

Institution



Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH

David-Gilly-Straße 1 - 14469 Potsdam, Germany - www.cec-potsdam.de

Projekttitlel

Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse
- Abschlussbericht -

Laufzeit

August 2013 bis Juni 2014

Projektleitung

Frank Kreienkamp, Arne Spekat

Projektbearbeitung

Frank Kreienkamp, Wolfgang Enke, Arne Spekat

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel Hessen
im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Potsdam, November 2014

Ausführende:

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
David-Gilly-Straße 1
14469 Potsdam

Dieser Bericht sollte so zitiert werden:

A. SPEKAT, W. ENKE und F. KREIENKAMP, 2014: Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse. Endbericht. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel, Wiesbaden.

Kurzfassung

Das Verfahren KlaMuKo (Klassifikation mit multipler Korrelation) stellt Beziehungen zwischen einer regionalen Klimagröße (z.B. der Temperatur am Erdboden) und Feldern aus der freien Atmosphäre (aus Reanalysen) her. Dazu wird mit Hilfe einer multiple Korrelation eine Auswahl an Atmosphärengrößen getroffen, die die regionale Klimagröße adäquat beschreibt. Eine modifizierte k-means-Clusteranalyse bewerkstelligt die eigentliche Klassifikation.

Im Rahmen des Vorhabens *Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse*, zu dem dieser Endbericht vorgelegt wird, erfolgten Studien und Entwicklungen in den Bereichen (i) Nutzung von SYNOP-Daten als Informationsquelle für Regen- und Windextreme; (ii) Weiterentwicklung einer Klassifikationmethodik, die für Extreme besonders gut geeignet ist; (iii) Erweiterung des Pools der potenziellen Prediktoren mit Blick auf Starkregen- und -Windereignisse, insbesondere Implementierung von Labilitätsmaßen und (iv) Analysen der zukünftigen Entwicklung von Starkregen und -Windereignissen mit Hilfe der im Vorhaben weiter entwickelten Methodik, angewandt auf eine Klima-Projektion mit dem Modell MPI-ESM-Szenario RCP8.5 für den Zeitraum 1951–2100.

Einige wichtige Ergebnisse dieses Vorhabens:

- Der Einsatz der Klassifikation KlaMuKo ermöglicht eine gute Aufspaltung von meteorologischen Variablen in Klassen mit dem Ziel auch Extremklassen zu erhalten;
- für die Beschreibung von komplexen Größen, wie dem Auftreten von Gewittern, zieht die Klassifikation Nutzen aus einer Vielzahl von atmosphärischen Labilitätsmaßen;
- die gefundenen Klassen lassen sich auch in den Klimamodell-Simulationen gut wiederfinden;
- die Analysen von Simulationsdaten eines Klimamodells ergeben, dass Klassen, die starke Extreme zusammenfassen, vielfach nur geringe Trendentwicklungen aufweisen;
- Trendentwicklungen treten tendenziell bei Klassen mit nicht so starker „Extremität“ auf – die Belastbarkeit ist aber reduziert;
- für die Entwicklung des Niederschlags über 10mm/Tag weisen die Trends, unter diesem Vorbehalt, auf sommerlichen Rückgang der Extreme hin;
- für die Entwicklung des Winds weisen die Trends, unter diesem Vorbehalt, auf leichten sommerlichen Rückgang der Extreme hin;
- für die Entwicklung des Auftretens von Gewittern sind einheitliche Trendaussagen nicht möglich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Beobachtungsdaten als Informationsquelle für Extreme	5
2.1	SYNOP-Daten, Eigenschaften und Verfügbarkeit	5
2.2	Repräsentativität von Extremereignissen in Beobachtungsdaten	8
2.3	Ergebnisse mit SYNOP-Daten	10
3	Das KlaMuKo-Verfahren	13
3.1	Prinzip	13
3.1.1	Teil 1 von KlaMuKo: Regressionsanalyse	14
3.1.2	Teil 2 von KlaMuKo: Klassifikation	15
3.2	Optimierungsschritte des KlaMuKo-Verfahrens	16
3.2.1	Erweiterung des Pools an potenziellen Prediktoren	16
3.2.2	Methodische Verbesserungen: Summarischer Prediktor	18
3.2.3	Methodische Verbesserungen: Verfahren zur Ermittlung der Startpartition für den Klassifikationsschritt von KlaMuKo	18
3.2.4	Die Problematik der Temperatur in der 1000 hPa-Fläche	20
3.3	Ergebnisse mit KlaMuKo – Analyse des Gegenwartsklimas	21
3.3.1	Maximumtemperatur	22
3.3.2	Mittlerer Niederschlag	22
3.3.3	Starkniederschlag	23
3.3.4	Wind und Starkwind	24
3.3.5	Gewitter	25
3.3.6	Schauer	25
3.3.7	Starkwind	26
4	Zukünftiges Auftreten von Klimaextremen	27
4.1	Prinzip der Untersuchung	27
4.2	Zur Reproduzierbarkeit von atmosphärischen Größen in einem Klimamodell	28
4.3	Zum Einsatz von KlaMuKo im Zusammenhang mit Trendbestimmungen	29

4.4	Sensitivität der Identifikation von Extremklassen	30
4.4.1	Mittelwert-Kriterium	30
4.4.2	Trend-Kriterium	31
4.4.3	Kritische Anzahl der Werte in einer Klasse	31
4.4.4	Anwendung der Kriterien	31
4.5	Beispiel 1: Maximumtemperatur	33
4.6	Beispiel 2: Starker Niederschlag	39
4.7	Zukunftsentwicklungen, verschiedene Indikatoren	43
4.7.1	Starkwind – Verwendung von Klimadaten	43
4.7.2	Starkwind – Verwendung von SYNOP-Daten	46
4.7.3	Gewitter – Verwendung von SYNOP-Daten	48
4.7.4	Gewitter, Schauer und Starkwind	51
5	Zusammenfassung	55
5.1	Entwicklungsstufen des Verfahrens – Beschreibung der Gegenwart	55
5.2	Entwicklungen im zukünftigen Klima	57
5.3	Fazit	59
	Literaturverzeichnis	61
A	Auswertung der SYNOP-Meldungen	I
A.1	Zur Verschlüsselung von meteorologischen Meldungen	I
A.2	Das erweiterte Gewitterkriterium	II
A.3	Das erweiterte Schauerkriterium	II
A.4	Das erweiterte Starkwindkriterium	II
B	Potenzielle Prediktoren	V
B.1	Übersicht der verfügbaren Prediktoren	V
B.2	Labilitätsgrößen im Pool der potenziellen Prediktoren	VIII
B.2.1	Physikalische Eigenschaften im Kondensationsniveau	IX
B.2.2	Niederschlagsfähiges Wasser	XI
B.2.3	Gewitterindex LI	XII
B.2.4	Gewitterindex TT	XIII
B.2.5	Gewitterindex KI	XIII
B.2.6	Gewitterindex BI	XIII
B.2.7	SWEAT-Labilitätsindex	XIII
B.2.8	CAPE-Index-Äquivalent	XIV
B.2.9	CIN-Index-Äquivalent	XVII
B.2.10	Stabilitätsindex nach Enke	XVII
B.2.11	Stabilitätsindex nach Enke mit Feuchte	XVIII
B.2.12	Stabilitätsindex nach Showalter	XIX
B.2.13	Frontneigungswinkel nach Margules	XIX
C	Relevanz der Prediktoren: Rangfolgeuntersuchung	XXI
C.1	Prinzip der Untersuchung	XXI
C.2	Relevante Prediktoren für die Temperatur (TX, TM, TN)	XXII

C.3	Relevante Prediktoren für den Niederschlag (RR)	XXIII
C.4	Relevante Prediktoren für den Luftdruck (PP)	XXIV
C.5	Relevante Prediktoren für den Dampfdruck (DD)	XXV
C.6	Relevante Prediktoren für Sonnenscheindauer (SD) und Bewölkung (NN)	XXV
C.7	Relevante Prediktoren für die Windgeschwindigkeit (FF)	XXVI
C.8	Beurteilungsmaße für die KlaMuKo-Klassifikationen	XXVI
C.9	Gewitter-, Schauer- und Starkwind-Indikatoren als Prediktanden	XXIX
C.10	KlaMuKo mit zufällig angeordneten Prediktandenreihen	XXXIV
D	Reproduzierbarkeit von GP, TE und RF in Modellergebnissen	XXXVII
D.1	Motivation	XXXVII
D.2	Ergebnisse	XXXVIII
D.3	Schlussfolgerungen: Belastbarkeit der GP-, TE- und RF- Simulationsdaten	XL
E	Trends von Prediktoren	XLIII
E.1	Trends von T_{850}	XLIV
E.2	Trends von aF_{1000}	XLVI
E.3	Trends von TT	XLVIII
E.4	Trends von CAPE	L
E.5	Trends von SHW	LII
E.6	Fazit	LII
F	AWB-Rechenbeispiel	LV

1 Einleitung

Die Anpassung an den bereits eintretenden Klimawandel besitzt nach Einschätzung des Weltklimarats eine zentrale Bedeutung im System Klima-Mensch. Die Folge der Sachstandsberichte (IPCC, 1990, 1996b,a, 2001b,a, 2007c,a,b, 2013a) hat über die Jahre einen Wissenskanon um den Charakter des Klimawandels, seine Auswirkungen und die zu treffenden Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen geschaffen. Aktuell, das heißt in den Jahren 2013 und 2014, erfolgt die Publikation der neuesten Sachstandsberichte der einzelnen IPCC-Arbeitsgruppen. Dazu sei auf die Seiten des IPCC verwiesen (IPCC, 2013b,a, auf www.ipcc.ch).

Eine Kernrolle bei der Entwicklung und Umsetzung von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen kommt dabei den auf regionaler Ebene tätigen Behörden zu. In Hessen wurden im Laufe der Jahre im Zuge des Programms INKLIM (INteгриertes KLIMaschutzprogramm Hessen) und seiner Folgeprogramme zahlreiche Studien durchgeführt. Details finden sich auf den Webseiten des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) klimawandel.hlug.de.

In einer vom HLUG 2013 in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie (SPEKAT et al., 2013a, in der Folge MBS2013 genannt)¹⁾ werden Potenziale der Analyse, Diagnose und Projektion von Extremen ausgelotet. Mit einem neuen Ansatz wird ein Weg aufgezeigt, Abschätzungen der Wahrscheinlichkeit des Auftretens extremer Wetter-/Witterungssituationen auf der Basis *großräumiger atmosphärischer Felder* durchzuführen. Die in MBS2013 verwendete Zielgröße ist das *Auftreten von konvektiven, mit Gewittern, starkem Niederschlag und Wind verbundenen Ereignissen im Sommer*. Eine Verbindung zwischen den großräumigen Feldern und den regionalen Extremen herzustellen ist sinnvoll, denn bei diesen Extremen ist die direkte Nutzung von Globalen Zirkulationsmodellen (Global Circulations Models, GCM) problematisch. Erstens sind die räumlichen Skalen von konvektiven Ereignissen (Größenordnung: mehrere Kilometer) und GCM (Größenordnung: rund 100 Kilometer) stark unterschiedlich und zweitens gibt es einige Defizite in der modellhaften, physikalischen Beschreibung des Phänomens Konvektion in den GCMs. Jedoch können sie zu Rate gezogen werden, um das Potenzial für das Auftreten extremer Wettersituationen als Folge von großräumigen atmosphärischen Zuständen beschreiben.

Identifikation und Einschätzung von Extremen sowie deren zeitliche Entwicklung sind die Hauptaspekte des Vorhabens *Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse*, zu dem dieser Bericht vorgelegt wird²⁾.

¹⁾Der Bericht zur Machbarkeitsstudie ist auf Anfrage beim HLUG erhältlich.

²⁾Hinweis für Interessierte: Wichtige Basisinformation zu Extremen, deren Risiken und möglichen

Es nimmt Anregungen der MBS2013 auf und setzt diese um. Es erfolgt zum Beispiel eine Einschätzung der Nutzbarkeit von Augenbeobachtungen. Auch wird ein auf Extreme fokussiertes Klassifikationsverfahren im Rahmen des Vorhabens weiter entwickelt. Schließlich werden Resultate einer Klimaprojektion analysiert mit dem Ziel, Aussagen zu zukünftigen Änderungen von Extremen zu gewinnen.

Kontext: Klassifikation von Zirkulationsmustern – Extreme – konvektive Ereignisse

Das Stichwort „Klassifikation“ ist bereits gefallen. Mit dieser Strategie wird eine große, ungeordnet vorliegende Datenmenge in Rubriken, Muster oder Klassen eingeteilt. Dabei sind die einer Klasse zugeordneten Fälle einander möglichst ähnlich. Die Klassen wiederum sind möglichst unterschiedlich, um das effektive Herausarbeiten von Unterschieden zu ermöglichen. Es gibt zahlreiche Verfahren, eine solche Klassifikation durchzuführen. Bei der Findung von Mustern in der atmosphärischen Zirkulation ist dies zum Beispiel ein manuelles, subjektives Verfahren wie das der Großwetterlagen (erstmal beschrieben in [HESS und BREZOWSKY, 1952](#)) oder ein automatisiertes, objektives Verfahren wie WETTREG ([KREIENKAMP et al., 2010](#)). Ein internationales Programm (COST-Aktion 733) widmete sich zwischen 2005 und 2009 dem Vergleich von Klassifikationsmethoden für Zirkulationsmuster.

Was ist der Bezug zu *diesem* Vorhaben? Klassifikationen sind ein adäquater Weg zur statistischen Beschreibung der Verbindung zwischen großräumiger Zirkulation und regionalem Klima. Die Ergebnisse der COST-Aktion aber auch anderer Studien belegen, dass es durch ihren Einsatz in der Hauptsache einen Informationsgewinn bezüglich der Beschreibung des *mittleren* Klimazustands gibt. Für zahlreiche Nutzer im Bereich von Klimafolgen und Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ist dies ein durchaus verwendbares Basismaterial. Es zeigt sich jedoch zunehmend, dass der Betrachtung zukünftiger *Extreme* mehr Gewicht beigemessen werden muss. Daher ist ein Klassifikationsverfahren, das eine Identifikation von Extremzuständen der atmosphärischen Zirkulation ermöglicht, wünschenswert. Ansätze für ein solches, KlaMuKo (Klassifikation durch *multiple Korrelation*) genanntes Verfahren existiert bereits. In MBS2013 sind die Grundzüge dargestellt. Für dieses Vorhaben wurde KlaMuKo mit dem Fokus auf die konvektiven Ereignisse adaptiert und erweitert.

Zu diesem Bericht

Der vorliegende Endbericht fasst die Erkenntnisse der vier miteinander verbundenen Teilstudien des Vorhabens zusammen (eine Dokumentation der Arbeiten der ersten Projektphase finden sich im Zwischenbericht [SPEKAT et al., 2013b](#)):

Anpassungsmaßnahmen liefert [IPCC \(2012\)](#).

-
- Nutzung von SYNOP-Beobachtungsdaten als Informationsquelle für Regen- und Windextreame (Erste Projektphase, 2013).
 - Weitere Verbesserung des KlaMuKo-Verfahrens durch Optimierung der Startpartitions-Suche sowie Einführung eines summarischen Prediktors OSP (Erste Projektphase, 2013).
 - Erweiterung des Pools an potenziellen Prediktoren um zahlreiche Stabilitätsmaße sowie weitere Geopotenzialflächen (begonnen in der ersten Projektphase 2013, in der Hauptsache ausgeführt in der zweiten Projektphase 2014)
 - Anwendung des erweiterten KlaMuKo-Verfahrens auf Ergebnisse einer Klima-Projektionsrechnung (Zweite Projektphase, 2014).

Im Hauptteil des Berichts wird zunächst die Datenquelle SYNOP vorgestellt und diskutiert. Es handelt sich um Stationsmeldungen auf der Basis von Augenbeobachtungen, die zumeist stündlich verfügbar sind. Als einzige Datenquelle liefern sie direkte Information zum Auftreten von Gewittern und Schauern.

Danach erfolgt eine kurze Vorstellung des statistischen Verfahrens KlaMuKo sowie der für diese Vorhaben ausgeführten Modifikationen und Optimierungen. Ergänzt wird dies durch Betrachtungen der Relevanz der großräumigen Atmosphären-Felder für spezifische regionale Klimagrößen. Außerdem finden sich dort Beispiele für die Klassifikationen, fokussiert auf verschiedene Zielgrößen.

Der dritte Abschnitt des Hauptteils ist den Extremen in einem zukünftigen Klima gewidmet. Die Grundlage wurde durch die Identifikation des Zusammenhangs zwischen bestimmten, relevanten großräumigen atmosphärischen Parametern und dem Regionalklima geschaffen. In diesem Abschnitt werden der Analyseweg und die Ergebnisse unter Verwendung einer MPI-ESM RCP8.5-Klimaprojektion beschrieben.

Im Anhang finden sich Ergänzungen zu den Teilstudien, wie zum Beispiel eine Auflistung der zur Verfügung stehenden atmosphärischen Größen, eine Zusammenstellung der physikalischen Grundlagen der neu hinzugekommenen Größen.

Im Bericht werden häufig Abkürzungen für meteorologische Variablen verwendet. Diese sind

TX	Tagesmaximumtemperatur
TM	Tagesmitteltemperatur
TN	Tagesminimumtemperatur
RR	Niederschlagssumme
PP	Luftdruck
DD	Dampfdruck
RF	relative Feuchte
SD	Sonnenscheindauer
NN	Bewölkung
FF	Wind

2 Nutzung von Beobachtungsdaten als Informationsquelle für Extreme

Viele Parameter des Klimas können mit Messinstrumenten registriert und somit quasi-automatisch erfasst werden. Dazu gehören beispielsweise Temperatur, Niederschlagsmenge, Feuchte und Wind. Die Messungen liegen in der Regel als tägliche Daten vor und geben die Mittelwerte bzw. beim Niederschlag die Tagessummen wieder. Bei der Temperatur wird auch der aufgetretene Höchst- und Tiefstwert registriert.

Andere Größen sind nicht adäquat durch Mess-Sensorik erfassbar und erfordern *Augenbeobachtungen*. Dazu gehört das Auftreten von Wetterereignissen wie Gewittern und Schauern, aber auch eine Beurteilung von Wolkenart und Bedeckungsgrad.

Damit eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, die für dieses Vorhaben relevante Ereignisse (Gewitter oder Schauer) erkannt zu haben, müssen die Beobachtungen zudem in möglichst hoher zeitlicher Dichte erfolgen. Die beiden Kriterien – Augenbeobachtung und hohe zeitliche Beobachtungsdichte – sind bei den so genannten SYNOP-Stationen erfüllt.

Anmerkung: Wind, ein weiterer für das Vorhaben relevanter Parameter, benötigt zwar nicht die Augenbeobachtungen aber eine hohe zeitliche Dichte der Messungen. Windspitzen treten oft nur kurzzeitig auf, weshalb zum Beispiel tägliche Mittelwerte nur reduzierte Aussagekraft besitzen und die Daten von SYNOP-Stationen oftmals besser geeignet sind.

2.1 SYNOP-Daten, Eigenschaften und Verfügbarkeit

In Deutschland gibt es rund 100 SYNOP-Stationen, die ein regelmäßiges Meldesoll für eine Vielzahl meteorologischer Größen (z.B. Temperatur, Luftdruck, Feuchte, Wind) mit erhöhter zeitlicher Dichte haben. Sie sind Teil des Netzes von rund 300 Stationen, die ebenfalls mehrere meteorologische Größen registrieren aber nur in Form einer Meldung pro Tag. Darüber hinaus gibt es rund 3000 Stationen, an denen ausschließlich Niederschlag gemessen wird.

Ein wichtiger Aspekt der SYNOP-Daten ist, dass sie primär zum Zweck des zeitnahen Überblicks der Wettersituation verbreitet werden. Daher ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Die Daten können fehlerbehaftet sein¹⁾
- Es können unvollständige Sätze an gemessenen Größen enthalten sein. Wie oben erwähnt, hat sich zudem die Häufigkeit der Meldungen (6-stündig, 3-stündig, stündlich) über die Zeit und von Station zu Station verändert. Des Weiteren gab es im Lauf der Zeit Änderungen in der Art der Station, da ein Übergang von *teils manuell* auf *automatisch* erfolgte. Zudem werden Stationen geschlossen und andere neu in das Messnetz eingebracht.

Auf der anderen Seite besitzen die Meldungen von SYNOP-Stationen neben dem Vorhandensein von Augenbeobachtungen den Vorteil verhältnismäßig großer räumlicher und zeitlicher Dichte.

Bei der Analyse von Daten der SYNOP-Stationen ist zu beachten, dass sich die Häufigkeit/zeitliche Dichte der Messungen im Laufe der Jahrzehnte verändert hat. So gab es bis in die frühen 70er Jahre verbreitet Beobachtungen nur alle 6 Stunden. Danach erfolgte ein gradueller Übergang zu einer 3-stündigen Dichte und in den jüngeren Vergangenheit steigt die Zahl der Stationen, die stündlich Daten verbreiten – vielfach sind dies allerdings automatische Wetterstationen (AWS). Dies bedeutet, dass der Anteil der Augenbeobachtungen rückgängig ist, was erheblichen Einfluss auf den für diese Studie relevanten Datenbestand hat. Für einige Stationen gilt, dass infolge wetterdienstlicher Umstrukturierungen Augenbeobachtungen nur während der Tagesstunden und Automatenregistrierungen während der Nachtstunden verfügbar sind.

Unter den gegebenen Umständen sind SYNOP-Daten mit ihren möglichen Fehlerquellen und der „Eigendynamik“ der Meldungsart und -dichte ein Kompromiss, aber es gibt leider keine alternative Datenquelle höherer Zuverlässigkeit.

Für die Untersuchungen können die folgende 14 SYNOP-Stationen aus dem Raum Hessen (definiert durch die Koordinaten 52°N und 7,5°E als linke obere Ecke sowie 48°N und 11°E als rechte untere Ecke) eingesetzt werden – in Klammern ist die jeweilige von der WMO vergebene Stationskennung angegeben – einige der Stationen befinden sich in Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz oder Thüringen:

1. Bad Hersfeld (10542)
2. Bad Kissingen (10658)
3. Bad Marienberg (10526)
4. Frankfurt-Flugwetterwarte (10637)

¹⁾Das System der WMO-Regularien sieht zwar einen Korrektur-Mechanismus bei zeitnahe Erkennen von Fehlern vor, aber es ist nicht sicher, dass die Korrekturen auch tatsächlich form- und fristgerecht angebracht werden. Wegen des „Quicklook“-Charakters von SYNOP-Daten werden mit ihnen auch keine umfangreichen Qualitätskontrollen oder Homogenisierungen durchgeführt.

5. Gießen Wettenberg (10532)
6. Kahler Asten (10427)
7. Kassel (10438)
8. Kleiner Feldberg (10635)
9. Koblenz (10515)
10. Leinefelde (10449)
11. Mannheim (10729)
12. Meiningen (10548)
13. Wasserkuppe (10544)
14. Würzburg (10655)

Wie viele der 14 Stationen im Zeitraum 1971–2010 tatsächlich verfügbar sind, ist in Abb. 2.1 ersichtlich. Dazu wurde für jeden Tag des Zeitraums ermittelt, ob an mindestens einem der 24 Termine eine SYNOP-Meldung mit Augenbeobachtungen verfügbar ist.

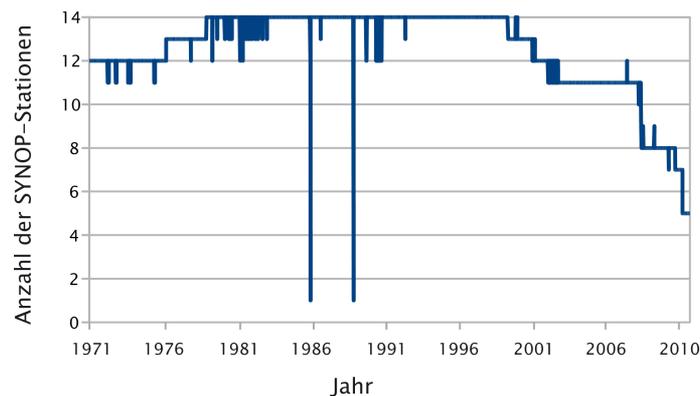


Abbildung 2.1: Anzahl der in der Hessenregion verfügbaren SYNOP-Stationen mit Augenbeobachtungen im Zeitraum 1971–2010.

Es zeigt sich, dass in den ersten Jahren die Augenbeobachtungsdaten täglich in der Regel für 12 Stationen vorliegen. Zwischen 1981 und 2000 sind es in der Regel 14 Stationen – mit seltenen Netzausfällen an einzelnen Tagen. Nach 2000 erfolgt ein Rückgang auf 5 bis 8 Stationsmeldungen. Dies liegt zum größten Teil an der zunehmenden Automatisierung der Stationen, die dann keine SYNOP-Meldung mit Augenbeobachtungen mehr liefern. Die an einem Tag tatsächlich vorhandene Anzahl von Stationsmeldungen ist eine wichtige Information für einen Teil der Untersuchungen, bei denen es um den Anteil der Stationen geht, an denen Gewitter, Schauer oder starker Wind auftraten.

