener eine Überschreitung auftritt, desto mehr Tage enthalten den Wert 0, was die Effizienz des Verfahrens reduziert und dessen statistische Stabilität einschränkt.
- Beim Niederschlag findet der diagnostische Teil des Verfahrens aus Klimadaten klar getrennte Klassen, die zum Teil nur je einen Fall umfassen, der aber pointiert durch spezifische, von anderen Extremfällen unterscheidbare Konstellationen von atmosphärischen Parametern charakterisiert ist. Es ist jedoch nicht selbstverständlich, dass diese Konstellationen in den Modellprojektionen mit vergleichbaren Anteilen wiedergefunden werden. Zum Teil finden sich in den Modelldaten die Konstellationen häufiger, zum Teil werden sie gar nicht wiedergefunden. Trendentwicklungen sind bei den Extremklassen des Niederschlags zumeist sehr schwach. Es werden zwar Klassen gefunden, die in den Projektionen starke Ab- oder Zunahmetrends aufweisen; diese sind aber nicht dem Bereich der Extreme zuzuordnen.
- Tendenziell und in der klassenübergreifenden Zusammenschau überwiegt beim Sommerniederschlag die Rückgangsneigung (wie es auch in den WEREX VI-Regionalisierungen gefunden wurde) und im Winter liegt eine uneinheitliche Mischung vor, in der klassenweise sehr schwache Abnahmetrends und in einzelnen Klassen auch Zunahmetrends zu verzeichnen sind.
- Bei den Schwellenwertüberschreitungen des Niederschlags werden leichter nachvollziehbare Ergebnisse gefunden, wenn Überschreitungen der relativ niedrigen 10-mm-Schwelle als Zielgröße verwendet werden. Auch die Zielgröße als Wahrscheinlichkeit, dass der Niederschlag an einer oder mehreren Stationen den Schwellwert überschreitet zu fassen, erbringt keine deutlichen Verbesserungen bei der Einheitlichkeit der Wiedergabe zukünftiger Entwicklungen. Andererseits werden die Ergebnisse etwas deutlicher, wenn statt der festen Schwelle das Überschreiten des 90-Perzentils (bestimmt aus dem Niederschlag der Messungen im Gegenwartsklima) als Zielgröße angesetzt wird. Zusätzlich stellte sich heraus, dass das Überschreiten des 95-Perzentils hingegen ein zu strenges Kriterium ist.
- Ein Ensemblevergleich zeigt, dass Modellspezifika einen großen Einfluss auf die Häufigkeit der wiedergefundenen KlaMuKo-Klassen besitzen. Dies gilt in besonderem Maß für Prediktanden, die Schwellwertüberschreitungen beinhalten. In einem Modell mit bekannt starker projizierter mittlerer Klimaentwicklung werden beispielsweise auch Temperaturextremklassen häufiger besetzt. Das bedeutet, Veränderungen in der Zukunft werden von KlaMuKo in Form von Tendenzen beschrieben; die Magnitude der Veränderung ist wegen der Bandbreite der Resultate problematisch.

- Der Ensemblevergleich zeigt aber auch, dass sich die Projektionen mit den unterschiedlichen RCP-Szenarios und ihre zeitlichen Entwicklungen in systematischer Weise durch das KlaMuKo-Verfahren abbilden lassen. So lässt sich, bei der Temperatur deutlicher als beim Niederschlag, für die einzelnen Klassen die Reihung der Absolutbeträge der Trends von RCP2.6 → RCP4.5 → RCP8.5 ersehen. Es wird zudem eine Erkenntnis aus WEREX VI bestätigt: Der Unterschied zwischen RCP2.6 und RCP4.5 ist wesentlich geringer als derjenige zwischen RCP2.6 und RCP8.5.

5.4 WMSax2.0

Es stellte sich in der Praxis heraus, dass die Strategie, Elemente von WEREX und KlaMuKo in einer Verfahrensvariante gemeinsam einzusetzen, zu Resultaten führte, die Defizite in der Interpretierbarkeit gegenüber der weniger komplexen Vorgehensweise mit nicht modifizierten Daten besitzt. Es ist nicht auszuschließen, dass das WMSax2.0-Verfahren ein Potenzial zur Verbesserung von Aussagen bezüglich zukünftiger Extreme besitzt, aber im Rahmen der untersuchten Prädiktanden und Prädiktoren konnten keine Verbesserungen gefunden werden.