Den beiden oben beschriebenen Betrachtungsweisen (*Kriterium ja/nein* und *Stationsanteil*) wird eine weitere hinzugefügt, die Bedeutung für Repräsentativitätsbetrachtungen besitzt. Dazu werden beim Stationsanteil Schwellwerte eingesetzt, um beispielsweise Fälle betrachten zu können, für die das Auftreten von Gewittern/Schauern/Starkwind innerhalb eines Tages einem gewissen Anteil besitzt. Empirisch wurde für sinnvoll befunden, das Auftreten an 30% oder 70% der Stationen zu fordern.

Eine weitere Anregung von MBS2013 besteht darin, zu untersuchen, ob die Kriterien einzeln oder kombiniert erfüllt sind. Zum Beispiel treten extreme konvektive Ereignisse je nach Jahreszeit begleitet von Gewittern oder auch „nur“ von Schauern auf.

Vor der Analyse wurden die SYNOP-Daten aufbereitet.

- Zur Verbesserung der Detektierung von Gewittern, Schauern und Starkwind wurden durch Zusammenfassung von relevanten Teilen der Meldungen *Indikatoren* für diese Extreme geschaffen (Details finden sich in Anhang A.2–A.4);
- Für Untersuchungen der Intensität der Ereignisse wurden Zeitreihen des Auftretens *mehrerer* Indikatoren (z.B. Gewitter + Wind) an einem Tag geschaffen;
- Für Untersuchungen der Repräsentativität der Ereignisse wurden für jeden Tag festgestellt an wie vielen Stationen die jeweiligen Indikatoren auftraten (s.o.).

Ein wichtiges Ergebnis der Aufbereitung ist, dass eine hinreichende Meldungsdichte für Wind-bezogenen Information erst ab 1991 vorliegt. Nach 2010 geht die Dichte wieder zurück. Daher bietet es sich an, SYNOP-Daten für den Zeitraum 1991–2010 auszuwerten.

Im Rahmen dieser Studie wird dem Ansatz nachgegangen, ob mit dem KlaMuKo-Verfahren Gemeinsamkeiten von Tagen, an denen die o.e. Kriterien eintrafen, identifiziert werden können. Dazu wurden verschiedene Aufbereitungen durchgeführt.

Aufbereitungsvariante 1: Binar (bin)

Die entstehende Zeitreihe besteht aus Einträgen, die für jeden Tag entweder 0 oder 1 sein können. Ein Tag bekommt die Markierung „1“, wenn an ihm ein Kriterium oder mehrere Kriterien erfüllt sind. In allen anderen Fällen ist die Markierung „0“. Dies wird auch als *einfache Binarisierung* bezeichnet.

Aufbereitungsvariante 2: Flächen-Repräsentativität (FR)

Auch in diesem Fall besteht die Zeitreihe aus Einträgen, die für jeden Tag entweder 0 oder 1 sein können. Allerdings sind die Kriterien zur Vergabe der Ein-

träge anders. Ein Tag bekommt die Markierung „1“, wenn an ihm ein Kriterium an einer *repräsentativen Anzahl von Stationen* erfüllt ist. Zum Beispiel kann gefordert werden, die Markierung „1“ zu setzen, wenn an einem Tag an 30% der Stationen ein Kriterium (etwa Gewitter) zutrifft. Eine alternative Schwelle ist z.B. 70%. In allen anderen Fällen ist die Markierung „0“.

Damit kann eine Art Filterfunktion realisiert werden, die es ermöglicht, ausgeprägte Erscheinungen zu betrachten. Ein Grundwissen um das zu untersuchende Extremum ist wichtig: Die im vorigen Abschnitt erläuterte einfache Binarisierung kann ein zu schwaches Kriterium sein, da diese bereits eine „1“ setzt, wenn das Kriterium an einem Tag an irgendeiner Station erfüllt ist. So würden bei einer Windbetrachtung in einem solchen Fall etwa alle Tage „in einen Topf geworfen“, an denen eine einzige Station starken Wind aufweist. Wegen der Klarheit von Ort zu Ort unterschiedlichen Ausprägung des Windes könnte dies zu einem nicht gut differenzierten Ergebnis führen.

Andererseits kann die Forderung nach dem Auftreten an 70% der Stationen zu streng sein. So würden dann bei einer Gewitterbetrachtung beispielsweise alle Tage „unter den Tisch fallen“, an denen ein so wetterwirksames Phänomen nur an der Hälfte der Stationen registriert wurde.

Aufbereitungsvariante 3: Flächen-Wahrscheinlichkeit (FW)

In diesem Fall wird ermittelt, welcher *Anteil der Stationen* das Eintreten eines Kriteriums aufweist. Daher besteht die Zeitreihe aus Einträgen, die für jeden Tag zwischen 0 und 100 liegen. „100“ bedeutet dabei, dass das Kriterium innerhalb des Tages an allen Stationen auftritt. Bei „50“ tritt es an der Hälfte der Stationen auf und bei „0“ wird es an dem Tag nirgends registriert.

Die Flächen-Wahrscheinlichkeit ist eine Größe, die es ermöglicht, schwache und starke Ausprägungen eines Kriteriums gemeinsam zu betrachten. In den oben geschilderten Aufbereitungsvarianten *binar* und *FR* werden entweder relativ viele Tage gleichwertig in die Untersuchung aufgenommen (*binar*) oder es werden möglicherweise relativ viele Tage einer Untersuchung vorenthalten (*FR*). Insbesondere Studien des Auftretens von Gewittern, Schauern und Starkwind zeigten besonders hohe Korrelationen zwischen Atmosphärenfeldern und der Zielgröße, wenn die Aufbereitung als Flächen-Wahrscheinlichkeit erfolgte.

2.3 Ergebnisse mit SYNOP-Daten

Ergänzend zu den Angaben in MBS2013 und als Überblickinformation wurde im Rahmen dieses Vorhabens ausgewertet, wie häufig die Gewitter-, Schauer- und Starkwindkriterien in den Monaten und Jahreszeiten des Zeitraums 1991–2010 auftraten.

Dabei wird das Sachverhalten wie folgt dargestellt: Die in Abb. 2.4 und 2.3 gezeigten Balken und Kurven beschreiben den Anteil des Auftretens der jeweiligen Kriterien an der *Gesamtzahl der betrachteten Tage*. Sie vermitteln also

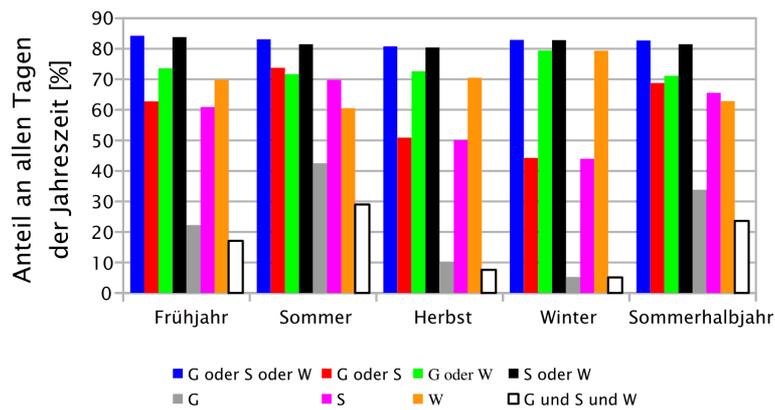


Abbildung 2.3: Anteil der aus SYNOP-Meldungen ermittelten Gewitter (G)-, Schauer (S)- und Wind (W)-Indikatoren sowie deren Kombinationen an allen Tagen des Zeitraums 1991–2010 für die Jahreszeiten und das Sommerhalbjahr.

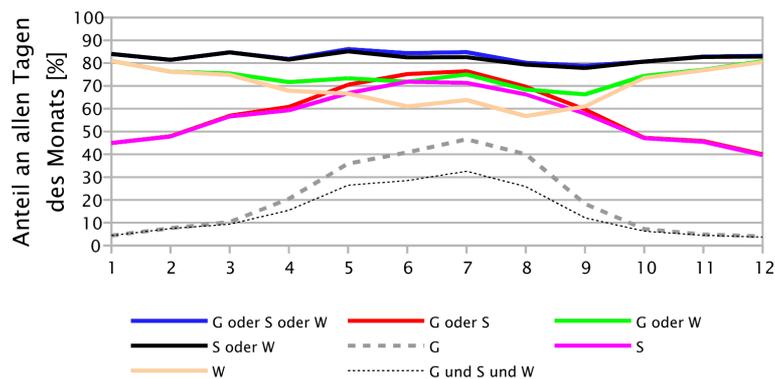


Abbildung 2.4: Monatlicher Anteil der aus SYNOP-Meldungen ermittelten Gewitter (G)-, Schauer (S)- und Wind (W)-Indikatoren sowie deren Kombinationen an allen Tagen des Zeitraums 1991–2010.

ein Bild, wie häufig oder selten das betrachtete Phänomen (Gewitter, Schauer, Starkwind) resp. eine Kombination daraus ist.

Beispiel Gewitter: Eine Auszählung ergab, dass im Zeitraum 1991–2010 1471 Gewittertage auftraten⁵⁾. Wie die mittelgrauen Balken in Abb. 2.3 zeigen, gab im Frühjahr (MAM) an etwas über 20% der rund 1800 analysierten Frühjahrs-tage des Zeitraums 1991–2010 Gewitter. An den rund 1800 Tagen des Sommers (JJA) sind Gewitter zu rund 40% vertreten und in den Jahreszeiten Herbst (SON) und Winter (DJF) sind es rund 10% bzw. 5%. Für die rund 3650 Tage der Sommerhalbjahre 1991–2010 wurde ein Anteil von etwa 35% gefunden. Auf einzelne Monate (dargestellt in Abb. 2.4) bezogen ergeben die Untersuchungen, dass an den 620 Januartagen des Zeitraums 1991–2010 Gewitter an 27 Tagen (rund 4,5%) auftraten. An den untersuchten 620 Julitagen waren es 289 Tage mit Gewitter (rund 46,5%). Die gestrichelte dicke graue Kurve in Abb. 2.4 zeigt den Jahresgang dieses Kriteriums.

Starkwindtage sind deutlich häufiger. Die orangefarbenen Balken in Abb. 2.3 weisen Anteile zwischen 60 und 80% für die jeweiligen Jahreszeiten und das

⁵⁾Dies entspricht rund 20% der 7300 Tage des gesamten Untersuchungszeitraums.

Sommerhalbjahr aus. Die lachsfarbene Kurve in Abb. 2.4 zeigt dieses Verhalten in monatlicher Auflösung.

Hierzu noch ein ergänzendes Beispiel: Von den 620 untersuchten Januartagen des Zeitraums 1991–2010 zeigten 279 (45%) das Schauerkriterium und 502 (81%) das Windkriterium. Tage mit Schauern oder Starkwind (S oder W) kamen im Untersuchungsgebiet im Januar 521-mal (84%) vor.

Bei dieser Betrachtungsweise, die sich an der *Gesamtzahl der Tage* orientiert, sind Jahrgänge mit Maximum im Sommer und Minimum im Winter für den Gewitterindikator, den (G+S+W)-Indikator, den Schauerindikator und den (G oder S)-Indikator erkennbar, während der Windindikator tendenziell in den Wintermonaten etwas häufiger „anschlägt“ und in den Sommermonaten Starkwind seltener auftritt. Dies ist physikalisch-synoptisch gut nachvollziehbar, denn in den Sommermonaten geht auf Grund der stärkeren Einstrahlung viel Energie in das Entstehen der (vertikalen) konvektiven Prozesse, was sich in Gewittern und Schauern manifestiert. Das Zirkulationsregime des Winters ist hingegen durch besonders hohe Temperaturgegensätze zwischen stark ausgekühlter Polarregion und dazu relativ hoher Temperatur in den subtropischen Breiten charakterisiert. Unter diesen Bedingungen verstärkt sich in den mittleren Breiten die Aktivität von starken Hoch- und Tiefdruckgebieten, was wiederum zu erhöhter (horizontaler) Luftbewegung und stärkerem Wind führt.

Bezüglich der Kombinationen von Gewittern, Schauern und Wind ist außerdem folgendes interessant: Dominiert vom relativ häufigen Starkwind sind 80 und 90% aller Tage dadurch charakterisiert, dass mindestens eines der drei Kriterien (Gewitter *oder* Schauer *oder* Wind) erfüllt ist. Dominiert vom Jahrgang des Gewitterkriteriums wird das *gemeinsame* Auftreten der drei Kriterien an rund 25% der Tage des Sommerhalbjahrs, 30% der Tage des meteorologischen Sommers (JJA) aber nur an rund 5% der Tage des meteorologischen Winters verzeichnet.

Nach diesen Betrachtungen der Auftretenshäufigkeit im Untersuchungsgebiet wird in den nachfolgenden Abschnitten eine Reihe von KlaMuKo-Untersuchungen vorgestellt, die als Bezugsrahmen den *Sommer*, d.h. (Juni–August) oder das *Sommerhalbjahr*, d.h. April–September, besitzen.

3 Das KlaMuKo-Verfahren

3.1 Prinzip

Beschreibungen, Darstellungen, Analysen und Erläuterungen zur methodischen Aspekten des KlaMuKo-Verfahrens (**K**lassifikation durch **M**ultiple **K**orrelationen) finden sich in ausführlicher Form in MBS2013. Abb. 3.1 zeigt das Prinzip.

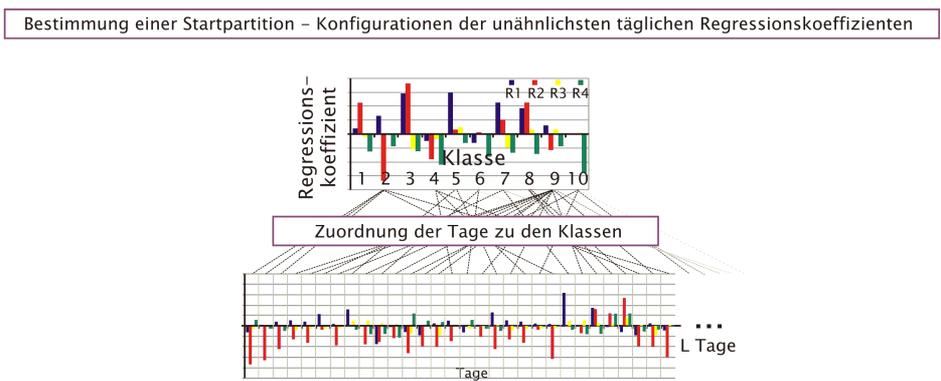
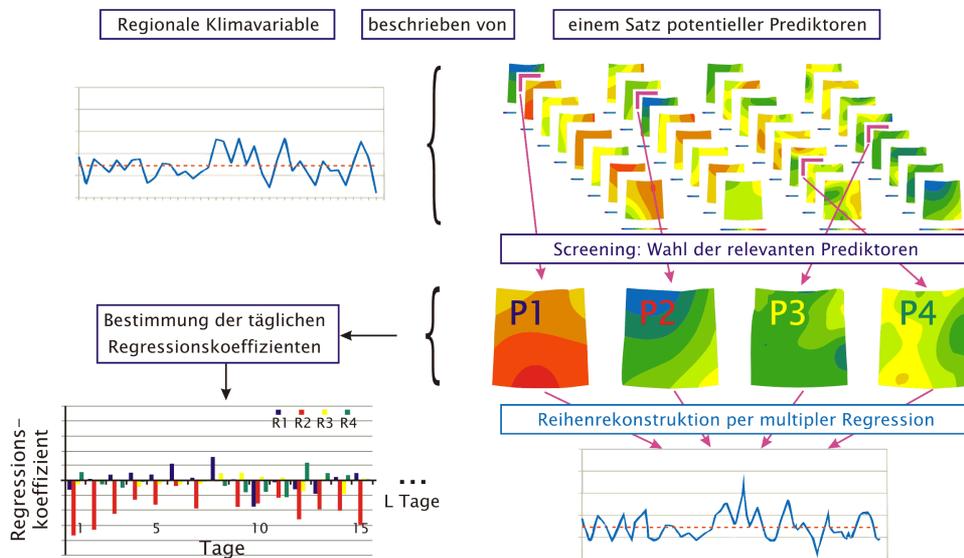


Abbildung 3.1: Prinzipskizze des KlaMuKo-Verfahrens.

3.1.1 Teil 1 von KlaMuKo: Regressionsanalyse

Im Grunde strebt KlaMuKo an, meteorologische Information in der *regionalen* Skala mit *großräumigen atmosphärischen Feldern* in Beziehung zu setzen. Bei der meteorologischen Information kann es sich z.B. um Zeitreihen regionaler Mittelwerte von Temperatur, Niederschlag oder Wind handeln. Es können aber auch Indikatoren sein, die das Auftreten von Ereignissen wie Gewittern oder Schauern anzeigen. In Abb. 3.1 wird diese Zeitreihe oben links als *Regionale Klimavariablen* dargestellt.

Die großräumigen atmosphärischen Felder stammen aus Klimamodellen und umfassen eine Fülle von physikalischen Größen wie Geopotenzial, Temperatur oder Feuchte sowie daraus abgeleitete Größen wie relative Topografien, Vorticity, Advektion oder Labilitätsgrößen. Sie liegen für den Raum Mitteleuropa an Gitterpunkten mit einem Abstand von rund 100 km vor. In Abb. 3.1 wird der Bestand der verschiedenen großräumigen atmosphärischen Felder unter der Bezeichnung *Satz potenzieller Prediktoren* oben rechts dargestellt.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse, einer statistischen Technik, werden für eine gewählte regionale Größe¹⁾ diejenigen großräumigen Felder identifiziert, mit denen eine bestmögliche Beschreibung der regionalen Information entsteht²⁾. Der Identifikationsvorgang heißt „Screening“ – schrittweise werden dabei die einzelnen (potenziellen Prediktoren-) Felder auf ihre Eignung zur Beschreibung der gewählten (Prediktanden)-Zeitreihe überprüft. Entscheidungskriterium ist dabei die Korrelation zwischen Prediktor-„Kandidat“ und Prediktand.

Das Screening-Verfahren ist so ausgelegt, dass es Kombinationen von *vier Prediktoren-Feldern* sucht, die den gewählten Prediktanden (z.B. die Zeitreihe der regionalen Maximumtemperaturwerte) optimal beschreiben. Um beim Beispiel des Prediktanden *Maximum-Temperatur* zu bleiben: Die bedeutendsten großräumigen Atmosphärenfelder zur Beschreibung dieses Prediktanden sind die relative Topografie 850/1000 hPa, ein Maß für den Wärminhalt der unteren Atmosphäre und die kurzweilige Einstrahlung, ein Maß für das Vorhandensein/Nichtvorhandensein von Wolken. Weitere vom Screening als relevant befundene Größen erhöhen die Güte der Beschreibung nur noch in geringem Maße.

Die Regression liefert nicht nur die Auswahl der vier relevantesten Prediktoren, um einen gewählten Prediktanden zu beschreiben, sie arbeitet auch heraus, in welchem Maße der Prediktand zur Rekonstruktion des Prediktanden beiträgt. Es entsteht eine Zeitreihe der Regressionskoeffizienten der Prediktoren ($R_1 \dots R_4$), die auf der linken Seite im mittleren Teil von Abb. 3.1 unter der Bezeichnung *Bestimmung der täglichen Regressionskoeffizienten* dargestellt ist. Aus der sich von Tag zu Tag ändernden Schar der Koeffizienten lässt sich also (in bestmöglicher Näherung) der Prediktand berechnen.

Anmerkung: Dieses Vorgehen, eine von Stationen am Boden gemessene

¹⁾In der Nomenklatur der Statistiker heißt eine solche Größe *Prediktand*, d.h. „die Vorherzusagende“.

²⁾In der Nomenklatur der Statistiker heißen solche Felder *Prediktoren*, d.h. „die zur Vorhersage benötigten Größen“.

Größe indirekt durch Information aus großräumigen Feldern zu berechnen, mag auf den ersten Blick umständlich oder gar unnötig wirken. In der Gegenwart ist ja sowohl die regionale als auch die großräumige Information vorhanden. Wichtig wird diese Strategie immer dann, wenn nur Atmosphäreninformation aber keine Bodendaten vorhanden sind. Ein Beispiel ist die Vorhersage des Wetters. Ein anderes, für das Vorhaben bedeutendes Beispiel ist das zukünftige Klima, für das wir per Rekombination von Regressionsgrößen und großräumigen, vom Modell simulierten Feldern, regionale Zeitreihen rekonstruieren können.

3.1.2 Teil 2 von KlaMuKo: Klassifikation

Es gibt zahlreiche Methoden der Klassifikation von atmosphärischen Mustern. Sie analysieren in aller Regel *Formeigenschaften* von atmosphärischen Feldern. Die Klassifikationen beschreibt dann beispielsweise unterschiedliche Anordnungen von Hochs und Tiefs – so wie es etwa bei den Großwetterlagen geschieht. KlaMuKo nimmt ebenfalls eine Klassifikation vor, jedoch unter Nutzung einer ganz anderen Größe. Dies ist Aufgabe des zweiten Teils des Verfahrens,

Wir rekapitulieren: Mit dem ersten Teil des KlaMuKo-Verfahrens wurde eine Zeitreihe von Regressionskoeffizienten ($R1 \dots R4$) erstellt. Diese sind von Tag zu Tag veränderlich und beschreiben die Zielgröße (Prediktanden), beispielsweise die Tagesmaximumtemperatur. Im Klassifikations-Teil des Verfahrens besteht die Aufgabe darin, *charakteristische Anordnungen dieser Koeffizienten* zu finden. Diese sollten einander möglichst unähnlich sein und quasi die „Pole“ des Systems darstellen. Die statische Technik, die hierzu verwendet wird ist die der Clusteranalyse³⁾. Diese möglichst unähnlichen Fälle stellen die so genannte *Startpartition* dar. Das im Vorhaben eingesetzte Verfahren bildet 10 Klassen. In Abb. 3.1 ist dies im unteren Teil, unterhalb der gestrichelten Linie dargestellt.

Der schematische Beispielfall in Abb. 3.1 zeigt für Klasse 1 eine Anordnung mit positivem Wert für $R2$ (rot), negativem Wert für $R4$ (grün) und Werten nahe 0 für $R1$ (blau) und $R3$ (gelb). Klasse 2 hat folgende Konfiguration: $R1$ positiv, $R2$ stark negativ, $R3$ nahe 0, $R4$ negativ. Klasse 3 hat diese Konfiguration: $R1$ und $R2$ stark positiv, $R3$ und $R4$ negativ. Und so weiter.

Nachdem die „Pole“, also die Startpartition der möglichst unähnlichen Konfigurationen von $R1 \dots R4$, gefunden wurden erfolgt im Anschluss die Zuordnung aller Tage zu ihrem *ähnlichsten* Mitglied der Startpartition. Dabei wird über ein so genanntes Abstandsmaß für jeden Tag festgestellt, welche der 10 Konfigurationen am passendsten ist. Ergebnis ist eine auf objektivem Weg ermittelte Häufigkeitsverteilung der Klassenmitgliedschaften.

Da die Startpartition aus extremen Konfigurationen der Regressionskoeffizienten besteht, werden mit KlaMuKo auch in einzelnen Klassen Tage zusammengefasst, die extreme Ausprägungen von Atmosphärenzuständen darstel-

³⁾In der Clustermethoden-Variante *k-means*.

len. Typischerweise besitzt etwa die Hälfte der 10 KlaMuKo-Klassen wenige Mitglieder. Diese Klassen sind zudem durch relativ hohe resp. niedrige Werte des Prediktanden charakterisiert („Kandidaten“ für Extreme). Die übrigen Klassen beinhalten deutlich mehr Fälle und beschreiben tendenziell die mittleren, nichtextremen Atmosphärenzustände. Voruntersuchungen in MBS2013 und die Ergebnisse der ersten Projektphase (SPEKAT et al., 2013b) zeigen dies anhand einer Vielzahl von meteorologischen Parametern und Extremindikatoren.

Im Rahmen des Vorhabens erfolgten weitere Entwicklungsarbeiten am KlaMuKo-Verfahren, die in den folgenden Abschnitten kurz umrissen werden.

3.2 Optimierungsschritte des KlaMuKo-Verfahrens

3.2.1 Erweiterung des Pools an potenziellen Prediktoren

KlaMuKo setzt in der ersten Ablaufphase eine Screening Regressionsanalyse ein – s. Abschnitt 3.1.1 und Abb. 3.1. Sie ermittelt eine Kombination von großräumigen Atmosphärenvariablen, den Prediktoren, die eine regionale Klimavariablen, den Prediktanden, optimal beschreibt. Grundlage ist ein umfangreicher Bestand an „Kandidaten-Variablen“ den so genannten potenziellen Prediktoren, aus denen eine kleine Zahl (Größenordnung: 4) an Prediktoren isoliert wird.

Bei Studien in der Vergangenheit⁴⁾ gab es einen Bestand von 60 potenziellen Prediktoren. Dieser beinhaltete eine Vielzahl dynamischer, thermischer, hydrometeorologischer und abgeleiteter Größen. Sie wurden in zwei Stufen in den beiden Phasen des Vorhabens erweitert⁵⁾. Wie der Zwischenbericht SPEKAT et al. (2013b) zur ersten Phase des Vorhabens dokumentiert, umfasst diese Liste nach einer ersten Erweiterung 99 potenzielle Prediktoren.

- Daten aus der 250 hPa-Fläche (Geopotenzial, Temperatur, Feuchte)
- Abgeleitete Größen unter Verwendung von Daten aus der 250 hPa-Fläche (z.B. relative Topografien, Vorticity, Advektion)
- Vertikale Temperaturdifferenzen – bisher war nur die Temperaturdifferenz 850/700 hPa im Pool der potenziellen Prediktoren enthalten, hinzugekommen sind 1000/850 hPa, 1000/700 hPa, 1000/500 hPa, 1000/250 hPa, 700/500 hPa, 500/250 hPa.

Die Erweiterung ist zum Ersten notwendig, um die Stabilitäts-/Labilitätsmaße der zweiten Erweiterung des Pools berechnen zu können und zum Zweiten

⁴⁾Sowohl mit dem KlaMuKo-Verfahren als auch mit der vielfach eingesetzten statistischen Regionalisierungsmethode WETTREG.

⁵⁾Die Prediktorenliste findet sich in Tab. B.1 im Anhang

hat das Geopotenzial in 250 hPa eine Bedeutung für die Beschreibung des Bodenwinds. Eine detaillierte Auswertung der Beziehungen zwischen den 99 potenziellen Prediktoren und den meteorologischen Parametern am Boden findet sich in [SPEKAT et al. \(2013b\)](#).

Dabei ist zu beachten, dass die Daten in der 250 hPa-Fläche erst ab 1979 vorliegen. Eine Zusatzuntersuchung ergab, dass eine Verkürzung des Zeitraums, aus dem die KlaMuKo-Klassen entwickelt werden, jedoch keine gravierenden Änderungen zur Folge hat (siehe dazu auch [SPEKAT et al., 2013b](#)).

Die zweiten Erweiterungsstufe vergrößert den Pool von potenziellen Prediktoren auf rund 130 Mitglieder. Im Wesentlichen besteht diese Erweiterung aus Indizes, die in der synoptischen Meteorologie zur Beschreibung von Stabilität und Labilität eingesetzt werden. Sie sind in Anhang [B.2](#) vorgestellt.

Zusammenfassende Erkenntnisse: Relevanz von Prediktoren

In Anhang [C](#) wird ausführlich vorgestellt, welche großräumigen Felder (Prediktoren) für die einzelnen regionalen Klimaparameter (Prediktanden) relevant sind. Es lässt sich Folgendes feststellen:

- Für jeden Prediktanden werden spezifische Prediktoren-Gruppen gefunden, mit denen eine bestmögliche Beschreibung erfolgt. Der Prediktand *Bewölkung* wird beispielsweise durch andere großräumige atmosphärische Größen gut beschrieben als der Prediktand *Wind*.
- Es gibt keinen „Allround-Prediktor“ der allen Prediktanden gerecht wird.
- Prediktoren aus den unteren Atmosphärenschichten haben im Schnitt eine höhere Relevanz als die untersuchten Prediktoren der Flächen 500 und 250 hPa.
- Es gibt Prediktoren, die in keinem untersuchten Kontext eine deutliche Verbesserung der Beschreibungsgüte erbringen; dazu gehören Advektion von Temperatur und Feuchte, isallobarischer Wind, thermischer Wind, 24-stündige Geopotenzialänderung oder Frontneigungswinkel.
- Durch die „erste Welle der Erweiterung“ des Pools an potenziellen Prediktoren (von 60 auf 99, s. Abschnitt [3.2.1](#)) konnten erste Qualitätssteigerungen für die Beschreibung von Klimagrößen mit Hilfe des KlaMuKo-Verfahrens erreicht werden. Insbesondere Gradienten, relative Topografien mit hoch gelegenen Geopotenzialflächen (in Einzelfällen) sowie die Pseudopotenzielle Temperatur und andere hinzu gekommene Feuchtefelder stellten einen ersten Fortschritt bei bestimmten Prediktanden dar.
- Durch die „zweite Welle der Erweiterung“ des Pools an potenziellen Prediktoren (von 99 auf 130, s. Abschnitt [B.2](#) und Abb. [C.1](#)) konnten

weitere Verbesserungen der Beschreibungsgüte von Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer und Bewölkung erreicht werden. Insbesondere die Beschreibung von Extremwetterindikatoren mit Bezug zu Gewittern, Schauern und Starkwind, bestimmt aus Synop-Daten, profitiert von dieser Poolerweiterung.

3.2.2 Methodische Verbesserungen: Summarischer Prediktor

Eine der Erfahrungen aus MBS2013 bezieht sich auf eine Informationsquelle mit hohem Nutzwert für die Regression: Es handelt sich um einen summarischen Prediktor, der die Eigenschaften mehrerer Prediktoren in sich vereint. Im Rahmen dieses Vorhabens erfolgten eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes. Im Prinzip geht es darum, objektiv eine Untermenge der Prediktoren zu ermitteln, die den neuen, optimierten Summenprediktor (OSP) bilden. Technisch handelt es sich dabei um ein „Screening im Screening“. Der Weg zum OSP verläuft wie folgt:

Schritt 1 Identifikation derjenigen großräumigen Variablen aus dem Bestand an potenziellen Prediktoren, die die höchste Korrelation mit der regionalen Klimavariablen (Prediktand) besitzt.

Schritt 2 Festhalten des ersten Prediktors und Suche nach einem weiteren Prediktor (aus dem Bestand an potenziellen Prediktoren), der in Kombination mit dem ersten eine weitere Erhöhung der Korrelation mit dem Prediktanden erbringt.

Schritt 3 Festhalten der bis dahin identifizierten Prediktoren und schrittweise Suche nach weiteren Prediktor analog zum Vorgehen in Schritt 2.

Schritt 4 Bis zu 5 Prediktoren werden so ermittelt.

Nach dieser algorithmisch-objektiven Bestimmung der Bestandteile des OSP wird für jeden Tag ein entsprechendes Feld des OSP aus den (bis zu 5) Komponenten bestimmt und steht dem Screening als potenzieller Prediktor zur Verfügung.

Dieser Schritt erweist sich als wichtig für die Klassifikation. Der OSP wird immer als wichtigster Prediktor gewählt – die weiteren Prediktoren, die im Screening in Kombination mit dem OSP bestimmt werden, erhöhen den Betrag des multiplen Korrelationskoeffizienten zusätzlich.

3.2.3 Methodische Verbesserungen: Verfahren zur Ermittlung der Startpartition für den Klassifikationsschritt von KlaMuKo

Wie bereits in MBS2013 hervorgehoben, ist die Bestimmung einer Startpartition, die zu einer Klassifikation mit möglichst extremen Klassen führen soll, ein Sonderfall des k-means-Clusterverfahrens. Der bei k-means vorgesehene Austauschschritt von Mitgliedern der Cluster entfällt bei KlaMuKo, da ein solcher

Schritt zur „Verwischung“ der Klassenzuordnung führt – dies ist zwar bei Betrachtungen des Klimamittelzustands erwünscht, reduziert aber bei Analysen von Extreme die „Zuspitzung“, d.h. das Auftreten von Klassen, in denen sich möglichst nur Extreme befinden.

3.2.3.1 Bisherige Ermittlung der Startpartition

In der bisherigen Form des Klassifikationsteils kam beim KlaMuKo-Verfahren eine Startpartition zum Einsatz, die sukzessive aus der Konfiguration der Regressionskoeffizienten einem zufällig gewählten Tag entwickelt wurde. Ziel war es, einen Satz von N (oftmals 10) möglichst zueinander unähnliche Fälle zu finden, die wiederum im Zuge der eigentlichen Klassifikation als Orientierung für die Zuordnung der übrigen Tage diente. Dabei entstand die Situation, dass die Startpartition zwar für direkt aufeinanderfolgend identifizierte Mitglieder über sehr unterschiedliche Tage verfügte, aber die Starttage der Klassen 1 – 3 – 5 – 7 etc. und die Starttage der Klassen 2 – 4 – 6 – 8 etc. einander relativ ähnlich waren.

Der Grund ist, dass ein auf maximale Unähnlichkeit abzielendes Verfahren bei sukzessiver Anwendung sehr wohl ein gut separiertes Paar an Klassen, z.B. 1 – 2 findet. Der zu 2 maximal unähnlichste Tag 3 ist aber mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder in der Nähe von 1 zu finden. In geometrischer Veranschaulichung: Es gibt eine Art „Ping-Pong-Effekt“ – wenn ich am Rande einer Punktwolke bin (extremer Fall), dann befindet sich der dazu am weitesten entfernte, unähnlichste Fall mit hoher Wahrscheinlichkeit am „gegenüber liegenden Ende“ der Wolke. Benutzte ich diesen Ort am gegenüber liegenden Ende als Ausgangspunkt für eine weitere Suche nach einem dazu möglichst unähnlichen Fall, so würde natürlich der erste Punkt wieder gefunden werden. Er ist ja in maximaler Distanz zum gefundenen zweiten Punkt. Der Ausgangspunkt muss bei der Suche nach einem dritten extremen Punkt also ausgeschlossen werden. Es ist nachvollziehbar, dass es dennoch bei den verbleibenden Punkten der Wolke relativ wahrscheinlich ist, einen neuen extremen Fall in der Nähe des ausgeschlossenen ersten zu finden. Das Beispiel gilt streng nur für den zweidimensionalen Fall, also einer flach in einer Ebene liegenden Punktwolke. Es zeigte sich aber, dass weitere Dimensionen der Wolke nur einen geringen Einfluss auf den geschilderten Effekt besitzen.

3.2.3.2 Neuentwicklung der Ermittlung der Startpartition

Als Alternative erfolgt die Suche nach der Startpartition in neuer Weise. Dazu werden die nachfolgend aufgelisteten Schritte durchlaufen:

Schritt 1 Jeder Tag wird als *tentativer* Starttag für die Suche nach einer Startpartition für N Klassen verwendet.

Schritt 2 Für jede tentative Startpartition erfolgt eine *tentative* Zuordnung der übrigen Tage. In die N Klassen werden dabei jeweils N_n Tage einsortiert.

Für sie werden außerdem die klassenspezifischen Mittelwerte des Prediktanden P , also die $\overline{x_{P_n}}$ ermittelt.

Schritt 3 Mit einem Distanzmaß DM wird ermittelt, inwiefern die tentative Zuordnung zu einer Konstellation führt, bei der die Klassen gut voneinander separiert sind. Dieses Maß berechnet sich als gewichtete Summe der Abweichungen der klassenspezifischen Mittelwerte vom Mittel des Prediktanden über alle Tage \bar{x} nach

$$DM = \sum_{n=1}^N [(\overline{x_{P_n}} - \bar{x})^2 \cdot N_n], \quad DM \rightarrow \max \quad (3.1)$$

Schritt 4 Es wird als Zusatzkriterium darauf geachtet, ob die tentative Zuordnung dazu führt, dass zu kleine Klassen entstehen, also beispielsweise mit 2 oder weniger Mitgliedern

Schritt 5 Gegebenenfalls wird die Zahl der Klassen N schrittweise verkleinert und der Datenbestand eines erneuten Durchlaufs der Schritte 1–4 unterzogen.

Die Folge ist, dass die Bewertung der Startpartition auf Grund von zahlreichen Durchläufen/Kandidaten geschieht und nicht in Form eines „Einzelschusses“. Das Ermittlungsverfahren ist ergebnisorientiert, denn es ist eine möglichst gute Separation der Klassen, die den Ausschlag gibt, welcher Kandidat tatsächlich Verwendung als Startpartition findet.

3.2.4 Die Problematik der Temperatur in der 1000 hPa-Fläche

Die Ausführungen dieses Abschnitts stellen einen Vorgriff auf den Ergebnisteil dar. Sie haben zudem einen direkten Bezug zur Vorstellung der potenziellen Prediktoren in Anhang B.

Bereits mit der Erweiterung des Pools der potenziellen Prediktoren auf 99 Mitglieder in der ersten Phase des Vorhabens wurden Geopotenzial (GP), Temperatur (T) und Feuchte (RF) in den Niveaus 1000, 850, 700, 500 und 250 hPa eingeführt. Zur Erinnerung: Zuvor, also im früher benutzten Bestand von 60 potenziellen Prediktoren, wurden GP1000, GP850, GP700, GP500, T850, T700, RF850 sowie RF700 verwendet.

Für die im Laufe des Vorhabens entwickelte Fassung von KlaMuKo wurde die Temperatur in der 1000 hPa-Fläche nicht als potenzieller Prediktor angeboten, wiewohl T1000 mit etlichen Bodentemperaturgrößen eine sehr hohe Korrelation aufweist (s. Abschnitt 3.3) und demzufolge häufig unter den vom Screening selektierten Prediktoren zu finden war. Dies ist jedoch ein *scheinbarer* Erfolg, denn in einem solchen Fall entspricht der Prediktor (T1000) dem *Prediktanden* (d.h., der Temperatur am Boden, an den Klimastationen gemessen) in hohem Maße direkt. Hohe Korrelationen der Bodentemperatur mit anderen

Größen, wie z.B. der relativen Topografie andererseits genügen der statistischen Unabhängigkeitsannahme schon eher und sind daher für die Einbeziehung in eine Regressionsrechnung geeignet.

Eine weiterer Überlegung untermauert diese Betrachtung: Wegen einer Vielzahl von Faktoren, u.A. der Herausforderung, Bodenfeuchte in einem GCM realistisch wiederzugeben, ist die Temperatur-Modellierung des GCM in der untersten Atmosphäre weniger belastbar als diejenige für mittlere und höhere Luftschichten. Dies ist relevant für einige Aussagen zu zukünftigen Extremen. Dem Wiedererkennungsverfahren der KlaMuKo-Klassen, wie sie sich aus einer GCM-Klimaprojektion bestimmen lassen, würde mit dem „Angebot“ von T1000 eine (vermeidbare) Unsicherheit auf dem Weg gegeben.

Daher wurde T1000 aus dem Pool der potenziellen Prediktoren entfernt; für die Berechnung einiger Labilitätsindizes ist diese Größe aber eingesetzt worden.

3.3 Ergebnisse mit KlaMuKo – Analyse des Gegenwartsklimas

In der zweiten Projektphase wurde das aktualisierte und verbesserte KlaMuKo-Verfahren mit dem auf 130 Mitglieder erweiterten Pool⁶⁾ an potenziellen Prediktoren zur Beschreibung von regionalen Extremen in Hessen eingesetzt. Auf den Folgeseiten wird gezeigt, wie sich diese Erweiterung auswirkt und welche Leistung des Verfahrens sich nunmehr bei verschiedenen Klimagrößen und -indikatoren sowie Zeitreihen von SYNOP-basierten Gewitter-, Schauer- und Starkwindtagen zeigt.

Es sei zunächst auf zwei Veränderungen gegenüber älteren Studien hingewiesen:

- Es werden für diese Vorhaben so genannte NCAR2-Analysen verwendet. Dies ist zum Einen erforderlich, um die Erweiterung des Umfangs an genutzten Geopotenzialflächen (z.B. Berechnung von Stabilitätsmaßen) durchzuführen. Zum Zweiten besteht dadurch der Vorteil eines aktuellen, auf höherer räumlicher Auflösung begründeten Basismaterials. Diese beginnen jedoch erst im Jahr 1979, so dass der „Lernzeitraum“ für KlaMuKo etwas verkürzt ist.
- Bei Untersuchungen im Zusammenhang mit *Windextremen aus SYNOP-Information* ist zu beachten, dass diese in hinreichender räumlicher und zeitlicher Dichte bei den entsprechenden Stationen erst ab 1991 vorliegen. Einige wenige spezielle KlaMuKo-Untersuchungen müssen daher auf einer weiter verkürzten Informationsbasis erfolgen.

Eine ausführliche Darstellung, welche Prediktorenfelder hohe, mittlere und niedrige Relevanz für die Beschreibung von regionalen Klimavariablen besitzen findet sich in Anhang C.8 (dort Abb. C.1). Die Relevanz wird beurteilt,

⁶⁾Eine Einschränkung, die Temperatur im 1000 hPa-Niveau betreffend, wurde in Abschnitt 3.2.4 geschildert.

indem eine Analyse der Ergebnisse einer Korrelationsuntersuchung erfolgt (s. Abschnitt C.1). Als relevant werden diejenigen Prediktoren eingestuft, die in der Rangfolge häufig Plätze unter den ersten ~ 15 belegen. Wichtige Resultate mit Bezug zu Extremen sind in den nachstehenden Unterabschnitten zusammengefasst.

Nutzung von täglichen Daten an Klimastationen

3.3.1 Maximumtemperatur

Relevante, großräumig im Klimamodell verfügbare Prediktoren zur Beschreibung der regionalen Temperatur am Boden sind die **relative Topografie**, die **Temperatur in verschiedenen Höhen**, sowie einige mit der Feuchte verbundene Größen wie die **absolute Luftfeuchtigkeit**, die **pseudopotenziellen Temperatur**. Hinzu kommen einige **Labilitätsgrößen**, die mit der Temperatur oder dem Dampfdruck im Kondensationsniveau zusammenhängen und der **CAPE-Index**.

Es ist bemerkenswert, dass der Winter sich bezüglich der gefundenen relevanten Prediktoren von den übrigen Jahreszeiten unterscheidet. Im Winter sind Größen, die eine Kopplung zu atmosphärischer Bewegung besitzen (Vorticity, Geopotenzialdifferenzen, Divergenz, Windrichtung) von großer Bedeutung.

Eine Beurteilungsgröße für die Güte des Zusammenhangs zwischen den o.g. Prediktoren und der regionalen Temperatur ist die multiple Korrelation. Mit ihr kann auch beurteilt werden, welche Belastbarkeit abgeleitete Aussagen besitzen. Für die Jahreszeiten Frühjahr, Sommer und Herbst liegt diese Korrelation bei rund 0,95 und im Winter bei rund 0,8.

3.3.2 Mittlerer Niederschlag

Für die Beschreibung des regionalen Niederschlags sind folgende großräumig im Klimamodell verfügbare Prediktoren relevant: **Geopotenzial in 1000 hPa⁷⁾**, **Enke-Labilitätsindex mit Feuchte** und **relative Feuchte in 700 hPa⁸⁾**.

Die Beschreibung des regionalen Niederschlags stützt sich, wie die Ranguntersuchungen in Anhang C zeigen, auch auf andere Größen. So besteht ein Zusammenhang mit Strömungsgrößen wie **Vorticity** und **Divergenz**. Außerdem haben Prozesse der Wolkenbildung einen Einfluss, die wiederum mit Einstrahlungsgrößen verbunden sind. Insbesondere im Sommer sind zudem einige der im Rahmen des Vorhabens erstellten **Labilitäts-Indikatoren**, wie etwa

⁷⁾Im Winter ist auch das Geopotenzial der Flächen 850 und 700 hPa relevant. Bei hohem Geopotenzial werden Niederschlagsprozesse gedämpft oder unterbunden und bei niedrigem Geopotenzial tritt häufig Niederschlag auf.

⁸⁾Diese beiden Größen stehen in Verbindung mit Vertikalbewegungen. Sind diese Bewegungen stark und aufwärts gerichtet, so ist ein relativ hoher Vorrat an verfügbarem Wasser und hohe Niederschlagsintensität die Folge.

Kondensationsniveau-Größen oder Gewitterindizes von Bedeutung.

Für die Bewertung der Güte des Zusammenhangs zwischen den oben aufgeführten Prediktoren und dem regionalen Niederschlag ist die *multiple Korrelation* eine bedeutende Größe. Sie liegt im Bereich von 0,5 bis 0,7.

3.3.3 Starkniederschlag

Es erfolgten Untersuchungen mit verschiedenen Intensitätsstufen: Als Starkniederschlag wurde eingestuft, wenn an einer Station mehr als 10 mm (im Sommer zwischen 1979 und 2011 706-mal aufgetreten) bzw. 20 mm (339-mal aufgetreten) bzw. 30 mm (150-mal aufgetreten) Niederschlag pro Tag auftreten. Es wird also eine andere Art von Zeitreihe als bei den Untersuchungen in Abschnitt 3.3.4 analysiert, denn sie besteht nicht mehr aus Niederschlagshöhen sondern aus Angaben zum Eintreffen/Nichteintreffen des Starkniederschlagsereignisses. Die dabei zu beachtenden Varianten werden auf S. 9f vorgestellt.

Bezüglich der relevanten Prediktoren ist anzumerken, dass es saisonale Unterschiede gibt: Während es im *Frühjahr* für Starkniederschläge über 10 mm

- Approximierte kurzweilige Einstrahlung mit der relativen Feuchte zwischen 1000 und 700 hPa
- horizontale Differenzen im Geopotenzialfeld 1000 hPa
- Temperatur in 500 hPa
- Betrag des Gradienten in 1000 hPa

sind, wurde für Sommer und Herbst

- Labilitäts-Index nach Enke mit Feuchte
- Betrag des Gradienten in 850 hPa (Herbst) bzw. 250 hPa (Sommer)
- Temperaturadvektion in 850 hPa (Herbst)
- Vorticity in 850 hPa
- Horizontale Differenzen in 700 hPa (Herbst)

ermittelt. Dem gegenüber fand das Screening für den Winter diese Prediktoren als besonders relevant

- Geopotenzial in 1000 und 250 hPa
- Vorticity in 1000 hPa
- Horizontale Differenzen in 250 hPa.

Dabei soll das Hauptaugenmerk nicht so sehr auf die konkret gewählten Prediktoren gelenkt werden – bei diesen gibt es kleine Veränderungen, wenn der Prediktand nicht der Stationsanteil, an dem Starkniederschlag auftrat ist (vgl. S. 9f) sondern beispielsweise die einfache Binarisierung. Vielmehr ist beachtenswert, dass atmosphärische Eigenschaften die mit Wolkenbildungsprozessen, Labilität und Temperatur zusammenhängen, die Verhältnisse im Frühjahr, Sommer und Herbst charakterisieren. Im Winter wird hingegen die meiste Information für das Auftreten von Starkregen über 10 mm aus dynamischen Größen bezogen, während die Feuchte oder die Temperatur eine untergeordnete Rolle übernehmen.

Im Rahmen einer Zusatzuntersuchung wurden für den Sommer auch Intensitätsstufe von 20 oder 30 mm/Tag analysiert. Dabei ist festzustellen, dass der Labilitätsindex nach Enke mit Feuchte für jede der Stufen die höchste Relevanz besitzt. Mit zunehmender Intensitätsstufe werden als beitragende Größen vermehrt Advektion und horizontale Divergenzen/Konvergenzen einbezogen. Ein Hinweis auf eine sich ändernde Kausalität bei den niederschlagserzeugenden atmosphärischen Prozessen in verschiedenen Intensitätsstufen.

Wichtig ist zudem für die Bewertung der Güte des Zusammenhangs zwischen den Prediktoren und dem Starkniederschlag, dass die multiple Korrelation geringer wird, je höher die betrachtete Intensitätsstufe des Starkniederschlags ist. Sie nimmt von rund 0,5 bei einer Schwelle von 10 mm/Tag auf 0,3 bei einer Schwelle von 30 mm/Tag ab. Das bedeutet, je intensiver/extremer ein regionales Niederschlagsereignis ist, desto schwieriger sind die damit verbundenen großräumigen Atmosphärenverhältnisse zu beschreiben.

3.3.4 Wind und Starkwind

Relevante Prediktoren zur Beschreibung des regionalen Winds sowie der Starkwindereignisse (täglicher Mittelwind von mehr als 8 m/s) sind die **Geopotenzial-Gradienten der Flächen 1000, 850, 700 und 500 hPa** sowie weitere dynamische Größen wie **Geopotenzial** oder **Divergenzen** oder **Vorticity**.

Labilitätsmaße, werden als Resultat des Screening hingegen nicht als relevante Beschreibungsgrößen erachtet. Dies war im Vorherein nicht absehbar, denn es bestand die Erwartung, Labilitätsmaße stünden auch mit Starkwind bei konvektiven Ereignissen in Verbindung. Es scheint aber durch das Screening deutlicher der Zusammenhang zwischen großräumigen, von *dynamischen* Einflüssen dominierten Windereignissen (z.B. Sturmfelder einer starken Zyklone) und dem regionalen Wind herausgearbeitet zu werden.