Literaturverzeichnis

- BENESTAD, R., HANSEN-BAUER, I., CHENG, D.: (2008): Empirical-statistical downscaling. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- BERNHOFER, C., BARFUS, C.: (2017): Verfahren zur objektivierten Ausweisung von Klima- und Klimaänderungsräumen. Dresden: LfULG, Sachsen
- DEE, D., UPPALA, S. ET AL.: (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q. J. Roy. Met. Soc., 553-597
- ENKE, W.: (2001): Regionalisierung von Klimamodell-Ergebnissen des statistischen Verfahrens der Wetterlagenklassifikation und nachgeordneter multipler Regressionsanalyse für Sachsen. Abschlussbericht. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
- ENKE, W., SPEKAT, A., KREIENKAMP, F.: (2016): Classification by Multiple Regression - A New Approach Towards the Classification of Extremes. Meteorology, Hydrology and Water Management, 1-15
- HESS, P., BREZOWSKY, H.: (1952): Katalog der Großwetterlagen Europas. Bad Kissingen: Deutscher Wetterdienst in der US-Zone, Bericht 33
- HÜBENER, H., BÜLOW, K., FOOKEN, C., FRÜH, B., HOFFMANN, P., HÖPP, S. ET AL.: (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. Wiesbaden: HLNUG Hessen - doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- JACOB, D., PODZUN, R.: (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO. Meteorol. Atmos. Phys., S. 119-129
- KALNAY, E., KANAMITSU, M. ET AL.: (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Met. Soc., 337-471
- KANAMITSU, M., EBISUZAKI, W. ET AL.: (2002): NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bull. Amer. Met. Soc., 1631-1643
- KREIENKAMP, F., PAXIAN, A., FRÜH, B.: (2017, in press): Evaluation of the Empirical Statistical Downscaling Method EPISODES. Climate Dynamics
- KREIENKAMP, F., PAXIAN, A., FRÜH, B., LORENZ, P., MATULLA, C.: (2018): Evaluation of the empirical-statistical downscaling method EPISODES. Clim. Dyn., 1-36
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W.: (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Dessau: Umweltbundesamt
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W.: (2011): KLIWETT Klimawandel und Wetterlagen Bericht Phase I. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W.: (2011): WEREX V: Regionale Klimaprojektionen für Sachsen. Dresden: LfULG (Herausgeber)
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., ENKE, W.: (2013): The Weather Generator used in the Empirical Statistical Downscaling Method WETTREG. Atmosphere, S. 169-197
- KREIENKAMP, F., SPEKAT, A., HOFFMANN, P.: (2017): Empirisch-statisches Downscaling - eine Übersicht ausgewählter Methoden. promet, 20-28
- MARAUN, D., WIDMANN, M.: (2018): Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press
- ORLOWSKY, B., GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P.: (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. Theor. Appl. Climatol., S. 209-223
- ROCKEL, B.: (2008): Special Issue: COSMO-CLM. Meteorologische Zeitschrift, S. 347-528
- SPEKAT, A., ENKE, W.: (2016a): Optimierungsmöglichkeiten für WEREX. Dresden (Schriftenreihe Heft 24/2016): LfULG
- SPEKAT, A., ENKE, W.: (2016b): WM Sax 2.0, Teil I: Modellphase. Dresden: LfULG, Sachsen

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de

Autoren:

Arne Spekat, Dr. Wolfgang Enke
Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
Dennis-Gabor-Straße 2, 14469 Potsdam
Telefon: +49 331 7452301
E-Mail: arne.spekat@cec-potsdam.de

Redaktion:

Dr. Johannes Franke
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5116
Telefax: +49 351 2612-5199
E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

Foto:

Arne Spekat (CEC Potsdam GmbH)

Redaktionsschluss:

03.02.2020

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de