Zur Beurteilung der Stärke des Zusammenhangs zwischen großräumigen Prediktoren und dem regionalen Wind wird der multiple Korrelationskoeffizient eingesetzt. Wären die physikalischen Bedingungen einzig ausschlaggebend, so könnten Koeffizienten nahe 1 erwartet werden. Aber aus den Analysen bestimmt sich der multiple Korrelationskoeffizient zu rund 0,6. Er liegt deutlich darüber und erreicht rund 0,8 wenn die analysierte Zeitreihe Überschreitungen der Schwelle vom 8 m/s markiert.

Nutzung von stündlichen Daten an SYNOP-Stationen

3.3.5 Gewitter

Für diese und die nachfolgenden Analysen werden modifizierte Zeitreihen der Prediktanden (Gewitter, Schauer, Starkwind) verwendet. Die Kriterien, nach denen Tage als Schauer-, Gewitter- oder Starkwindtage eingestuft werden, finden sich in Anhang A. Ein Beispiel für die damit gebildeten Zeitreihen findet sich in Abschnitt 2.2 (s. dort Abb. 2.2).

Dieser Abschnitt fasst Ergebnisse zusammen, die ausführlich in Anhang C.9 beschrieben sind. Werden mit dem Screening-Verfahren Zeitreihen des Gewitter-Auftretens untersucht, so zeigt sich die besondere Bedeutung der thermodynamischen Prediktoren, darunter viele, die in der zweiten Vorhabensphase neu hinzugekommenen sind. Insbesondere sind hier die **Labilitäts-Indizes TT, KI, BI und CAPE** zu nennen. Aber auch einige für das Kondensationsniveau relevante Größen haben deutlichen Einfluss. Des Weiteren ist der „klassische“ **Showalter-Index** für die Beschreibung von Gewittersituationen bedeutungsvoll, in geringerem Maß der Enke-Index (sowohl mit als auch ohne Feuchte). Andere, synoptisch mit Gewittern verbundene Prediktoren sind die **vertikale Temperaturdifferenz**, ein Hauptverursacher von Labilität, sowie der **thermische Wind**, per Windscherung mit starker Konvektion verbunden. Eine ebenfalls erkennbare Assoziation findet sich zudem mit der **Temperatur der unteren Troposphäre**. Diese ist bedeutungsvoll für die bodennahe Überhitzung, von der Labilität und Gewitter ausgelöst werden.

Repräsentativität ist ein wichtiger Faktor bei der Beschreibung von Gewittern und deren Assoziation mit großräumigen atmosphärischen Feldern. Als Test für die Güte der Beschreibung von Gewittern mit den von KlaMuKo identifizierten Prediktoren wird der multiple Regressionskoeffizient verwendet. Dieser erreicht für Analysen der Sommermonate Werte um 0,6 – was eine beachtliche hohe Korrelation für eine so komplexe Größe ist. Wird eine Repräsentativität (vgl. Abschnitt 2.2) von 30% (d.h. an mindestens rund einem Drittel der Stationen wurden an einem Tag Gewitter registriert), so geht die Korrelation unter 0,6 zurück – bei einer Repräsentativität von 70% liegt sie deutlich unter 0,5.

3.3.6 Schauer

Es könnte vermutet werden, dass starke genealogische Zusammenhänge zwischen Schauern und Gewittern bestehen. Das Gewitter quasi als extreme Ausprägung des Schauers. Die vom Screening gefundenen relevanten Prediktoren bestätigen das jedoch nicht. Schauer sind nur in sehr geringem Umfang mit den Labilitätsmaßen verbunden. Von größerer Bedeutung sind hingegen großräumige Einflüsse des **Geopotenzials**, der **Feuchte** und der **Strahlung**. Gewitter hingegen haben nur geringe Assoziation mit großräumigen Geopotenzialfeldern. Dies ist synoptisch sinnvoll, denn die Gewitter auslösenden Prozesse sind vielfach kleinräumiger, d.h. auf der regionalen Skala – beispielsweise star-

ke Überhitzung der untersten Luftschicht oder eine deutliche Kopplung an die Orografie.

Auch ergeben sich zwischen dem Auftreten von Schauern und den vom Screening identifizierten Prediktoren relativ hohe multiple Korrelationen. Sie liegen in einer Größenordnung um 0,8 (!) wenn Zeitreihen der Flächenwahrscheinlichkeit (vgl. Abschnitt 2.2) betrachtet werden. Einen sehr deutlich erfolgsmindernden Einfluss hat es, *Repräsentativitätsstufen* zu analysieren. Zur Erinnerung: Bei dieser Aufbereitungsart wird die Kennung „1“ gesetzt wenn beispielsweise an 30% der Stationen Schauer auftreten; sind es weniger, so wird die Kennung „0“ gesetzt. Alternativ können auch andere Anteile. z.B. 70% benutzt werden. Die multiplen Korrelationen liegen bei den so aufbereiteten Daten um 0,5.

3.3.7 Starkwind

Zur Erinnerung: Starkwind ist einerseits aus den Daten von *Klimamessreihen* bestimmbar – dort wird das Tagesmittel analysiert und eine Schwelle von 8 m/s verwendet (vgl. Abschnitt 3.3.4). Andererseits besteht die Möglichkeit, stündliche SYNOP-Meldungen zur Identifikation von Starkwindtagen zu verwenden. Dort wird für 10-Minuten-Mittelwerte des Windes oder Spitzenböen ein Schwellwert von 13 m/s zur Starkwindidentifikation angesetzt (vgl. Anhang A.4). Wegen des kürzeren Zeitraums, zu dem diese Meldungen die entsprechende Information beinhalten, sind aber Einschränkungen der Belastbarkeit in Kauf zu nehmen.

Die bedeutsamen Prediktoren sind einander jedoch recht ähnlich, gleich, ob Klima- oder SYNOP-Daten analysiert werden: **Geopotenzial** und **Gradienten der Geopotenzialfelder** haben die größte Relevanz für das Überschreiten von Starkwindsschwellen. Damit können multiple Korrelationen bis zu 0,6 erreicht werden – deutlich weniger als bei der Beschreibung des Zusammenhangs von großräumiger Zirkulation und Schauern.

4 Zukünftiges Auftreten von Klimaextremen

4.1 Prinzip der Untersuchung

Mit den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Ergebnissen wurde für das Klima der Gegenwart ein Grundstock an Information vorgestellt. Für verschiedene regionale Klimavariablen und Extremindikatoren nebst deren Zusammenhängen mit großräumigen Größen der freien Atmosphäre erfolgten Analysen mit dem KlaMuKo-Verfahren. In diesem Abschnitt sollen nun Zukunftsentwicklungen von Extremen vorgestellt werden.

Dazu wird nach folgendem Prinzip vorgegangen – Die Schritte 1. bis 4. wurden im Rahmen der Beschreibung des KlaMuKo-Verfahrens für das Klima der Gegenwart vorgestellt. Die Schritte 5.–8. stellen die Analyse von Klimamodell-Daten vor:

- 1. Herkunft der Prediktoren** Als Voraussetzung liegt das Ergebnis einer Screening-Analyse vor. Diese betrachtet (Messungen-basierte) Reanalysen des Gegenwartsklimas und wählt aus 130 potenziellen Prediktoren die relevantesten 4 aus. Das bedeutet, es liegt die optimale Kombination von großräumigen Atmosphärengrößen, mit deren Hilfe eine Variable oder ein Extremindikator umschrieben werden kann.
- 2. Prediktoren, Gegenwart** An jedem Tag des gegenwärtigen Klimazeitraums erfolgt die Bestimmung der Beträge der vom Screening ermittelten Prediktoren. Beispiel: Für die Maximumtemperatur seien die vier Prediktoren Relative Topografie, Temperatur in 850 hPa, Vorticity und absolute Feuchte in 700 hPa bestimmt worden.
- 3. Klassifikation der Prediktoren** Im Zuge der KlaMuKo-Klassifikation werden die zehn maximal unterschiedlichen Konfigurationen der ausgewählten Prediktoren bestimmt. Beispiel: Die Konfiguration der Klasse 1 mag einen hohen Wert für den ersten Prediktor, keinen Beitrag des zweiten Prediktors und negative Werte für die Prediktoren 3 und 4 vorsehen; die Konfiguration der Klasse 2 mag einen negativen Wert für den ersten Prediktor, einen positiven Wert für den zweiten Prediktor, keinen Beitrag des dritten und einen negativen Wert für den vierten Prediktor vorsehen, etc.
- 4. Häufigkeit der Klassen, Gegenwart** Jeder Tag wird mit Hilfe eines Ähnlichkeitsmaßes derjenigen Klasse zugeordnet, zu deren Konfiguration seine

eigene am stimmigsten ist. Für jedes Jahrzehnt dieses Zeitraums entsteht eine Häufigkeitsverteilung der Klassenmitgliedschaften – unter Verwendung von Klimadaten (Reanalysen).

- 5. Extraktion der Prediktoren, Klimamodell** In diesem Schritt werden die Klimasimulationsdaten eines GCM (hier beispielsweise: MPI ESM LR, Lauf 1, angetrieben mit Szenario RCP8.5) betrachtet. Für jeden Tag der Simulation (so genannte 20C-Daten für den Zeitraum bis 2005 und Projektionsdaten für den Zeitraum 2006–2100) werden die Werte der vier ausgewählten Prediktoren ausgelesen.
- 6. Häufigkeit der Klassen, Klimamodell** Für jeden Tag der Modell-Simulation wird mit Hilfe eines Ähnlichkeitsmaßes festgelegt, zu welcher der zehn Klassen seine Konfiguration der vier Prediktoren am stimmigsten ist. Für jedes Jahrzehnt des simulierten Zeitraums 1951–2100 entsteht daraus eine Häufigkeitsverteilung der Klassenmitgliedschaften – unter Verwendung von Modell-Simulationsdaten (20C bzw. Zukunftsprojektion).
- 7. Bestimmung der relativen Häufigkeiten der Klassen** Aus den absoluten Besetzungszahlen der Klassen erfolgt die Umrechnung in relative Besetzungen. Dabei wird für jede Dekade und jede Klasse der Anteil der Tage dieser Klasse an der Gesamtheit aller Tage dieser Dekade bestimmt.
- 8. Trendberechnung für jede Klasse** Aus den prozentualen Angaben werden Trends bestimmt, um das Zu- bzw. Abnahmeverhalten der einzelnen Klassen zu quantifizieren.

4.2 Zur Reproduzierbarkeit von atmosphärischen Größen in einem Klimamodell

Per Screening werden die zur Umschreibung der regionalen Klimagröße (z.B. Maximumtemperatur oder Starkwind) relevanten Größen aus einem Pool von potenziellen Prediktoren ermittelt. Die im Zuge des Vorhabens auf 130 angewachsenen Mitgliedschaft des Pools wird aus Reanalysedaten, also einer „dreidimensionalen Klimatologie“ der Atmosphäre, basierend auf Messdaten, bestimmt. Es werden drei Grundgrößen verwendet: Geopotenzial, Temperatur und relative Feuchte. Für die Betrachtung des zukünftigen Zustands des Klimasystems sind Projektionen mit einem Klimamodell erforderlich. Zudem ist es angezeigt, zu vergleichen, inwieweit das Klimamodell das Messungen-basierte Gegenwartsklima reproduziert.

In Anhang D wird dieser Sachverhalt anhand von Beispielen mit dem MPI-ESM-Modell analysiert und diskutiert. Prediktoren, die auf dem Geopotenzial oder der Temperatur beruhen, sind relativ unkritisch. Es ist aber auf Grund dieser Analysen zu folgern, dass insbesondere bezüglich der Feuchtegrößen –

und dort speziell im Wertebereich über 90% relative Feuchte – die Realität vom Modell abweichend widergespiegelt wird.

Für die KlaMuKo-Beschreibungen der meisten regionalen Klimagrößen bilden atmosphärische Feuchtegrößen nur einen Teil der „Bausteine“, so dass die Belastbarkeit von Zukunftsaussagen dennoch relativ hoch ist. Im einem Fall (Gewitter-Index aus SYNOP-Daten) sei aber auf eine reduzierte Belastbarkeit hingewiesen, da sich hier die Analyse vermehrt auf Feuchte-basierte Information stützt.

4.3 Zum Einsatz von KlaMuKo im Zusammenhang mit Trendbestimmungen

Das KlaMuKo-Verfahren besitzt die Fähigkeit, extreme Zustandsformen der Atmosphäre zu erkennen und in ein Klassifikationssystem zu überführen. Es entstehen mehrere Klassen, die unter Nutzung von großräumiger Atmosphäreninformation regionale Extreme einer Zielgröße versammeln. Dabei wird (vgl. Abschnitt 3.2.3) in Kauf genommen, dass die Trennschärfe der Klassifikation im Bereich der nicht-extremen, mittleren Werte geringer ist. Diese sollen ja auch nicht zentraler Gegenstand der Analysen sein.

Wichtig: Bei den nachstehenden Betrachtungen ist immer zu beachten, dass die „interessante“ Klassen diejenigen sind, in denen tatsächlich Extreme enthalten sind und dass der Fokus auf möglichen zeitlichen Trends im Auftreten dieser Klassen liegt. Es kommt vor, dass sich unter den von KlaMuKo gefundenen Klassen für einige Zielgrößen keine Klasse finden lässt, die sowohl Extreme zusammenfasst als auch über einen deutlichen Trend verfügt. Zur Problematik der Ableitung von Trends für Extreme sei auf die Ausführung in Anhang E verwiesen. Dort wird anhand von fünf für die Reproduktion von Temperatur, Starkniederschlag oder Gewitter relevanten Größen dargestellt, dass die Simulationen eines Klimamodells nicht in allen Fällen Trends zeitigen.

Auf welche Klassen ist das Augenmerk zu richten, um die KlaMuKo-Klassifikationsergebnisse zu bewerten? Grundüberlegung dazu ist, dass drei Umstände eintreten müssen, damit eine Klasse K als „interessant“ (Kandidat für eine Extremklasse) eingestuft wird:

- K verfügt über einen hohen *Betrag*
- K verfügt über einen erkennbaren *Trend*
- K verfügt über *relativ viele Mitglieder*, gehört jedoch nicht zu denjenigen Klassen, die tendenziell den mittleren klimatischen Zustand beschreiben.

In Abschnitt 4.4 wird auf die Frage eingegangen, ob es für die o.g. Bewertungskriterien möglich ist, eindeutige Kriterien zu formulieren. Es werden Beispiele dafür gezeigt, welche Sensitivitäten bei der Identifikation von Extremklassen bestehen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Wiedererkennung von KlaMuKo-Klassen in Klimamodell-Läufen gezeigt. Zeitliche Entwicklungen werden in Form von Trenddiagrammen und Tabellen dargestellt. In Abschnitt 4.5 wird ausführlich und exemplarisch anhand der Trends der KlaMuKo-Klassen für den Prediktanden Maximumtemperatur die Strategie und Methodik der Auswertung vorgestellt, inklusive eines Rechenbeispiels, das verdeutlicht, wie die Trends ermittelt werden.

In einem zweiten Beispiel (Abschnitt 4.6) wird eine ähnliche Analyse, jedoch für einen Extrem-Indikator mit Bezug zu Starkniederschlag durchgeführt: Die Zahl der Tage, an denen mehr als 10mm Niederschlag fielen.

Nach diesen beiden Beispielen gibt es in Abschnitt 4.7 Betrachtungen zu den Zukunftsentwicklungen von weiteren Indikatoren. Es handelt sich dabei um Abschätzungen von Veränderungen bei Starkwind, -niederschlag und Gewittern.

4.4 Sensitivität der Identifikation von Extremklassen

In diesem Abschnitt wird ein Regelwerk zur Einschätzung, welche KlaMuKo-Klassen als extrem gelten können, formuliert. Mit verschiedenen Einstellungen der Parameter dieses Regelwerks erfolgt eine kleine Sensitivitätsstudie. Wie in den Kriterien zur Beurteilung auf S. 29 skizziert gibt es Anforderungen bezüglich (i) des Mittelwertes des in einer Klasse K zusammengefassten Prediktanden, (ii) des Trends, den der Prediktand in der Klasse K aufweist und (iii) der Größe der Klasse K ; Letzteres ist deswegen Teil der Kriterien, da eine zu große Klasse eher den Mittelwert und nicht die Extreme eines Prediktanden repräsentiert.

4.4.1 Mittelwert-Kriterium

Es wird ein Perzentil P_{MW} aus der Menge der Klassenmittel gesucht. Würde die zu untersuchende Menge nicht die Mittelwerte der KlaMuKo-Klassen umfassen sondern würde diese aus den Ganzzahlen aus dem Intervall $[1..11]$ bestehen, bei der Konvention 1=niedrigster Wert und 11=höchster Wert, so gälte: Das Perzentil 0 identifiziert den niedrigsten Rangplatz (1) und gibt den Wert, der diesem Rangplatz entspricht, aus – hier das Minimum des Intervalls. Ist $P_{MW} = 90$ vorgegeben (das 90-Perzentil) so würde der zweithöchste Rangplatz (10) identifiziert und der zugehörige Wert ausgegeben. Die gefundenen Rangplätze müssen nicht ganzzahlig sein. Das Perzentil $P_{MW} = 75$ identifiziert den Rangplatz 8,5 – d.h. es würde für die Ausgabe des zugehörigen Wertes zwischen denjenigen

an der 8. und der 9. Stelle interpoliert. Das 100-Perzentil ist das Maximum der untersuchten Werte.

Es sei hier noch die ein- bzw. zweiseitige Fragestellung eingegangen.

- Zweiseitige Fragestellung: Bei einigen untersuchten Klimagrößen ist es relevant, festzustellen, ob die KlaMuKo-Klassen extrem hohe *oder* extrem niedrige Werte identifizieren. Dazu gehören beispielsweise die Temperatur oder die Windgeschwindigkeit.
- Einseitige Fragestellung: Bei einigen der untersuchten Größen ist es lediglich relevant, festzustellen, ob mit KlaMuKo besonders hohe Werte identifiziert werden. Dazu gehören beispielsweise der Niederschlag¹⁾, alle binarisierten Größen wie Schwellwertüberschreitungen die entweder den Wert 1 (Kriterium erfüllt) oder 0 (Kriterium nicht erfüllt) beinhalten sowie Klassen, die einen Stationsanteil beschreiben²⁾

4.4.2 Trend-Kriterium

Es wird eine Schwelle Tr_{krit} gewählt. Ist der Trend positiv so muss er oberhalb von Tr_{krit} liegen. Ist der Trend negativ so muss er unterhalb von $-Tr_{krit}$ liegen. Ein geeigneter Wert für eine solche Schwelle ist z.B. 2,0 – alle Trends, die zwischen $-1,9$ und $1,9$ würden damit als zu gering aussortiert.

4.4.3 Kritische Anzahl der Werte in einer Klasse

Es wird eine Höchstzahl N_{krit} bestimmt, die sich aus einem vorgegebenen Faktor f_N , multipliziert mit der Gesamtzahl der untersuchten Werte berechnet. Ist z.B. $f_N = 0,2$ so werden Klassen herausgefiltert, die weniger als 20% aller Werte enthalten.

4.4.4 Anwendung der Kriterien

Eine Klasse wird als Extremklasse gewertet, wenn sie alle drei Kriterien erfüllt. In Abb. 4.1 ist für rund 40 verschiedene Prediktanden, die mit KlaMuKo analysiert wurden, deren Potenzial für Extremklassen veranschaulicht. Dabei ist es für diese Untersuchung nicht von primärer Bedeutung, um welche Prediktanden es sich konkret handelt. Es geht lediglich um die Veranschaulichung der Sensitivität.

¹⁾Im Rahmen der Untersuchungen liegt der Fokus auf Extremniederschlag, also auf Klassen mit besonders viel Niederschlag. Es ist hingegen nicht von Interesse, besonders *niederschlagsarme* Klassen gesondert zu betrachten.

²⁾Diese Größen verfügen zwar über einen quasi-kontinuierlichen Wertebereich zwischen 0 (an keiner Station aufgetreten) und 1 (an allen Stationen aufgetreten), aber im Rahmen dieser Untersuchungen von Extremzuständen ist lediglich das Auftreten an möglichst vielen Stationen relevant.

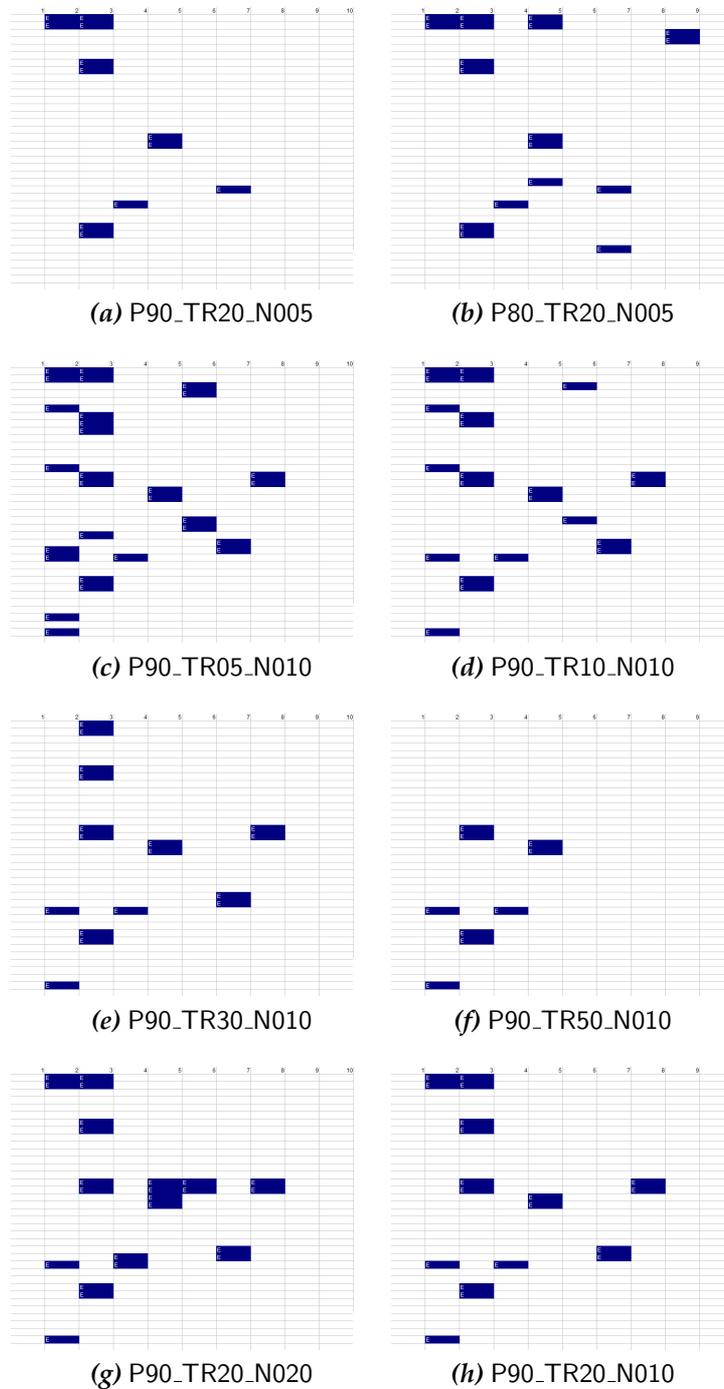


Abbildung 4.1: Sensitivität der Identifikation von potenziellen Extremklassen in Abhängigkeit von der Wahl der Kriterien für Mittelwert, Trend und Klassenbesetzung.

Zur Erläuterung: Eine Zeile beinhaltet für die 10 Klassen, in die KlaMuKo einen Prediktanden einteilt, 10 Zellen. Sind diese blau eingefärbt, so wurde mit Hilfe der Kriterien eine Extremklasse identifiziert. Die Unterschriften der Teilfiguren zeigt die verwendeten Einstellungen der Kriterien an. P90 bedeutet Perzentil 90, P80 bedeutet Perzentil 80. TR20 bedeutet, dass für den Zeitraum 1951–2100 ein Trend von mindesten $\pm 2,0$ vorliegen muss; TR05, TR10, TR30 und TR50 beziehen sich auf Trends von $\pm 0,5$, $\pm 1,0$, $\pm 3,0$ bzw. $\pm 5,0$. N005 steht für eine Klassengrößen-Beschränkung auf 5% aller Werte. N010 und N020 stehen für Beschränkungen auf 10 bzw. 20% aller Werte.

Perzentilstufen: Es zeigt sich, dass bezüglich der nicht sonderlich extremen Perzentilstufen P90 und P80 *keine starke Empfindlichkeit* bei der Zahl identifizierter Extremklassen besteht [Abb. 4.1 (a) und (b)]. Zusätzliche Untersuchungen (hier nicht abgebildet) weisen darauf hin, dass auch bei schärferer Kriteriensetzung (P95 oder P99), nur geringe Änderungen in der Zahl der identifizierten Extremklassen zu verzeichnen sind.

Trendstärke: Die Abhängigkeit von der Trendstärke ist schon deutlicher als diejenige von den Perzentilstufen. Das zeigt sich insbesondere bei den Forderungen nach relativ ausgeprägten Trends, wie es für TR30 ($\pm 3,0$) bzw. TR50 ($\pm 5,0$) in den Teilfiguren (e) und (f) von Abb. 4.1 erkennbar ist.

Anzahl der Werte in den Klassen: Von diesem Kriterium ist die Zahl der identifizierte Extremklassen ebenfalls nicht sehr stark abhängig. Für Werte des Faktors f_N von 0,2 bzw. 0,1³⁾ wird eine relativ hohe Zahl von Extremklassen-Kandidaten gefunden. Das Risiko besteht darin, dass zu viele Klassen fälschlicherweise als extrem deklariert werden. Eine obere Schranke von 0,5 (\rightarrow maximal 700 der 14000 Tage befinden sich in einer Klasse) oder 1,0 erscheint sinnvoll, während 0,02 oder 0,01 (in Abb. 4.1 nicht dargestellt) zu streng sind und Extremklassen dann praktisch nicht mehr gefunden werden.

4.5 Einsatz von KlaMuKo – Beispiel 1: Maximumtemperatur

Als Beispiel sind in Tab. 4.1–4.3 die gefundenen Häufigkeiten und andere abgeleitete Maße für die KlaMuKo-Analyse der Maximumtemperatur in den Sommermonaten für Tieflandstationen in Hessen wiedergegeben. Die Angaben zu den Zeitabschnitten verwenden immer das Anfangsjahr, d.h. der Eintrag „1991“ steht beispielsweise für die Dekade 1991–2000. Zudem wurden zwei Läufe des MPI-ESM-Modells untersucht. Die Ergebnisse für Lauf 1 sind ausführlich, d.h. sowohl in Form von absoluten wie in Form von relativen Häufigkeiten für alle Dekaden in Tab. 4.1 und Tab. 4.2 gezeigt. Für Lauf 2 findet sich eine Zusammenfassung in Tab. 4.3.

Ergänzt wird die Darstellung der relativen Häufigkeiten in Tab. 4.3 um eine Zusammenfassung, die angibt, wie häufig die Klassen insgesamt (in allen

³⁾Von, beispielsweise, untersuchten 14000 Tagen werden nur Klassen als Kandidaten für Extremklassen eingestuft, wenn sie nicht mehr als 2800 bzw. 1400 Werte enthalten. Es ist zu bedenken, dass so große Klassen tendenziell eher den mittleren Zustand als die Extreme beschreiben.

Dekaden) auftraten, mit welchem Mittelwert (aus dem Klima der Gegenwart) sie verbunden sind, ob sie eine Extremklasse darstellen und welchen Trend sie besitzen. Ein Rechenbeispiel zur Trendbestimmung findet sich auf S. 36.

Die Dokumentation der KlaMuKo-Klassencharakteristika in MPI-ESM Lauf 2 findet sich in Tab. 4.3 – dort wurde jedoch auf die Liste der Häufigkeiten in den einzelnen Dekaden verzichtet und es wird lediglich die zusammenfassende Information angegeben.

Tabelle 4.1: Dekadenspezifische Häufigkeitsverteilung der KlaMuKo-Klassen. Variable: Tageshöchsttemperatur (TX) an den hessischen Tiefland-Klimastationen. Zeitraum: Sommer (JJA) 1951–2100. Modell: MPI-ESM, Lauf 1; 1951–2000: 20C-Daten; 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP8.5. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum.

<i>Dekaden Beginn</i>	<i>KlaMuKo-Klasse</i>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	<i>Absolute Häufigkeit</i>									
1951	63	30	0	106	1	163	21	174	151	119
1961	35	16	0	119	0	214	7	240	189	100
1971	78	15	0	72	5	183	8	248	185	126
1981	67	8	0	66	0	172	9	231	229	138
1991	79	11	0	95	1	179	18	220	196	121
2001	97	7	3	57	6	170	31	211	191	147
2011	101	6	0	40	5	133	36	215	239	145
2021	78	1	1	57	11	162	28	230	209	143
2031	137	6	2	43	20	93	61	160	208	190
2041	73	5	2	31	11	96	55	222	245	180
2051	172	2	12	13	27	54	79	143	207	211
2061	135	0	12	7	31	52	83	164	245	191
2071	138	0	20	17	58	49	107	151	208	172
2081	154	0	39	4	84	38	103	105	186	207
2091	163	0	56	10	85	28	128	66	159	225
<i>SumAnz</i>	1588	107	149	737	350	1792	787	2796	3026	2432

4.5 Beispiel 1: Maximumtemperatur

Tabelle 4.2: Wie Tabelle 4.1, jedoch für die prozentualen Häufigkeiten. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert des Prediktanden (TX) für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *P80_K*: Indikator ob das 80-Perzentil der überboten (+) oder unterboten (-) wird. Zeile *P90_K*: Indikator ob das 90-Perzentil der überboten (+) oder unterboten (-) wird. Zeile *Trend*: Trend in Einheiten der prozentualen Häufigkeit. Klassen, in welchen die drei auf S. 29 vorgestellten Kriterien für Extreme erfüllt sind, haben eine farbige Kennung. Rot: Sehr warme Klasse mit deutlichem Anstieg. Grün: Sehr kalte Klasse mit deutlichem Rückgang.

Dekaden Beginn	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Prozentuale Häufigkeit (Zeilensumme = 100)									
1951	7,6	3,6	0,0	12,8	0,1	19,7	2,5	21,0	18,2	14,4
1961	3,8	1,7	0,0	12,9	0,0	23,3	0,8	26,1	20,5	10,9
1971	8,5	1,6	0,0	7,8	0,5	19,9	0,9	27,0	20,1	13,7
1981	7,3	0,9	0,0	7,2	0,0	18,7	1,0	25,1	24,9	15,0
1991	8,6	1,2	0,0	10,3	0,1	19,5	2,0	23,9	21,3	13,2
2001	10,5	0,8	0,3	6,2	0,7	18,5	3,4	22,9	20,8	16,0
2011	11,0	0,7	0,0	4,3	0,5	14,5	3,9	23,4	26,0	15,8
2021	8,5	0,1	0,1	6,2	1,2	17,6	3,0	25,0	22,7	15,5
2031	14,9	0,7	0,2	4,7	2,2	10,1	6,6	17,4	22,6	20,7
2041	7,9	0,5	0,2	3,4	1,2	10,4	6,0	24,1	26,6	19,6
2051	18,7	0,2	1,3	1,4	2,9	5,9	8,6	15,5	22,5	22,9
2061	14,7	0,0	1,3	0,8	3,4	5,7	9,0	17,8	26,6	20,8
2071	15,0	0,0	2,2	1,8	6,3	5,3	11,6	16,4	22,6	18,7
2081	16,7	0,0	4,2	0,4	9,1	4,1	11,2	11,4	20,2	22,5
2091	17,7	0,0	6,1	1,1	9,2	3,0	13,9	7,2	17,3	24,5
<i>SumAnz</i>	1588	107	149	737	350	1792	787	2796	3026	2432
<i>PrMit</i>	27,4	12,2	34,7	14,3	32,7	16,4	29,9	18,6	21,3	24,3
<i>P80_K</i>		-	+	-	+					
<i>P90_K</i>		-	+							
<i>Trend</i>	12,8	-2,7	4,7	-13,1	9,2	-22,4	13,7	-15,8	1,2	12,3

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wiedererkennung von KlaMuKo-Klassen in Analogie zu den letzten fünf Zeilen in Tab. 4.2. Es wurde Lauf 2 des MPI-ESM analysiert. Rot: Sehr warme Klasse mit deutlichem Anstieg. Grün: Sehr kalte Klasse mit deutlichem Rückgang.

	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	1583	133	128	794	306	1899	804	2808	3115	2506
<i>PrMit</i>	27,4	12,2	34,7	14,3	32,7	16,4	29,9	18,6	21,3	24,3
<i>P80_K</i>		-	+	-	+					
<i>P90_K</i>		-	+							
<i>Trend</i>	13,7	-2,6	4,1	-13,2	8,2	-20,7	13,7	-15,3	0,5	11,7

Anmerkung und Rechenbeispiel zur Angabe des Trends mit Daten von MPI-ESM Lauf 1

Die untersuchte Größe (Maximumtemperatur) erfordert die zweiseitige Fragestellung (vgl. Abschnitt 4.4.1), da sowohl sehr hohe als auch sehr niedrige Höchsttemperaturen von Interessen sind. Die zu den Perzentilen zugehörigen Schwellen sind:

- *P90*: Obere Schwelle 32,9°C untere Schwelle 14,1°C; bei dieser Schwelle werden nur die Klassen 2 und 3 als Extremklassen eingestuft.
- *P80*: Obere Schwelle 30,5°C untere Schwelle 16,0°C; bei dieser Schwelle werden die Klassen 2 bis 5 als Extremklassen eingestuft.

Aus den zeitlichen Entwicklung der prozentualen Anteile der Klassen, beispielsweise dargestellt in Tab. 4.2, Datenspalte für die Klasse 1 (1951–1960: 7,6% ... 2091–2100: 17,7%) lässt sich eine lineare Trendgerade $y = 4,59 + 0,854x$ bestimmen. Das heißt pro Dekade errechnet sich ein Anstieg von 0,854 Prozentpunkten. Insgesamt wurden 15 Dekaden untersucht; der in der letzten Zeile von Tab. 4.2 eingetragene Trend-Wert für diese Klasse ist $15 \cdot 0,854 = 12,8$.

Anmerkung zu den Ergebnissen mit MPI-ESM Lauf 2

Für die Erstellung des in Tab. 4.3 dargestellten Datenmaterials wurde Lauf 2 von MPI-ESM, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 verwendet. Die Klassennittel in der Zeile *PrMit* sind identisch mit denjenigen von Lauf 1 in Tab. 4.2, denn sie wurden ja anhand des Klimas der Gegenwart ermittelt und hängen nicht von der *simulierten* Klimaentwicklung ab. Es zeigt sich, dass bezüglich der Entwicklung von 1951–2100 nur geringe Unterschiede zwischen beiden Läufen existieren, d.h. die KlaMuKo-Klassen werden in beiden Läufen mit ähnlichen Häufigkeitsverteilungen und mit ähnlichen Trendentwicklungen wiedergefunden.

Charakteristika der 10 Klassen in Tab. 4.1ff

Diese Eigenschaften wurden unter Verwendung von *Messdaten der Klimastationen* ermittelt. Sie sind unten zusammengefasst – die Hervorhebungen zeigen die Klassen mit hohen resp. niedrigen Mittelwerten, bestimmt mit dem 80-Perzentil und gekennzeichnet mit + bzw. – in Tab. 4.2 und 4.3.

1. warm (27,4°C) aber nicht extrem – starker Anstieg (+12,8 Prozentpunkte) – häufig (1588-mal, d.h. an rund 12% aller Tage aufgetreten)
2. sehr kalt – geringer Rückgang – sehr selten
3. extrem warm – leichter Anstieg – selten
4. sehr kalt – starker Rückgang – mittlere Häufigkeit
5. extrem warm – Anstieg mittlerer Stärke – selten bis mittlere Häufigkeit
6. kalt – starker Rückgang – sehr häufig
7. warm – starker Anstieg – mittlere Häufigkeit
8. gemäßigt kalt – starker Rückgang – sehr häufig
9. gemäßigt warm – sehr schwacher Rückgang – sehr häufig
10. warm – starker Anstieg – sehr häufig

Wichtige Schlüsse aus diesen Ergebnissen:

- Die warmen und sehr warmen Klassen verfügen über einen positiven Trend.
- Klassen, die durch niedrige oder sehr niedrige Temperaturmaxima charakterisiert sind zeigen Abnahmetrends.
- Wie Tab. 4.1 und 4.2 anhand von MPI-ESM-Lauf 1 zeigen, gibt es mit Nr. 3 und 5 Klassen, die in der Gegenwart sehr selten auftreten und im Verlauf des 21. Jahrhunderts beachtliche Anteile von je 7–13% an der Gesamtheit der Tage erreichen. Diese Klassen sind zudem durch sehr hohe Temperaturwerte charakterisiert (Klassenmittel über 30°C). – Auch der umgekehrte Fall (relativ häufiges Auftreten in der Gegenwart und Verschwinden in der Zukunft) bei extrem kalten Klassen ist im Fall der Klassen 2 und 4 erkennbar.
- Die Wiedererkennung ergibt für die Untersuchung von MPI-ESM Lauf 1 und 2 nur geringfügige Unterschiede.
- Das Verfahren ist also für die Tagesmaximumtemperatur in der Lage, Verhältnisse zu detektieren, die (i) extrem sind und (ii) zukünftige Relevanz besitzen.

In Lichte der drei Kriterien, die auf S. 29 zusammengefasst sind, können folgende KLaMuKo-Klassen als relevant herausgearbeitet werden:

- Warme Klassen 3 und 5: (i) Diese Klassen sind in der Gegenwart selten bis sehr selten; (ii) sie nehmen gut erkennbar zu; (iii) ihr Mittelwert ist nach der o.e. Groborientierung besonders hoch. Diese Klassen sind in den letzten vier Zeilen von Tab. 4.2 rot markiert. Anmerkung: Die relativ große Klasse 1 zeigt zwar einen gut sichtbaren Anstiegstrend, jedoch ist sie nicht mit sehr hohen Temperaturwerten verbunden. Bei der relativ großen Klasse 7 ist der Anstieg ebenfalls relativ stark, jedoch ist ihr Klassenmittelwert ($29,9^{\circ}\text{C}$) nicht so hoch, um als extrem charakterisiert werden zu können.
- Kalte Klassen 2 und 4: (i) Diese Klassen sind in der Gegenwart relativ häufig; (ii) ihre Häufigkeit nimmt im Verlauf des 21. Jahrhunderts stark ab; (iii) ihr Mittelwert ist sehr niedrig. Diese Klassen sind in den letzten fünf Zeilen von Tab. 4.2 grün markiert. Anmerkung: Klassen 6 und 8 zeigen ebenfalls ausgeprägte Abnahmetrends, jedoch sind ihre Klassenmittelwerte ($16,4^{\circ}\text{C}$ bzw. $18,6^{\circ}\text{C}$) für eine Einstufung als Extrem nicht niedrig genug.

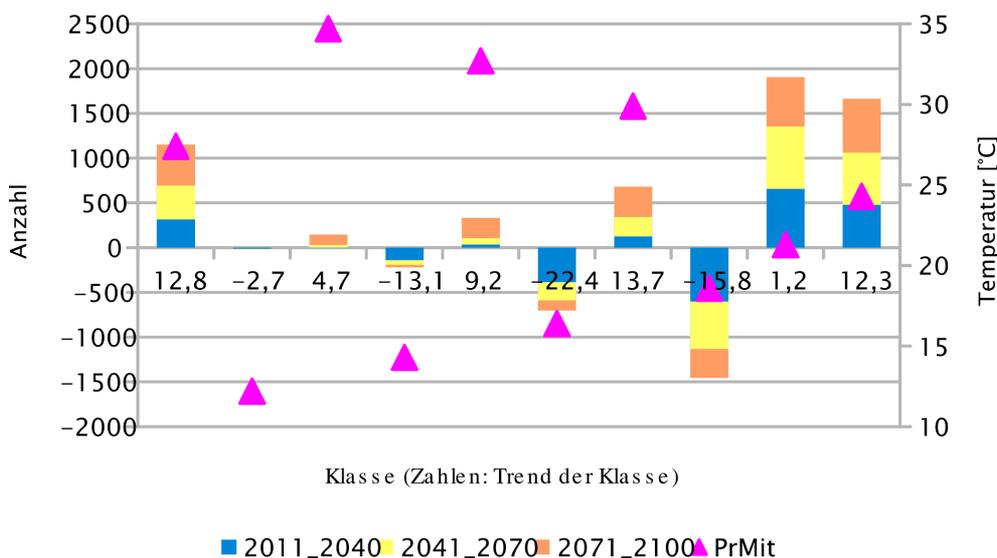


Abbildung 4.2: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KLaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur linken Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanden (Dreiecke – Bezug zur rechten Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.2 auf S. 36). Prediktand: Maximumtemperatur im Sommer (JJA). Daten stammen aus MPI-ESM Lauf 1 Szenario RCP8.5.

Abb. 4.2 gibt in Übersichtsform die Entwicklungen wieder und dient der visuellen Beurteilung der einzelnen KLaMuKo-Klassen. Dabei ist zu beachten, dass sich die dargestellten Größen auf zwei verschiedene Ordinaten beziehen;

es sei zudem angemerkt, dass aus Illustrationsgründen die Stapelbalken bei *positivem Trend nach oben* und bei *negativem Trend nach unten* zeigen. Auf die Wiedergabe eines Diagramms für die Ergebnisse unter Verwendung von MPI-ESM Lauf 2 wurde verzichtet, da diese relativ große Ähnlichkeit zu den Analysen von Lauf 1 besitzen.

4.6 Einsatz von KLaMuKo – Beispiel 2: Tage mit Niederschlag über 10mm/Tag

Das Beispiel in Abschnitt 4.5 war aus Veranschaulichungsgründen gewählt worden – Temperaturtrends sind relativ leicht nachvollziehbar und die Erläuterung der Methodik ist bei einem solche Beispiel weniger komplex.

In Beispiel 2 hingegen ist der analysierte Prediktand nicht der Wert einer atmosphärischen Variablen sondern die *Überschreitung eines Schwellwerts*, in diesem Fall Tagesniederschlagswerte, die an einer Station über 10mm liegen. Zudem erfolgt ein weiterer Aufbereitungsschritt, denn es wird der *Anteil der Stationen, für die an einem gegebenen Tag eine Schwellwertüberschreitung auftrat* ermittelt. Die analysierte Zeitreihe besteht also aus Werten, die für jeden Tag zwischen 0 (keine Station hatte Niederschlag über 10mm/Tag) und 100 (Kriterium wurde an allen Stationen erfüllt) liegen⁴⁾.

Zur Übersicht sind in Tab. 4.4 die aus den Klima-Beobachtungen bestimmten Mittelwerte jeder Klasse sowie der spezifische Trend (in Prozentpunkten, s. Rechenbeispiel auf S. 36) angegeben. Mit Hilfe eines Perzentil-Indikators, der in Abschnitt 4.4.1 erläutert wurde, wurden in der Tabelle Extremklassen markiert.

Ein Trenddiagramm (Abb. 4.3) ergänzt die Information von Tab. 4.4 für Lauf 1 – die Ergebnisse für Lauf 2 sind denen von Lauf 1 relativ ähnlich, weshalb nur ein Trenddiagramm gezeigt wird.

Wie sind die Klassenmittelwerte zu interpretieren? Es sei daran erinnert, dass es bei der Untersuchung von Starkniederschlag nur sinnvoll ist, bestimmte Klassen zu betrachten: Sie sollen Tage herausarbeiten, an denen an möglichst vielen Stationen mehr als 10 mm Niederschlag auftrat (einseitige Fragestellung, s. Abschnitt 4.4.1). Dass es außerdem besonders *trockene* Klassen geben kann, deren Häufigkeit sich mit der Zeit ändert, ist für den Gegenstand der Untersuchung nicht von Belang.

⁴⁾Dies ist die Variante *Flächen-Wahrscheinlichkeit (FW)*, die im Zuge der Beschreibung von Datenaufbereitungen auf S. 9 vorgestellt wurde.

Zukünftiges Auftreten von Klimaextremen

Tabelle 4.4: Untersuchung der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen. Variable: Anteil der hessischen Tiefland-Klimastationen, bei denen an einem Tag eine Niederschlagsmenge >10 mm auftrat. Zeitraum: Sommer (JJA). Modell: MPI-ESM, Lauf 1; Zeitraum 1951–2000: 20C-Daten; Zeitraum 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP85. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert des Prediktanden (Stationsanteil RR>10 mm) für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *P75_K*: Indikator ob das 75-Perzentil des Wertebereichs [0...100] überboten (+) wird. Zeile *P90_K*: Indikator ob das 90-Perzentil überboten (+) wird. Zeile *Trend*: Trend 1951–2100 in Einheiten der prozentualen Häufigkeit. Klassen, in welchen die drei auf S. 29 vorgestellten Kriterien für Extreme angenähert werden, haben eine hellrote Kennung.

	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	4123	416	371	1432	40	1492	12	2062	1463	2297
<i>PrMit</i>	9,5	52,8	0,4	35,5	0,1	18,4	0,4	33,1	1,7	1,6
<i>P75_K</i>				+				+		
<i>P90_K</i>										
<i>Trend</i>	5,5	0,2	-2,2	-5,0	-0,2	-1,0	-0,1	-3,4	5,0	1,5

Tabelle 4.5: Wie Tab. 4.4, jedoch für MPI-ESM Lauf 2.

	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	4245	490	304	1593	55	1498	11	2130	1461	2289
<i>PrMit</i>	9,5	52,8	0,4	35,5	0,1	18,4	0,4	33,1	1,7	1,6
<i>P75_K</i>				+				+		
<i>P90_K</i>										
<i>Trend</i>	9,0	-1,2	-2,1	-2,9	-0,1	-2,1	-0,1	-4,7	2,5	1,8

Ein hoher Wert in der Zeile *PrMit* bedeutet, dass in dieser Klasse Tage zusammengefasst sind, bei denen an vielen Stationen gleichzeitig Niederschlagsmengen über 10mm/Tag auftraten. Würden sich in einer Klasse ausschließlich Tage befinden, an denen gleichzeitig an allen Stationen dieses Niederschlagskriterium erfüllt ist, so wäre der Klassenmittelwert 100. Es zeigt sich, dass dies nicht der Fall ist, und mehr als rund 50 für den Klassenmittelwert (Klasse 2) nicht analysiert wird. Mehr als die Hälfte der Klassen hat einen Mittelwert unter 10. Dies ist auch nachvollziehbar, denn es gibt mehr Tage ohne Niederschlag als mit Niederschlag – das Kriterium, es sollen mindestens 10mm pro Tag sein, reduziert den Anteil noch einmal. Diese Tage werden von KlaMuKo auf die einzelnen Klassen verteilt und der Effekt ist, dass dadurch die Klassen-Mittelwerte relativ niedrig sind.

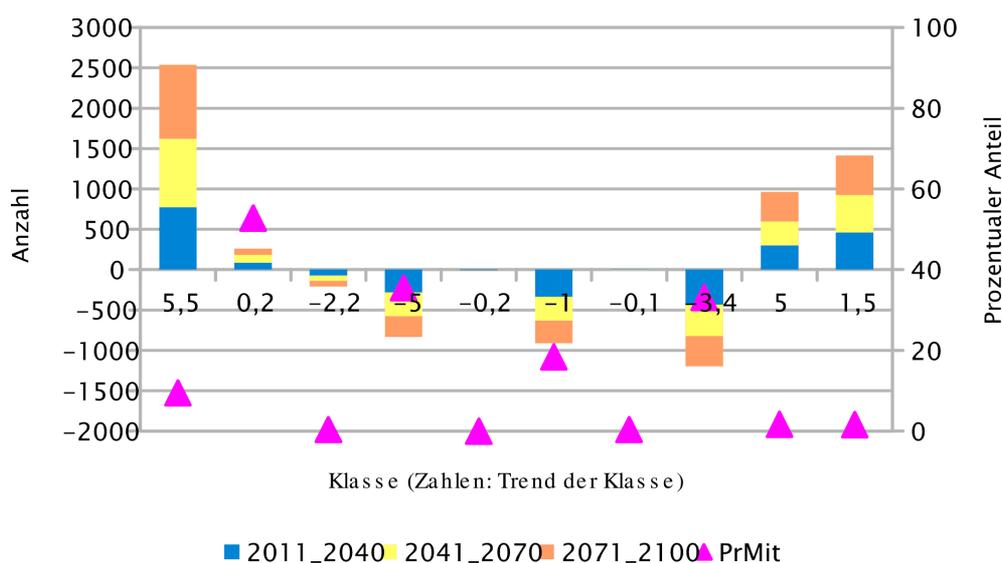


Abbildung 4.3: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KlaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur **linken** Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanden (Dreiecke – Bezug zur **rechten** Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.1). Prediktand: Anteil der Stationen in Hessen, bei denen im Sommer (JJA) das Kriterium „Tagesniederschlag > 10mm“ zutrif.

Welche Klassen sind für die Betrachtung der *Entwicklung von Extremen* relevant?

- Eine „klassische Extremklasse“, in der sich nur Tage finden, an denen an einem sehr hohen Anteil der Station Starkniederschlag auftrat (Klassenmittelwert=100), wird von KlaMuKo nicht gefunden. Wie oben erläutert, weist die Klasse mit der höchsten Dichte an Starkniederschlagstagen (Klasse 2) lediglich einen mittleren Anteil von rund 50% auf.
- Wenn der Begriff „Extremklasse“ etwas weiter gefasst wird, u.A. durch Verwendung des 75-Perzentils für die Kennzeichnung von Klassenmitteln, finden sich die Klassen 2, 4 und 8. Diese verfügen immerhin über einen mittleren Anteil von Starkniederschlagstagen über 30%.
- Aber: Die Kandidatenklasse 2 besitzt sicher das relativ größte Potenzial für Starkniederschlag – jedoch verändert sich ihre Häufigkeit im Laufe des simulierten Zeitraum nur sehr wenig. Die Trends der Wiedererkennung bei den Ergebnissen von MPI-ESM Lauf 1 und Lauf 2 sind nahe 0 bzw. deutlich kleiner als 3 Prozentpunkte für den gesamten Zeitraum. Mit Blick auf mögliche *Änderungen* des Starkregen-Potenzials ist für die Klasse 2 festzuhalten: Durch Wettersituationen der Art, wie sie in dieser zusammengefasst sind, wird in den Modell-Klimaprojektionen ein etwa gleich bleibendes Niveau des Bedrohungspotenzials gefunden. Hinweis: Es gibt durchaus Klassen mit Zunahmetrends (Klassen 1, 9 und

10); jedoch stehen diese für eine besonders niedrige Wahrscheinlichkeit von Starkniederschlag und sind folglich nicht den Extremen zuzurechnen.

- Zurück zu den „Kandidaten“ für Extremklassen. Die beiden Klassen 4 und 8 zeigen einen relativ ausgeprägten *Abnahmetrend*. Jedoch sind diese Klassen relativ groß, denn sie enthalten jeweils rund 10–15% aller Tage. Wie in Abschnitt 3.2.2 und in Abschnitt 4.3 angemerkt, beschreiben Klassen mit sehr vielen Mitgliedern tendenziell den mittleren Zustand und weniger die extremen Zustände. Aus diesem Grund sind die Markierungen in Tab. 4.4 und 4.5 in einem helleren Rotton als beispielsweise bei den Untersuchungen der Maximumtemperatur in Beispiel 1 (Tab. 4.2). Dort wurde ein kräftigeres Rot verwendet, denn die drei Faktoren *Hoher Wert*, *starker Trend* und *richtige Größenordnung bei der Zahl der Klassenmitglieder* kamen sehr viel deutlicher zum Tragen.

Im Beispiel 2 wurde eine Zeitreihe des Stationsanteils mit Erfüllung des Starkniederschlagskriteriums analysiert. Der Fokus lag auf den Sommermonaten und der Untersuchung der Zukunftsentwicklung, basierend auf zwei Läufen von MPI-ESM, Szenario RCP8.5. Die vorgestellten Ergebnisse weisen auf eine geringe Tendenz zum *Rückgang* der Starkniederschlagssituationen hin, denn die gefundenen Trends in diesen Klassen lagen zwischen -3 und -5 Trendeinheiten. Die Belastbarkeit der Aussage ist dennoch begrenzt, denn die analysierten Klassen enthalten auch einen relativ großen Anteil von Tagen, an denen Starkniederschlag gar nicht oder nur an wenigen Stationen auftrat.

Es wurden weitere Untersuchungen mit anders aufbereiteten Prediktanden durchgeführt: (i) Einfache Binarisierung, d.h. 1 oder 0 als Kennung wenn an einem Tag an irgendeiner Station Starkniederschlag auftrat (vgl. Erläuterungen auf S. 9); (ii) Flächen-Repräsentativität, d.h. 1 oder 0 als Kennung wenn an einem Tag an 30% (alternativ: 70%) der Stationen Starkniederschlag auftrat; (iii) Nutzung von Teilmengen der Stationen (nur hoch gelegene, regenreiche Stationen oder nur tief gelegene Stationen mit geringerem Niederschlags oder alle Stationen); (iv) höhere Schwellwerte als Definition von Starkniederschlag (z.B. 20 oder 30mm/Tag); (v) Sommerhalbjahr (April–September) statt meteorologischer Sommer (Juni–August) als Untersuchungszeitraum.

Die Untersuchungen zu (i)–(v) ergaben gleichfalls, dass beim Starkniederschlag keine „klassische Extremklasse“ auftritt, die nahezu ausschließlich aus Starkregentagen besteht und darüber hinaus eine deutlich erkennbare Zukunftsentwicklung aufweist. Es wurden allerdings vielfach *Klassen mit erhöhtem Starkniederschlagsanteil* gefunden, die ihrerseits *leichte Abnahmeneigung* haben. Das unterstreicht die Befunde von Beispiel 2 und erhöht deren Belastbarkeit.

4.7 Zukunftsentwicklungen von Starkwind, Starkniederschlag und Gewittern

In den Beispielen der Abschnitte 4.5 und 4.6 wurden Abschätzungen zukünftiger Veränderungen vorgestellt, wie sie sich aus dem Einsatz von KLaMuKo mit den Prediktanden *Maximumtemperatur im Sommer* bzw. *Anteil der Stationen mit Tagesniederschlag über 10mm im Sommer* ergeben. Letzteres beleuchtet den Aspekt Starkniederschlag.

In diesem Abschnitt werden Zukunftsentwicklungen für ausgewählte Indikatoren des Starkwinds und der Gewitter in Form einiger weiterer Trenddiagramme, analog zu den Abb. 4.2 und 4.3 nebst der zugehörigen Tabellen zu Häufigkeit, Mittelwert und Trend der Klassen dargestellt. Für den Wind gibt es zwei Datenquellen: Messungen an Klimastationen (Abschnitt 4.7.1) und Messungen an SYNOP-Stationen (Abschnitt 4.7.2); für Gewitter werden SYNOP-Daten analysiert (Abschnitt 4.7.3).

4.7.1 Starkwind – Verwendung von Klimadaten

Prediktand: Windgeschwindigkeit

Tab. 4.6 und Abb. 4.4 zeigen die klassenspezifischen Analysen bezüglich der zukünftigen Entwicklung der KLaMuKo-Klassen für den Prediktanden *Windgeschwindigkeit an tief gelegenen Stationen im Sommer*. In Analogie zu den Untersuchungen von Maximumtemperatur und Starkniederschlag in den vorherigen Abschnitten wird analysiert, ob Extremklassen auftreten und ob diese einen Trend besitzen.

Anmerkung: Wind ist eine Größe, die die zweiseitige Fragestellung, d.h. die Untersuchung sowohl von Klassen mit besonders niedrigen als auch von Klassen mit besonders hohen Werten, zulässt. Für das Vorhaben relevant sind jedoch die Klassen mit *besonders hoher* Windgeschwindigkeit.

Die Betrachtung der Resultate lässt folgende Schlüsse zu:

- Das Verfahren bestimmt durchaus Klassen, die Starkwindtage in sich vereinigen.
- „Kandidaten“ für Starkwindklassen sind 3, 5, 7 und 9.
- Die Klassen 3, 5 und 7 sind zudem relativ selten und ihre Mittelwerte nehmen unter den 10 Klassen die drei höchsten Ränge ein.
- Allerdings zeigen die Klassen 3, 5 und 7 nur sehr schwache zeitliche Trends, sind also als Indikatoren für die Fragestellung: *Ändern sich die Extremverhältnisse* nicht geeignet. Relativ deutlich ausgeprägte Trends besitzen nur die Klassen 9 (Abnahme um rund 5 Trendeinheiten) und 10 (Zunahme um rund 5 Trendeinheiten); Klasse 10 steht wegen der hohen Zahl von Mitgliedern eher für die mittleren Verhältnisse und nicht für die Extreme.

Zukünftiges Auftreten von Klimaextremen

Tabelle 4.6: Untersuchung der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen. Variable: Mittlere Windgeschwindigkeit an den Tiefland-Klimastationen in Hessen. Zeitraum: Sommer (JJA) 1951–2100. Modell: MPI-ESM, Lauf 1; 1951–2000: 20C-Daten; 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP8.5. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert der Windgeschwindigkeit [m/s] für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *P75_K*: Indikator ob das 75-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *P90_K*: Indikator ob das 90-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *Trend*: Trend in Einheiten der prozentualen Häufigkeit.

	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	4562	419	58	532	135	631	195	1676	1721	3779
<i>PrMit</i>	4,8	2,5	8,2	3,0	6,8	2,6	7,3	2,9	6,5	3,7
<i>P75_K</i>									+	
<i>P90_K</i>										
<i>Trend</i>	0,8	2,5	0,0	-1,0	-0,9	0,4	-1,3	1,7	-4,8	4,6

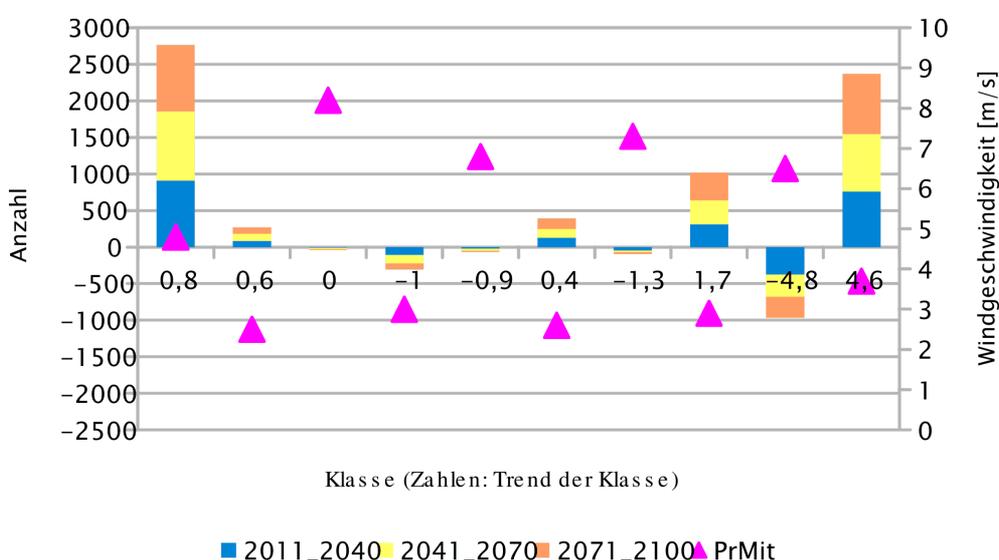


Abbildung 4.4: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KlaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur **linken** Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanden (Dreiecke – Bezug zur **rechten** Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.1). Prediktand: Mittlere Windgeschwindigkeit an den tief gelegenen Klimastationen in Hessen [m/s]. Datenquelle: MPI-ESM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5.

- Auch für Klasse 9 gilt die Forderung nach seltenem Auftreten nur eingeschränkt, denn sie umfasst mehr als 12% aller untersuchten Tage. Es sei daran erinnert, dass die Trennschärfe des KlaMuKo-Verfahrens zwischen den mitgliederreichen Klassen nicht so groß ist wie bei den Klassen

mit wenigen Mitgliedern⁵⁾. Dafür besitzt Klasse 9 mit $-4,8$ Prozentpunkten einen deutlichen *Abnahmetrend*. Sie erhält auf Grund der genäherten Erfüllung der Extremklasse-Kriterien in Tab. 4.6 eine Einfärbung, allerdings wegen der o.g. Einschränkungen in einem relativ hellen Ton.

Wichtige Erkenntnis nach dieser Teil-Untersuchung: Wird als Basis (Prediktand) für die KlaMuKo-Analysen die Windgeschwindigkeit benutzt, so lassen sich zwar Extremklassen finden – eine relativ deutliche, vom Modell simulierte zeitliche Entwicklung findet sich bei einer Klasse, die auf Grund ihrer Größe jedoch nur bedingt den Extremen zuzurechnen ist. Diese Klasse weist auf eine *Windabnahme* hin. *Anmerkung: Die dargestellten Sachverhalte und Entwicklungen wurden mit Lauf 1 von MPI-ESM, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 ermittelt – bei Analyse von MPI-ESM Lauf 2 findet sich ein analoger Sachverhalt.*

Prediktand: Anteil der Stationen mit Schwellwertüberschreitung der Windgeschwindigkeit

Ein weiterer Ansatz, aus den Klimadaten Extremklassen mit zeitlichen Entwicklungen herauszuarbeiten, wird in diesem Abschnitt beschrieben. Hierzu erfolgt eine Aufbereitung der Daten. Es wird für jeden Tag ermittelt, ob an einem Anteil von 30% der Stationen eine Schwelle des Mittelwinds von 8 m/s überschritten wird. Der Wertebereich des Prediktanden liegt damit entweder bei 0 (weniger als 30% der Stationen mit Schwellwertüberschreitung) oder 1 (30% oder mehr der Stationen mit Schwellwertüberschreitung). Die Ergebnisse sind in Tab. 4.7 und Abb. 4.5 dargestellt.

Es zeigt sich, dass auch in diesem Fall von KlaMuKo einige Kandidaten für Extremklassen gefunden werden. Die Zahl 1,0 in der Mittelwertspalte der Klassen 3, 5 und 10 zeigt an, dass sich in ihnen ausschließlich Tage finden, an denen das Starkwindkriterium (Tagesmittelwind über 8 m/s an mindestens 30% der Stationen) erfüllt ist. Bei Klasse 7 sind es immerhin im Mittel 90% der Tage mit Kriteriumserfüllung, d.h. es gibt unter den dort versammelten Tagen nur eine kleine Anzahl, an denen das Kriterium nicht erfüllt ist. Ein Blick auf die Trendzeile in Tab. 4.7 zeigt auch, dass ein relativ deutlicher *Abnahmetrend* mit $-3,8$ Prozentpunkten für den Gesamtzeitraum lediglich für die Klasse 10 nachzuweisen ist. Zudem ist sie nicht sehr groß, denn sie enthält nur rund 5% aller Tage. Daher wurde diese Extremklasse in der Tabelle rot eingefärbt.

⁵⁾Wie in Abschnitt 3.2.2 und in Abschnitt 4.3 angemerkt, sind die für Extreme „interessanten“/relevanten Klassen, die KlaMuKo herausarbeitet, relativ klein, während die Klassen mit sehr vielen Mitgliedern tendenziell den mittleren Zustand und weniger die extremen Zustände beschreiben.

Zukünftiges Auftreten von Klimaextremen

Tabelle 4.7: Untersuchung der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen. Variable: Anteil der hessischen Tiefland-Klimastationen, bei denen an einem Tag ein Mittelwind >8 m/s auftrat. Zeitraum: Sommer (JJA) 1951–2100. Modell: MPI-ESM, Lauf 1; 1951–2000: 20C-Daten; 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP8.5. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert des Prediktanden (FF >8 m/s an mindestens 30% der Stationen) für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *Trend*: Trend in Einheiten der prozentualen Häufigkeit.

	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	2221	680	15	1794	53	2371	166	2638	3048	722
<i>PrMit</i>	0,6	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0	0,2	1,0
<i>P75_K</i>										+
<i>P90_K</i>										+
<i>Trend</i>	-5,2	0,7	0,0	2,3	-0,1	3,1	-0,8	3,5	0,3	-3,8

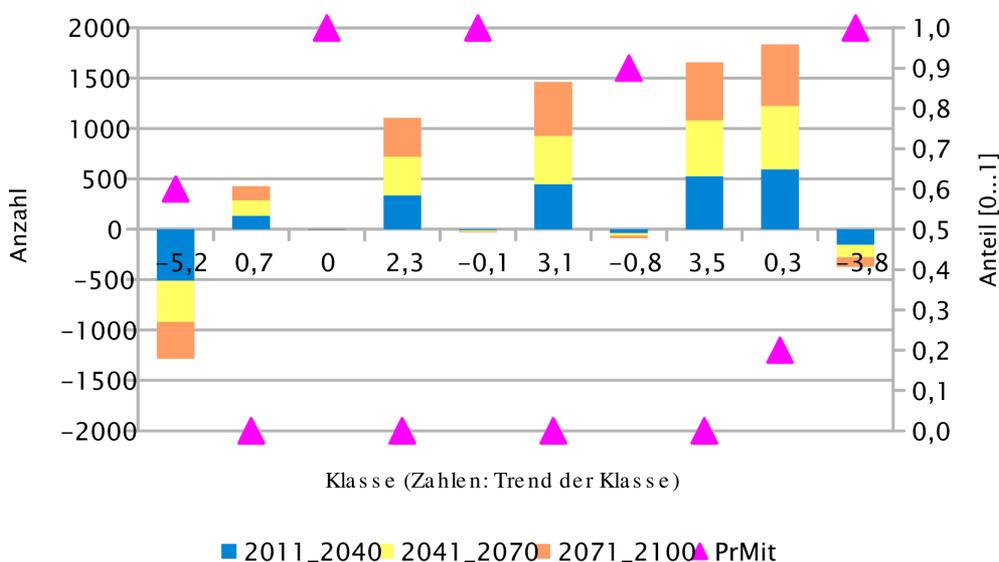


Abbildung 4.5: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KlaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur **linken** Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanden (Dreiecke – Bezug zur **rechten** Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.1). Prediktand: Mittelwind >8 m/s an mindestens 30% der Klimastationen in Hessen im Sommer (JJA). Datenquelle: MPI-ESM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5.

4.7.2 Starkwind – Verwendung von SYNOP-Daten

Wie bereits in [SPEKAT et al. \(2013a\)](#) sowie in Abschnitt 2.1 dieses Berichts vorgestellt, existieren neben den Aufzeichnungen der Klimastationen als alternative Datenquelle für das regionale Klima der Gegenwart auch die Meldungen der

SYNOP-Stationen. Es ist zu beachten, dass bei dieser Datenquelle Winddaten nur für den Zeitraum nach 1990 verwendet werden können. Selbst in diesem Zeitraum besteht auf Grund der Spezifika von SYNOP-Meldungen – vgl. Abschnitte 2.1, 2.2 sowie Anhang A.4 – ein Restrisiko, dass nicht alle Starkwindergebnisse tatsächlich erfasst werden.

Die Daten wurden in der Form FW (Flächenwahrscheinlichkeit, vgl. Abschnitt 2.2) aufbereitet. Das heißt, für jeden Tag zwischen 1991 und 2010 wurde festgestellt, an welchem Anteil der untersuchten SYNOP-Stationen das Starkwindkriterium erfüllt war (0,0: nirgends ... 1,0: überall). Tab. 4.8 stellt wichtige Kenngrößen der KlaMuKo-Klassen vor. Eine visuelle Übersicht der SYNOP-Starkwind-Untersuchung findet sich im Trenddiagramm Abb. 4.6.

Tabelle 4.8: Untersuchung der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen. Variable: Anteil der hessischen SYNOP-Stationen, bei denen an einem Tag ein 10-Minutenwind >13 m/s auftrat oder windrelevante SYNOP-ww-Meldungsgruppen verzeichnet wurden. Zeitraum: Sommer (JJA) 1951–2100. Datenquelle: MPI-ESM Lauf 1; 1951–2000: 20C-Daten; 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP8.5. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert des Prediktanden (Stationsanteil „SYNOP Starkwindkriterium erfüllt“) für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwartsklima. Zeile *PrMit*: Mittelwert der Windgeschwindigkeit [m/s] für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwartsklima. Zeile *P60_K*: Indikator ob das 60-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *P90_K*: Indikator ob das 90-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *Trend*: Trend in Einheiten der prozentualen Häufigkeit.

	<i>KlaMuKo-Klasse</i>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	3729	5	372	30	1387	173	2707	653	3038	1614
<i>PrMit</i>	0,2	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,1	0,8	0,4	0,6
<i>P60_K</i>								+		+
<i>P90_K</i>										
<i>Trend</i>	1,9	0,0	2,0	0,2	2,3	-1,3	3,9	-3,2	-2,2	-3,6

Die KlaMuKo-Klassen und ihre projizierte zeitliche Entwicklung sind wie folgt einzuschätzen:

- Es gibt „klassische Extremklassen“, die wenige Mitglieder besitzen und in denen gleichzeitig nur Tage eingeordnet sind, an denen Starkwind an allen Stationen auftrat (*PrMit* = 1,0). Dies sind die Klassen 2, 4 und 6. Sie treten jeweils an 1% oder weniger aller Tage auf.
- Bei „toleranter“ gefasstem Extrembegriff (Perzentil P60 statt P90 bei der Markierung der Klassenmittelwerte) stellen die Klassen 8 und 10 ebenfalls Fälle dar, an denen Starkwind zumindest an einem Teil der Stationen auftrat (*PrMit* = 0,8 bzw. 0,6). In ihnen finden sich 5 bzw. 12% aller Tage, d.h. sie sind deutlich größer als die Klassen 2, 4 oder 6.

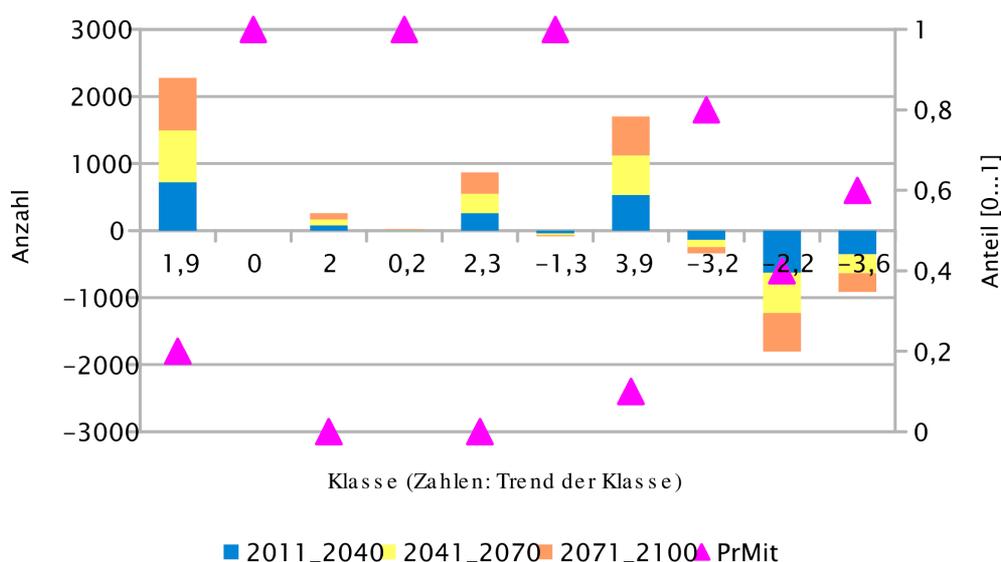


Abbildung 4.6: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KlaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur **linken** Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanden (Dreiecke – Bezug zur **rechten** Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.1). Prediktand: Anteil der SYNOP-Stationen in Hessen, bei denen im Sommer (JJA) das Starkwindkriterium zutrif. Datenquelle: MPI-ESM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5.

- Ausgeprägte Trends sind aber bei den o.e. Klassen 2, 4 und 6 nicht erkennbar. Die unter Vorbehalt (s.o.) als extrem erachteten Klassen 8 und 10 besitzen hingegen gut erkennbare *Abnahmetrends*. In Tab. 4.8 sind diese in hellem Ton gekennzeichnet.
- Wird MPI-ESM Lauf 2, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 zur Untersuchung zu Rate gezogen, so zeigen sich die oben beschriebenen Sachverhalte (Extremklassen ohne erkennbaren Trend, Abnahmetrend bei Klassen mit reduzierter „Extremität“ ebenfalls. Daher werden sie nicht in eigenen Tabellen und Diagrammen dargestellt.

Das Fazit der Winduntersuchungen in Abschnitt 4.7.1 und 4.7.2 ist, dass „klassische Extremklassen“ mit deutlich erkennbaren Trendentwicklungen nur in wenigen Fällen gefunden werden können. Es gibt *Hinweise auf Abnahmetrends* bei Klassen, die ihrerseits erhöhte Häufigkeiten des Auftretens von Starkwind beinhalten. Doch sind diese Klassen im strengen Sinn nicht den Extremen zuzurechnen.

4.7.3 Gewitter – Verwendung von SYNOP-Daten

Gewitter sind ausgeprägte konvektive Ereignisse, oft mit Starkregen und Starkwind verbunden. Als Identifikations-Hilfe wurde das in der Machbarkeitsstudie (MBS2013 SPEKAT et al., 2013a) entwickelte Gewitterkriterium verwendet.

Es wertet die auf Augenbeobachtungen basierenden Meldungen der SYNOP-ww-Gruppe aus, wie in Anhang A.2 beschrieben. Im Zuge dieses Vorhabens erfolgte eine Erweiterung des KlaMuKo-Verfahrens. Ziel war es, die Verbindung von großräumigen Atmosphärenzuständen und dem Auftreten von Gewittern verbessert zu beschreiben (s. Abschnitt 3.2). Insbesondere die Erweiterung des Pools der Potenziellen Prediktoren, vorgestellt in Anhang B und die Untersuchungen der Relevanz der Prediktoren, vorgestellt in Anhang C unterstreichen dies.

Die Gewitterinformation wird in Form von Flächenrepräsentativitäten aufbereitet, d.h. für jeden Tag wird ermittelt, ob an mehr als 30% der untersuchten SYNOP-Stationen das Gewitterkriterium erfüllt war (0: nicht erfüllt, 1: erfüllt). Tab. 4.9 stellt wichtige Kenngrößen der KlaMuKo-Klassen, wiedererkannt in den Projektionen des MPI-ESM-Modells vor. Eine visuelle Übersicht der SYNOP-Gewitter-Untersuchung findet sich im Trenddiagramm Abb. 4.7. *Anmerkung: Bei den Starkwinduntersuchungen konnten aus Gründen der Datenlage nur die Jahre 1991-2010 betrachtet werden. Die Gewitterinformation liegt hingegen für den Zeitraum 1971–2010 vor.*

Tabelle 4.9: Untersuchung der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen. Variable: Anteil der hessischen SYNOP-Stationen, bei denen an einem Tag Gewitter-relevante SYNOP-ww-Meldungsgruppen verzeichnet wurden. Zeitraum: Sommer (JJA) 1951–2100. Modell: MPI-ESM, Lauf 1; 1951–2000: 20C-Daten; 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP8.5. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert des Prediktanden („SYNOP Gewitterkriterium erfüllt“ an mehr als 30% der Stationen) für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *PrMit*: Mittelwert der Windgeschwindigkeit [m/s] für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *P80_K*: Indikator ob das 80-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *P90_K*: Indikator ob das 90-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *Trend*: Trend in Einheiten der prozentualen Häufigkeit.

	<i>KlaMuKo-Klasse</i>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	3928	2	64	89	817	1140	1748	492	1107	4321
<i>PrMit</i>	0,6	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0	0,7	0,0	0,0	0,2
<i>P80_K</i>					+					
<i>P90_K</i>										
<i>Trend</i>	-4,4	0,0	0,5	0,5	1,8	3,0	0,1	1,9	-0,2	-3,1

Die KlaMuKo-Klassen dieser Analyse und ihre projizierte zeitliche Entwicklung sind wie folgt einzuschätzen:

- Es gibt eine „klassische Extremklasse“ (Klasse 3), in der ausschließlich Tage enthalten sind, an denen Gewitter an mehr als 30% der SYNOP-Stationen auftraten.
- Weitere Klassen mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit des Auftretens von

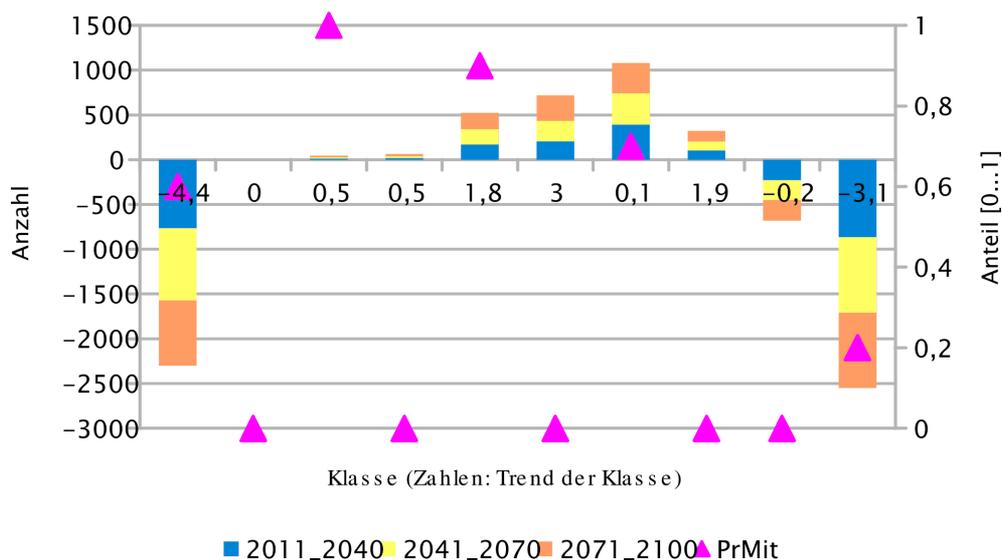


Abbildung 4.7: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KlaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur **linken** Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanten (Dreiecke – Bezug zur **rechten** Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.1). Prediktant: Erfüllung des Gewitterkriteriums an mindestens 30% der SYNOP-Stationen in Hessen im Sommer (JJA). Datenquelle: MPI-ESM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5.

Gewittern sind 1, 5 und 7.

- Einige der von KlaMuKo identifizierten Klassen zeigen Trendentwicklungen (Klassen 1, 6 und 10) von 3 Prozentpunkten oder mehr. Zwei weitere (Klassen 5 und 8) weisen schwächere Trendentwicklungen in der Größenordnung von 2 Prozentpunkten aus.
- Allerdings ist Klasse 1, die mit nahezu 4000 Tagen rund ein Drittel aller Tage beinhaltet, schwerlich als *Extremklasse* zu bezeichnen und beschreibt vielmehr den klimatischen Mittelzustand. Es sei angemerkt, dass bei dieser Klasse ein *Rückgang von Gewittern* zu verzeichnen ist.
- Klassen 6, 8 und 10 zeigen Atmosphärenzustände auf, bei denen Gewitter gar nicht oder eher selten auftreten. Ihre Trendentwicklungen sind nicht einheitlich (6 und 8: leichte Zunahme, 10 deutliche Abnahme).
- Klasse 7, die ebenfalls mit erhöhter Gewittertätigkeit assoziiert ist (Mittelwert: 0,7), zeigt keinen Trend.
- Die einzige, eingeschränkt als Extrem zu erachtende Klasse ist Nr. 5: Sie zeigt relativ hohe Gewitterhäufigkeit, einen (schwachen) Zunahmetrend und ist mit einem Anteil von rund 5% aller Tage nicht den mitgliederreichen „Klimamittelklassen“ zuzurechnen. Daher wurde der Eintrag in Tab. 4.9 in hellem Ton eingefärbt.

Ein qualitativ ähnliches Ergebnis erhält man, wenn die Daten von MPI-ESM Lauf 2, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 analysiert werden.

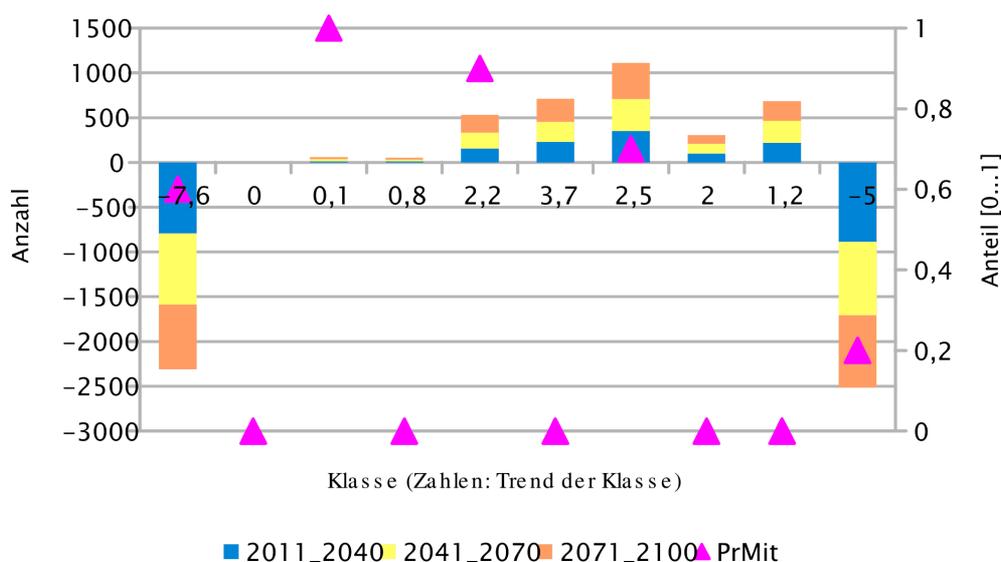


Abbildung 4.8: Wie Abb. 4.7, jedoch unter Verwendung von Lauf 2 des Modells MPI-ESM.

Im Detail gibt es je nach verwendetem MPI-ESM-Lauf Unterschiede in der Stärke der Trendentwicklungen. So ist bei Lauf 2 die Trendentwicklung der Klasse 5 in der Größenordnung von 2,5 Prozentpunkten Zunahme.

Auch bei den Gewitterdaten erfolgten weitere Analysen mit anders aufbereiteten Daten: (i) Einfache Binarisierung, d.h. 1 oder 0 als Kennung wenn an einem Tag an irgendeiner Station Starkniederschlag auftrat (vgl. Erläuterungen auf S. 9); (ii) Alternativ-Betrachtung der Flächen-Repräsentativität, d.h. 1 oder 0 als Kennung wenn an einem Tag an 70% der Stationen Gewitter auftrat; (iii) Nutzung von Teilmengen der Stationen (nur hoch gelegene, regenreiche Stationen oder nur tief gelegene Stationen mit geringerem Niederschlags oder alle Stationen). Die Erkenntnisse aus den zusätzlichen Analysen (i)–(iii) sind:

- Es finden sich durchaus Extremklassen mit relativ wenigen Mitgliedern und großen Gewitterhäufigkeiten.
- Diese Klassen weisen aber keine oder nur relativ schwache Trends auf. Allerdings handelte es sich bei diesen Trends durchweg um *Zunahmen*.
- Die Trends anderer Klassen sind uneinheitlich. Es gibt einzelne, sehr große Klassen, wie auch bei den Untersuchungen in Abb. 4.7 gezeigt, die auf einen zukünftigen Rückgang der Gewitterereignisse hinweisen.

4.7.4 Gemeinsames Auftreten von Gewittern, Schauern und Starkwind

Zusätzlich erfolgten Untersuchungen des *gemeinsamen* Auftretens von Gewittern, Schauern und Starkwind. Diese sind in Tab. 4.10 und Abb. 4.9 für die Aufbereitungsform *Anteil der Stationen, an denen die Kriterien* eintraten dargestellt.

Hier ist anzumerken, dass diese Variable bei *einem Kriterium* in einem Zahlenbereich zwischen 0 und 1 liegen kann. Wenn drei Kriterien verwendet werden, so ist hier maximal die Zahl 3 möglich – diese trat aber nicht auf. Die Skalierung der rechten y-Achse von Abb. 4.9 ist an den *tatsächlich* auftretenden Zahlenbereich 0...2 angepasst.

Tabelle 4.10: Untersuchung der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen. Variable: Anteil der hessischen SYNOP-Stationen, bei denen an einem Tag sowohl Gewitter- als auch Schauer- und Starkwind-relevante SYNOP-ww-Meldungsgruppen verzeichnet wurden. Zeitraum: Sommer (JJA) 1951–2100. Modell: MPI-ESM, Lauf 1; 1951–2000: 20C-Daten; 2001–2100: Projektion angetrieben mit Szenario RCP8.5. Zeile *SumAnz*: Anzahl der Tage dieser Klasse im Gesamtzeitraum. Zeile *PrMit*: Mittelwert des Prediktanden (Anteil der Stationen, für die gilt „alle drei SYNOP Kriterium an diesem Tag erfüllt“) für diese Klasse, bestimmt aus der Analyse im Gegenwarts-klima. Zeile *P80_K*: Indikator ob das 80-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *P90_K*: Indikator ob das 90-Perzentil des Wertebereichs überboten (+) wird. Zeile *Trend*: Trend in Einheiten der prozentualen Häufigkeit.

	KlaMuKo-Klasse									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>SumAnz</i>	2925	27	150	6	88	381	921	3188	4561	1461
<i>PrMit</i>	0,1	2,0	0,2	1,7	0,1	1,6	0,0	0,9	0,4	1,3
<i>P80_K</i>										+
<i>P90_K</i>										
<i>Trend</i>	2,9	0,2	0,6	0,0	0,6	-0,4	0,9	-3,1	-0,1	-1,6

Die KlaMuKo-Resultate für diese Untersuchung sind wie folgt einzuschätzen:

- Es gibt keine „klassische Extremklasse“ in der nur Fälle enthalten sind, bei denen alle drei Kriterien (Gewitter, Schauer und Starkwind) erfüllt sind. Diese hätte den Mittelwert 3 – identifiziert wurde aber eine Klasse (Nr. 2) deren Mittelwert 2,0 ist.
- Klassen mit relativ hohem Anteil von Tagen, an denen die drei Kriterien eintraten, sind 4, 6 und 10.
- Die gefundenen Trendentwicklungen sind in der Regel schwach – nur Klasse 1 hat einen Zunahmetrend von rund 3 Prozentpunkten und Klasse 7 hat einen Abnahmetrend von rund 3 Prozentpunkten. Beide stehen jedoch für Wettersituationen, in denen das gemeinsame Auftreten von Gewittern, Schauern und Starkwind relativ selten ist.
- Klassen 1, 8, und 9 können ebenfalls schwerlich zu den Extremklassen gerechnet werden, da sie mit 3000 und mehr Mitgliedern eher das mittlere Verhalten beschreiben.

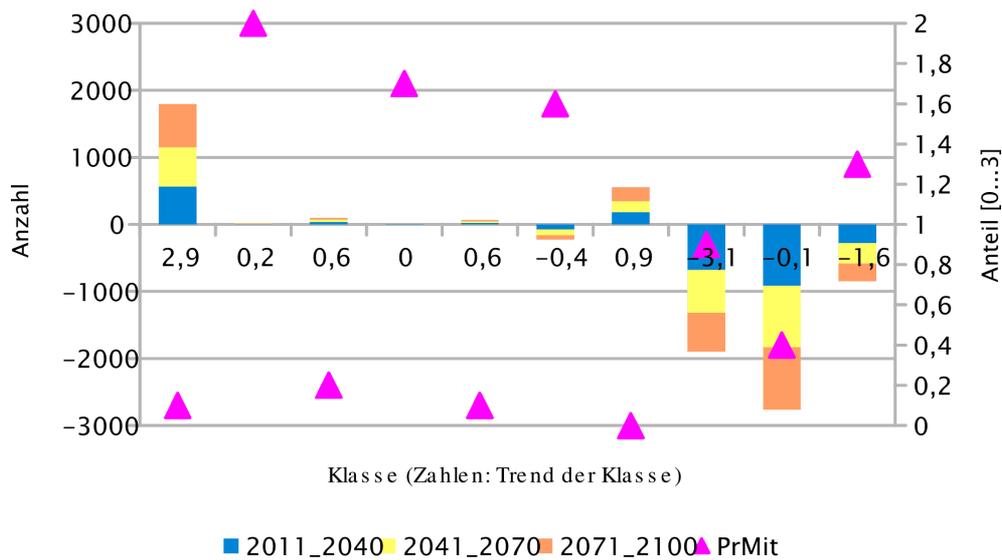


Abbildung 4.9: Trenddiagramm mit den klassenspezifischen Änderungen der KlaMuKo-Klassen zu verschiedenen Zeithorizonten (farbige Stapelbalken – Bezug zur **linken** Ordinate), den klassenspezifischen Mittelwerten des Prediktanden (Dreiecke – Bezug zur **rechten** Ordinate). Die Einträge auf der Abszisse bezeichnen den in Prozentpunkten ausgedrückten Trend (s. Erläuterungen zur Tab. 4.1). Prediktand: Anteil der SYNOP-Stationen in Hessen, für die gilt: „alle drei SYNOP Kriterium an diesem Tag erfüllt“. Jahreszeit: Sommer (JJA). Datenquelle: MPI-ESM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5.

- Die „Kandidatenklasse“ 2 (s.o.) besitzt einen ausgeprägten, hohen Anteil von Tagen mit Gewittern, Schauern und Starkwind. Eine zeitliche Entwicklung ist jedoch für diese Klassen aus den Klimasimulationen praktisch nicht nachzuweisen.
- Weitere „Kandidatenklassen“ 4 und 6 besitzen ebenfalls keinen nennenswerten Trend.
- Die einzige Klasse sowohl mit einem gewissen Extrempotenzial als auch einem Änderungsbefund ist die Klasse 10. Allerdings steht sie für relativ viele Fälle und der Trend von rund $-1,5$ ist nicht sehr stark. Sie ist in Tab. 4.10 in hellem Rotton eingefärbt.

5 Zusammenfassung

5.1 Entwicklungsstufen des Verfahrens – Beschreibung des Gegenwartsklimas

Im Vorhaben *Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse*, zu dem dieser Bericht vorgelegt wird, geht es um bestimmte meteorologische Extreme, die in besonderem Maße mit konvektiven Ereignissen im Sommer assoziiert. In der ersten Phase des Vorhabens wurde zunächst die Prozess-Identifikation erweitert. Wie in Abschnitt 2 dargelegt, erfolgte eine vertiefte Analyse von SYNOP-Daten, d.h., in hoher zeitlicher Dichte erhobener Augenbeobachtungen. Ziel in dieser Phase war es, eine Verbesserung der Möglichkeiten, aus den SYNOP-Daten Aussagen zum Auftreten von Gewittern und Starkwind zu erwirken. Mit den so erzeugten Zeitreihen des Auftretens von Indikatoren für konvektive Ereignisse erfolgten Analysen, welches Potenzials diese Zeitreihen besitzen, als Zielgröße für das KlaMuKo-Verfahren (KLAssifikation durch MUltiple KORrelation) zu dienen. Mit ihm wird angestrebt, Klassen zu bilden, in denen sich extreme Zustände der Atmosphäre auf der großräumigen Skala wiederfinden, die ihrerseits eine starke Assoziation mit den konvektiven Ereignissen in der Region Hessen besitzen. Für die „Klimatologie der großräumigen Skala“ werden Reanalyse-Daten verwendet.

Es ist festzustellen, dass durch den Einsatz eines Prototyps des KlaMuKo-Verfahrens, wie er am Anfang des Vorhabens existierte bereits wichtige Ziele erreicht wurden:

- relativ gute Aufspaltung in z.T. extreme Klassen
- relativ hohe Korrelationen zwischen den per Screening-Analyse selektierten großräumigen Feldern und der Zielgröße (Zeitreihen des Auftretens der regionalen konvektiven Ereignisse)

Zu den Charakteristika des KlaMuKo-Verfahrens gehört, dass es Klassen mit sehr unterschiedlichen Besetzungszahlen bildet: Relativ kleine Klassen, die extreme Zustände widerspiegeln und relativ große Klassen, die tendenziell den mittleren klimatischen Zustand widerspiegeln.

Bezüglich der Aufbereitung der zu untersuchenden Daten der SYNOP-Stationen wurde gefunden, dass für Auswertungen ein alternativer Schritt sinnvoll sein kann: Bildung von Zeitreihen des Stationsanteils. In diesen wird beschrieben, bei wie vielen der vorliegenden Meldungen der SYNOP-Stationen

an einem Tag ein gewähltes Kriterium, beispielsweise das Auftreten von Gewittern, erfüllt ist. Vielfach sind durch eine solche Aufbereitung höhere multiple Korrelationen erreichbar, als mit einer Binarisierung, d.h. der Vergabe einer Kennung 0 oder 1 in Abhängigkeit davon, ob das Kriterium auftrat oder nicht.

Das KlaMuKo-Verfahren wurde im Zuge einer voraus gegangenen Machbarkeitsstudie [SPEKAT et al. \(2013a\)](#) mit Blick auf die zu analysierenden konvektiven Ereignisse zu einer Prototyp-Version entwickelt. Im Rahmen der ersten Phase des Vorhabens *Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse* erfolgten umfangreiche Weiterentwicklungen des KlaMuKo-Verfahrens. Dies ist in den Abschnitten [3.2.2](#) und [3.2.3](#) beschrieben. Als Stichworte seien hier genannt: (i) Der so genannte summarische Prediktor, der die Eigenschaften mehrerer großräumiger Felder in sich vereinigt und (ii) eine Novellierung der Bestimmung der Startpartition; dies ist die „Keimzelle“, auf der KlaMuKo seine Zuordnungen aufbaut, wobei die Strategie zur Findung maximal unterschiedlicher Tage weiter verbessert wurde.

Es erfolgten Testläufe mit SYNOP-Daten als Zielgrößen (Prediktanden). Mit Blick auf die konvektiven Ereignisse konzentrierten sich danach weitere Entwicklungsschritte auf die Vergrößerung des Bestands an potenziellen Prediktoren. Diese großräumigen Feldgrößen der unteren, mittleren und oberen Atmosphäre bilden einen adäquaten Pool und mit diesem wird das Screening-Verfahren in die Lage versetzt, die Charakteristika der konvektiven Ereignisse besser zu erfassen. Diese Erweiterung verlief in zwei Teilen: Felder der oberen Atmosphäre wurden in der ersten Vorhabensphase (s. Abschnitt [3.2.1](#)) aufbereitet und dem Verfahren zur Verfügung gestellt. Weitere dynamische und thermische Atmosphärenfelder mit Bezug zu vertikaler Labilität kamen in der zweiten Vorhabensphase (s. Abschnitt [B.2](#)) hinzu.

Mit einer Vergleichsuntersuchung wurde getestet, wie sich der vergrößerte Bestand an potenziellen Prediktoren auf die Screening-Selektion der relevanten Prediktoren für die zu beschreibenden *regionalen meteorologischen Parameter*, also Prediktanden wie Maximumtemperatur, Niederschlag, Dampfdruck, Wind etc. sowie auf *SYNOP-Daten-basierte Indikatoren für Gewitter, Schauer und Starkwind* auswirkt¹⁾. Es wurde herausgearbeitet, welche der potenziellen Prediktoren bevorzugt für die einzelnen regionalen meteorologischen Parameter selektiert werden. Dies ist in Abschnitt [C](#) beschrieben. In Abschnitt [C.9](#) finden sich analoge Betrachtungen zu den SYNOP-basierten Indikatoren.

Bei den Ergebnissen ist hervorzuheben, dass die zur Beschreibung relevanten Prediktorenkombinationen für die einzelnen Prediktanden sehr unterschiedlich sind. Zum Vergleich: Das statistische Regionalisierungsverfahren WETTREG verknüpft ebenfalls großräumige Felder der freien Atmosphäre und ihre Muster mit regionalen meteorologischen Parametern. Dafür wird eine standardisierte, *relativ geringe* Zahl von Prediktoren verwendet, denn das *mittlere Verhalten* der Atmosphäre und die Veränderlichkeit dieses mittleren Verhaltens

¹⁾Ausführungen in Anhang [B](#) und [D](#) veranschaulichen den Zuwachs an potenziellen Prediktoren im Laufe des Vorhabens sowie die Fähigkeit des untersuchten Klimamodells, die untersuchten atmosphärischen Grundgrößen Temperatur, Geopotenzial und Feuchte zu simulieren.

sind bei WETTREG im Fokus. KlaMuKo hingegen zielt auf das *Extremverhalten* ab. Dafür ist ein umfangreicherer Pool von Prediktoren notwendig. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der ersten Projektphase ist, dass es keine Prediktorfelder gibt, die für *alle* meteorologischen Parameter hohe Relevanz besitzen. Außerdem konnten Felder identifiziert werden, die für keinen der Prediktanden bedeutungsvoll sind.

Alle vorstehend geschilderten Aspekte des Vorhabens zielen auf die Entwicklung eines Verfahrens ab, das konvektive Systeme und ähnliche folgenreiche atmosphärische Ereignisse im *Klima der Gegenwart* charakterisieren kann. Dies ist ein diagnostischer Schritt. Er dient dazu, eine Basis für die weiteren Untersuchungen zu etablieren.

5.2 Entwicklungen im zukünftigen Klima

Wie in Abschnitt 4.7 beschrieben, ging es in der zweiten Projektphase auch um Extrem-Charakteristika des zukünftigen Klimas. Dazu wurde eine Wiedererkennungsstrategie eingesetzt, deren Kern ist, Simulationsdaten eines großräumigen Zirkulationsmodells für den gegenwärtigen und den projizierten zukünftigen Klimazustand zu analysieren. Der Weg führt über die Ermittlung, wie häufig die charakteristischen Muster des Gegenwartsklima in den Simulationsdaten auftreten. Aus den so bestimmten Häufigkeitsverteilungen lassen sich Trendentwicklungen der einzelnen Muster berechnen.

Es wurden Klimasimulationen des Modell MPI-ESM Lauf 1 und 2 für den Zeitraum 1951–2100 verwendet. Der Antrieb für den Zukunftszeitraum 2001–2100 war dabei das Szenario RCP8.5. Für folgende meteorologische Größen wurden Analysen der Häufigkeit und der simulierten Häufigkeitsveränderungen von KlaMuKo-Klassen *für den Sommer* durchgeführt:

- Maximumtemperatur
- Auftreten von Niederschlagsmengen über 10mm/Tag
- Windgeschwindigkeit, Schwellwertüberschreitung der Windgeschwindigkeit von 8 m/s im Tagesmittel und von 13 m/s im Stundenmittel
- Auftreten von Gewittern an einem Tag
- Gemeinsames Auftreten von Gewittern, Schauern und Starkwind an einem Tag

KlaMuKo erzeugt, wie erwähnt, sowohl Klassen, die eher den Mittelzustand beschreiben als auch solche, die Extreme beschreiben. Beide Arten von Klassen werden auch in den Projektionen identifiziert – einige von ihnen zudem mit Trendentwicklungen. Mit Hilfe eines dreiteiligen Kriteriums wurden relevante Extrem-Klassen identifiziert:

- Klassenmittelwert ist besonders hoch

- Klasse verfügt über einen gut entwickelten Trend
- Klasse hat *hinreichend wenige* Mitglieder, d.h., neigt dazu, Extreme und nicht den klimatischen Mittelzustand darzustellen.

Es sollen kurz die Erkenntnisse für die o.e. meteorologischen Größen zusammengefasst werden. Die übergeordnete Beobachtung ist, dass das dreiteilige Kriterium für Extrem-Klassen nur selten erfüllt ist. Zudem ist die *Trendstärke* bei Extrem-Klassen und bei Klassen, die eher den mittleren Zustand beschreiben unterschiedlich. Erstere zeigen oft gar keine oder nur geringe zeitliche Entwicklungen, während Letztere durchaus deutliche Trends haben können. Eine Beobachtung für die betrachteten meteorologischen Größen bezüglich des *Trendvorzeichens* ist: Wenn Trends (auch schwache) auftreten, so sind dies überwiegend Abnahmen.

Maximumtemperatur

Diese Größe gehört im Grunde nicht zum Kern des Vorhabens, ist aber wegen ihres ausgeprägten Verhaltens einen Art „Lackmustest“ für die Fähigkeit des KlaMuKo-Verfahrens, extreme Klassen und deren Trends zu identifizieren.

Es werden in der Tat sowohl sehr warme als auch sehr kalte Klassen gefunden, die zudem ausgeprägte Zunahmetrends (warme Klassen) bzw. Abnahmetrends (kalte Klassen) zeigen. Die ist in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung aus anderen Untersuchungen.

Niederschlag über 10mm/Tag

Ein Zutreffen der drei Identifikationskriterien für Extrem-Klassen ist in erster Näherung nicht gegeben. Wenn die Kriterien bezüglich der Anzahl der Klassenmitglieder weniger streng angewendet werden, werden Klassen als „Kandidaten für Extremklassen“ identifiziert. Diese besitzen aber relativ viele Mitglieder und stehen am Übergang von Extremen und dem mittleren Klimazustand.

Die Trends sind daher nicht hoch belastbar, weisen aber, unter diesem Vorbehalt, auf sommerlichen Rückgang der Extreme hin.

Wind

Extremklassen mit entsprechendem Trend treten nur in wenigen Untersuchungen auf. Extremklassen mit geringer belastbaren Trends werden zwar identifiziert, besitzen aber relativ viele Mitglieder und stehen am Übergang von Extremen und dem mittleren Klimazustand. Den identifizierten „Kandidaten“-Klassen ist gemeinsam, dass sie – unter den erwähnten Vorbehalten – auf einen leichten Rückgang der Extreme im Sommer hinweisen.

Gewitter

Hier ist die wichtigste Tatsache, dass bei Klassen mit relativ hohem Anteil an Gewittertagen nur selten deutliche Trends gefunden werden. Eine Erklärung dafür ist, dass die Prediktoren für das Auftreten von Gewitter oft Labilitätsindizes sind. Diese wiederum stehen in enger Verbindung mit Feuchtegrößen. Zwei in Anhang **D** und **E** dokumentierte Zusatzuntersuchungen zeigen:

- Insbesondere im Bereich der hohen Feuchtwerte gibt es deutliche Häufigkeitsabweichungen zwischen den Ergebnissen des verwendeten Klimamodells und den Reanalysen. Diese Auffälligkeit ist bezüglich der Feuchte ein Hinweis auf die suboptimale Reproduktion des tatsächlichen Atmosphärenverhaltens durch das Klimamodell.
- Bei den Feldern der Temperatur und der Feuchte sind zudem kleine Unterschiede im Wertenniveau zwischen den Reanalysen von NCAR (in der Machbarkeitsstudie verwendet) und NCAR2 (in diesem Vorhaben verwendet) zu verzeichnen.
- Einige Labilitätsindizes besitzen keine zeitlichen Trends; dies kann sich auf die Trendentwicklung der KlaMuKo-Gewitterklassen „vererben“.

Gemeinsames Auftreten von Gewittern, Schauern und Starkwind an einem Tag

Hier ist ebenfalls bedeutungsvoll, dass bei Klassen mit relativ hohem Anteil an Tagen mit Gewitter, Schauern und Starkwind nur selten deutliche Trends gefunden werden. Werden Extremklassen gefunden so sind diese nur reduziert belastbar, da sie relativ groß sind und nur bedingt Extremzustände beschreiben.

5.3 Fazit

Es ist festzustellen, dass mit der Nutzung des KlaMuKo-Verfahrens, angewendet auf die Klimabedingungen der Gegenwart, die Zielgrößen (Prediktanden) zum Teil überraschend gut beschrieben werden können. Bei den Prediktanden Temperatur und Wind sind multiple Korrelationen mit den selektierten Prediktoren von 0,8 und weit darüber erreichbar. Auch multiple Korrelationen in der Größenordnung von 0,5 zwischen dem Prediktanden „Niederschlag über 10mm/Tag“ und den selektierten Prediktoren sind recht hoch. Zwar gehen die Beträge dieser Korrelationen mit zunehmender „Extremitätsstufe“ beim Niederschlag zurück, aber eine multiple Korrelation von 0,3 zwischen der der KlaMuKo-Klassifikation und dem Niederschlag über 30mm/Tag ist ebenfalls beachtlich.

Werden Indikatoren für Gewitter, Schauer oder Starkwind als Prediktanden analysiert (Quelle: SYNOP-Daten), so finden sich für die Klimabedingungen der Gegenwart ebenfalls relativ hohe multiple Korrelationen zwischen diesen Prediktanden und den von KlaMuKo selektierten Prediktoren von 0,5 und mehr.

Das heißt, KlaMuKo ist in der Lage, für den gegenwärtigen Klimazustand effizient und leistungsfähig zu arbeiten. Auch bei Größen, die mit sommerlichen konvektiven Ereignissen in Zusammenhang stehen.

Für die Betrachtung des Zukunftsklimas sind im Lichte der Ergebnisse des Vorhabens folgende Leitgedanken wichtig:

- Werden die anhand des Klimas der Gegenwart von KlaMuKo entwickelten Klassen auch in den Daten eines Klimamodells gefunden?
Dies ist der Fall.
- Zeichnen sich Entwicklungen in der Häufigkeit der KlaMuKo-Klassen ab? Dies ist nur bei einigen Klassen der Fall; allerdings handelt es sich dabei in der überwiegenden Mehrheit nicht um „echte“ Extremklassen, sondern um solche, die mit dem mittleren Verhalten des Klimas assoziiert sind. Hier liegt aber nicht die „Spezialisierung“ von KlaMuKo. Mit anderen Worten: Es tritt häufig auf, dass kleine, extreme Klassen keinen deutlichen Trend besitzen. Sofern (z.T. relativ schwache) Entwicklungen in den Extremklassen gefunden werden, deuten sie bei den untersuchten Größen überwiegend auf Abnahmen hin.
- Welche Einflussgrößen für Trends der Häufigkeit von KlaMuKo gibt es? Hier ist zu beachten, inwieweit das in diesem Vorhaben eingesetzte MPI-ESM-Klimamodell die verwendeten Prediktoren reproduzieren kann. Je nach Prediktand (Starkniederschlag, Gewittertage, etc.) werden unterschiedliche Felder aus der freien Atmosphäre in KlaMuKo verwendet. Beim Geopotenzial ist, mit einem einfachen Test befunden, die Reproduktion von Werteniveau und Häufigkeitsverteilung zwischen Reanalysen und Klimamodell sehr gut. Temperaturfelder werden zwar bezüglich der Häufigkeitsverteilung von MPI-ESM und den Reanalysen ähnlich wiedergegeben, aber die Werteniveaus weichen leicht voneinander ab. Feuchtefelder besitzen das Problem, dass die Häufigkeitsverteilungen im Bereich der niedrigen Werte zwar gut zwischen MPI-ESM und den Reanalysen übereinstimmen, aber im MPI-ESM-Modell zu viele Tage mit sehr hoher Feuchte simuliert werden. Für viele Prediktanden ist dies nur von geringer Bedeutung, denn die Screening-Analyse identifiziert eine Mischung aus Größen mit Bezug zu Geopotential, Temperatur und Feuchte. Etwas anders stellt sich der Sachverhalt beim Auftreten von Gewittern dar – hier wird in überwiegendem Maße auf Labilitätsmaße zurückgegriffen, in denen die „Feuchteproblematik“ relativ stark zum Tragen kommt.
- Wie belastbar sind die Aussagen zu Trends bei den Extremklassen? Es ist auffällig, dass das gemeinsame Auftreten von ausgeprägtem Trend, extremem Klassenmittelwert und „adäquater/nicht zu hoher Klassenmitgliederzahl“ relativ selten ist. Zwar sind Abnahmetrends für sommerlichen Starkregen, Starkwind und Gewittertätigkeit aus den Analysen erkennbar – diese sind jedoch unter dem Vorbehalt der Belastbarkeit zu sehen.

Literaturverzeichnis

- AMBAUM, M., 2010: Thermal Physics of the Atmosphere – Wiley-Blackwell.
- BAUMGART, S., F. KREIENKAMP, A. SPEKAT, W. ENKE, 2012: Weiterentwicklung von WETTREG zur Erstellung von regionalisierten Szenarios auf der Basis der Ergebnisse des ENSEMBLES-Projektes. Bericht, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Fachzentrums Klimawandel Hessen im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG).
- CHAUDHURI, S., A. MIDDEY, 2012: A composite stability index for dichotomous forecast of thunderstorms. – Theor. Appl. Climatol. **110**, 457–469, DOI 10.1007/s00704-012-0640-z.
- HESS, P., H. BREZOWSKY, 1952: Katalog der Großwetterlagen Europas (Catalog of the European Large Scale Weather Types). Bericht, Ber. Dt. Wetterd. in der US-Zone 33, Bad Kissingen, Germany.
- IPCC, 1990: Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, Melbourne.
- IPCC, 1996a: Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses – Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.
- IPCC, 1996b: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, Oakleigh.
- IPCC, 2001a: Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, New York, Oakleigh, Madrid, Cape Town.
- IPCC, 2001b: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, U.K. und New York, USA.
- IPCC, 2007a: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change Number ISBN 978 0521 70598-1. – Cambridge University Press.
- IPCC, 2007b: Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Number ISBN: 978-0-521-70598-1. – Cambridge University Press.
- IPCC, 2007c: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996.
- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report (SREX) of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582.
- IPCC, 2013a: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Bericht, Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 1535 pp, available for download from www.ipcc.ch.
- IPCC, 2013b: Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policy-makers. Bericht, Intergovernmental Panel On Climate Change.
- KREIENKAMP, F., A. SPEKAT, W. ENKE, 2010: Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Bericht, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- LINKE, F., F. BAUR, 1970: Meteorologisches Taschenbuch. Neue Ausgabe, Band II. 2. Auflage – Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG.
- SPEKAT, A., F. KREIENKAMP, W. ENKE, 2013a: Machbarkeitsstudie zur Abschätzung zukünftiger Extreme. Bericht, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel, Wiesbaden.
- SPEKAT, A., F. KREIENKAMP, W. ENKE, 2013b: Statistische Abschätzung zukünftiger Starkregen- und Starkwindereignisse. Bericht, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel, Wiesbaden.

WMO, 1988: Technical Regulations Volume I: General Meteorological Standards and Recommended Practices. Basic Documents No. 2. WMO Reports No. 49. Bericht, World Meteorological Organization.

WMO, 2009: Manual on the Global Telecommunication System Volume I (Annex III to WMO Technical Regulations) Global Aspects WMO-No. 386, 2009 Edition. Bericht, World Meteorological Organization.

WMO, 2012: Manual on the WMO Information System, 2012 edition. Bericht, World Meteorological Organization.

A Auswertung der SYNOP-Meldungen

In diesem Abschnitt werden einige technische Details der SYNOP-Meldungen sowie das Herausarbeiten von Indikatoren für Gewitter, Schauer und Starkwind vorgestellt.

A.1 Zur Verschlüsselung von meteorologischen Meldungen

Die Betreiber von Messeinrichtungen nutzen global einheitliche Schlüssel, um die erhobenen Daten und – bei Stationen mit Beobachtungspersonal – *Augenbeobachtungen* in eine numerische Form zu bringen, die über das Global Telecommunication System zeitnah verbreitet werden (Hinweise zu den Schlüsseln sind in [WMO, 1988, 2009](#), dokumentiert). Seit etwa 2010 wird die Vielzahl der Informationsquellen und Daten-Übermittlungsformen im WIS (WMO Information System, [WMO, 2012](#)) gebündelt. Die Verschlüsselungsformen sind im *WMO Report 306: Manual on Code Forms* dokumentiert¹⁾. Für die stationären synoptischen Messungen wird der so genannte Code FM 12 SYNOP verwendet.

Die Augenbeobachtungen von aktuellen Wetterbesonderheiten werden in FM 12 durch die Größe *ww* in die Meldungen eingebracht. Dies ist ein zweistelliges Zahlensystem, das die aktuell beobachteten Wetterereignisse nach ihrer Wirkung/Dringlichkeit/Bedrohung aufsteigend sortiert sind. Es ist klar, dass diese Sortierung nicht objektiv ist, aber sie stellt den Versuch dar, bedeutende und weniger bedeutende Wetterereignisse zu trennen. Gewitter haben höchste Priorität – von *ww* = 99 (starkes Gewitter mit Graupel oder Hagel in der WMO-Terminologie) bis *ww* = 91 (Gewitter in der letzten Stunde, zurzeit leichter Regen). Schauer haben die zweithöchste Priorität. Andere Ereignisse wie Regen, Schnee, Nebel oder Dunst besitzen abgestufte, niedrigere Prioritäten. Hintergrund für dieses Vorgehen ist, dass immer nur *ein ww* gemeldet wird – mit der Folge, dass dabei „niedrigrangige“ Ereignisse nicht in der Meldung erscheinen.

Die nächsten Abschnitte zeigen auf, welche Teile der SYNOP-Meldung ausgewertet werden um zu den so genannten Indikatoren für Gewitter, Schauer und Starkwind zu kommen. Dies folgt Empfehlungen der MBS2013.

¹⁾Wegen der häufigen Aktualisierungen erfolgt dies inzwischen über eine Webseite: www.wmo.int/pages/prog/www/WMOcodes.html

A.2 Das erweiterte Gewitterkriterium

Damit an einem Termin festgelegt werden kann, ob an der betreffenden Station Gewitter auftraten wird die *ww*-Kennung (s. Abschnitt A.1) ausgewertet. Das erweiterte Gewitterkriterium umfasst die Berücksichtigung der folgenden Fälle:

- *ww* liegt zwischen 91 und 99 – wie bei der Erläuterung des Schlüssels als Beispiel angegeben
- *ww* = 13: Wetterleuchten sichtbar, kein Donner gehört
- *ww* = 17: Gewitter (Donner hörbar), aber kein Niederschlag an der Station
- *ww* = 29: nach Gewitter

Ein *Gewitterindikator* wird für den Termin und die Station auf den Wert 1 gesetzt, wenn eines der oben aufgeführten Kriterien erfüllt ist.

A.3 Das erweiterte Schauerkriterium

Aus der *ww*-Kennung des SYNOP-Schlüssels werden durch das erweiterte Schauerkriterium folgenden Fälle berücksichtigt:

- *ww* liegt zwischen 80 (leichter Regenschauer) und 90 (mäßiger oder starker Hagelschauer)
- *ww* = 25: nach Regenschauer
- *ww* = 27: nach Graupel- oder Hagelschauer

Ein *Schauerindikator* wird für den Termin und die Station auf den Wert 1 gesetzt, wenn eines der oben aufgeführten Kriterien erfüllt ist.

A.4 Das erweiterte Starkwindkriterium

Hier sind Augenbeobachtungen von untergeordneter Rolle, wiewohl sie Teil des erweiterten Kriterium sind. Es werden folgende Fälle berücksichtigt:

- *ww* = 08: gut entwickelte Staub oder Sandwirbel
- *ww* = 09: Staub- oder Sandsturm im Gesichtskreis, aber nicht an der Station
- *ww* = 18: Markante Böen im Gesichtskreis, aber kein Niederschlag an der Station
- *ww* = 19: Tromben (trichterförmige Wolkenschläuche) im Gesichtskreis
- *ww* zwischen 30 und 35: Sandstürme verschiedener Intensität

- Spitzenböen (Meldungsgruppe *FX*) über 13 m/s
- 10-Minutenmittel des Windes (Meldungsgruppe *FF*) über 13 m/s

Ein *Starkwindindikator* wird für den Termin und die Station auf den Wert 1 gesetzt, wenn eines der oben aufgeführten Kriterien erfüllt ist.

Es sind einige Einschränkungen festzustellen:

1. Die Spitzenböen (*FX*) sind vor 1980 überhaupt nicht verfügbar, bis 1990 nur in sehr seltenen Ausnahmefällen und bis 2000 an weniger als 5% aller Termine. Erst nach 2001 besser sich die Verfügbarkeitssituation deutlich – dann sind die Spitzenböen nahezu überall in stündlicher Auflösung vorhanden.
2. Der 10-Minuten-Wind (*FF*) hat insbesondere vor 1980 Einschränkungen. Hier entstehen Beeinträchtigungen der Aussagekraft durch die geringere Meldefrequenz. Dies ist gravierender als bei den für Gewitter und Schauer elementaren *ww*-Meldungen, denn Windspitzen können durchaus innerhalb einer Stunde auftreten und u.U. durch das 3- oder 6-stündige Melde-soll übersehen werden. Wenn hingegen ein Gewitter oder Schauer „zwischen den Terminen“ auftrat so besteht eine Chance, dass diese durch die Angabe von *ww* = 13 oder 17 oder 29 (Gewitter, vergl. Abschnitt A.2) bzw. *ww* = 25 oder 27 (Schauer, vergl. Abschnitt A.3) erfasst werden.
3. Die Auswertungen ergaben ferner die Auffälligkeit, dass *FF* nur wenige Maxima beisteuert. Daher werden in den Jahren ohne *FX*-Daten (vor 2001, siehe Aufzählungspunkt 1.) systematisch zu wenige Starkwindtage gefunden werden.
4. Es besteht Zweifel, dass *FF* eine adäquate „Ersatzgröße“ für *FX* ist, mit der bei Nichtvorhandensein von *FX* zuverlässig die Identifikation von Windmaxima erfolgen kann. So treten im Zeitraum nach 2000, bei gemeinsamer Verfügbarkeit von *FF* und *FX* Fälle auf, bei denen *FX* über 13 m/s aber *FF* bei 4 m/s liegt. Dies stützt die Hypothese, dass mit *FF* die Starkwindfälle unterschätzt werden. Eine niedrigere Schwelle für *FF* könnte ein Ausweg sein, aber damit dürften dann auch Fälle gefunden werden, an denen tatsächlich *kein* Starkwind auftrat.
5. Es gibt zahlreiche nicht plausible Extreme in den *FF*-Daten, die vielfach durch das falsche Eingeben der Dezimalstelle oder Verwechseln mit anderen Meldegruppen des SYNOP-Schlüssels entstanden sind. Dies ist eine Konsequenz der Nutzung von SYNOP-Daten, bei der eine Qualitätskontrolle keine hohe Priorität besitzt. Einiger Auffälligkeiten, bei denen es sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit um Fehler in den Daten handelt, konnten durch Stichproben und eine einfache Maximum-Betrachtung gefunden werden.

Daher wird der Starkwindindikator unter Vorbehalt verwendet.

B Potenzielle Prediktoren

B.1 Übersicht der verfügbaren Prediktoren

In Tab. B.1 sind insgesamt 130 Einträge aufgelistet. Es handelt sich um die 99 in der ersten Phase des Vorhabens verwendeten potenziellen Prediktoren, erweitert um Prediktoren, die in der zweiten Phase erstellt wurden und vornehmlich die atmosphärische Labilität beschreiben.

Wozu ein ist ein so großer Bestand an Atmosphärenfeldern notwendig? Im Rahmen einer Screening Prozedur, die Teil von KLaMuKo ist, werden daraus diejenigen Prediktoren selektiert, die in besonders starker Verbindung zu einem Prediktanden steht. Ein Beispiel für einen Prediktanden ist die Zahl der Gewittertage, aus SYNOP-Meldungen ermittelt (s. Abschnitt A.2). Auf die Nummern der Prediktoren wird in den Kapiteln des Berichts Bezug genommen.

Hinweis: In dieser Liste sind die potenziellen Prediktoren, die im Zusammenhang mit Stabilitätsmaßen stehen und in der zweiten Vorhabensphase implementiert wurden mit einer *)-Kennung hinter der Abkürzung versehen. Information zur Bestimmung dieser aufgelisteten Prediktoren findet sich in Abschnitt B.2.

Tabelle B.1: Liste der 130 verwendeten potenziellen Prediktoren. In der dritten Spalte ist ein Kürzel mit der jeweilig verwendeten Flächen/den Flächen angegeben. Die Kennung (XX) beim Prediktor 6 (Temperatur im 1000 hPa-Niveau) zeigt an, dass dieser Prediktor zwar zur Berechnung anderer Größen eingesetzt wird, jedoch selbst nicht in den Screening-Prozess eingeht, da er quasi ein „Synonym“ für die Temperatur am Boden ist und zusätzlich diese bodennahe Größe von den GCMs nicht gut modelliert wird. Die Kennung *) zeigt an, dass diese Prediktoren erstmals seit der Ausführung dieses Vorhabens verfügbar sind.

<i>Nr.</i>	<i>Name</i>	<i>Abkürzung/Level</i>
1	Geopotenzielle Höhe	GP1000
2	Geopotenzielle Höhe	GP850
3	Geopotenzielle Höhe	GP700
4	Geopotenzielle Höhe	GP500
5	Geopotenzielle Höhe	GP250
6	Temperatur (XX)	T1000
7	Temperatur	T850
8	Temperatur	T700
9	Temperatur	T500

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

<i>Nr.</i>	<i>Name</i>	<i>Abkürzung/Level</i>
10	Temperatur	T250
11	Relative Feuchte	RF1000
12	Relative Feuchte	RF850
13	Relative Feuchte	RF700
14	Relative Feuchte	RF500
15	Relative Feuchte	RF250
16	Horizontale Differenzen	Diff N-S1000
17	Horizontale Differenzen	Diff N-S 850
18	Horizontale Differenzen	Diff N-S 700
19	Horizontale Differenzen	Diff N-S 500
20	Horizontale Differenzen	Diff N-S 250
21	Horizontale Differenzen	Diff O-W1000
22	Horizontale Differenzen	Diff O-W 850
23	Horizontale Differenzen	Diff O-W 700
24	Horizontale Differenzen	Diff O-W 500
25	Horizontale Differenzen	Diff O-W 250
26	Vorticity	Vor1000
27	Vorticity	Vor850
28	Vorticity	Vor700
29	Vorticity	Vor500
30	Vorticity	Vor250
31	Relative Topografie	Retop1000/850
32	Relative Topografie	Retop1000/700
33	Relative Topografie	Retop1000/500
34	Relative Topografie	Retop1000/250
35	Relative Topografie	Retop850/700
36	Relative Topografie	Retop700/500
37	Relative Topografie	Retop500/250
38	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff1000-850
39	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff1000-700
40	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff1000-500
41	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff1000-250
42	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff850-700
43	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff700-500
44	Vertikale Temperaturdifferenz	VTDiff500-250
45	Horizontale Stromfelddivergenz	HSD1000
46	Horizontale Stromfelddivergenz	HSD850
47	Horizontale Stromfelddivergenz	HSD700
48	Horizontale Stromfelddivergenz	HSD500
49	Windscherung	WSH1000-850
50	Windscherung	WSH1000-700
51	Windscherung	WSH1000-500
52	Windrichtung	DD1000

weiter auf der nächsten Seite

B.1 Übersicht der verfügbaren Prediktoren

Fortsetzung

<i>Nr.</i>	<i>Name</i>	<i>Abkürzung/Level</i>
53	Windrichtung	DD500
54	Betrag des Gradienten	GRAD1000
55	Betrag des Gradienten	GRAD850
56	Betrag des Gradienten	GRAD700
57	Betrag des Gradienten	GRAD500
58	Betrag des Gradienten	GRAD250
59	Absolute Feuchte	AF1000
60	Absolute Feuchte	AF850
61	Absolute Feuchte	AF700
62	Absolute Feuchte	AF500
63	Absolute Feuchte	AF250
64	Temperaturadvektion	TADV1000
65	Temperaturadvektion	TADV850
66	Temperaturadvektion	TADV700
67	Temperaturadvektion	TADV500
68	Temperaturadvektion	TADV250
69	Feuchteadvektion	FADV1000
70	Feuchteadvektion	FADV850
71	Feuchteadvektion	FADV700
72	Feuchteadvektion	FADV500
73	Feuchteadvektion	FADV250
74	u-Komp therm. Wind [m/s]	UTH1000/850
75	v-Komp therm. Wind [m/s]	VTH1000/850
76	Advektions-Indikator +W -K	ADVIND1000/850
77	u-Komp therm. Wind [m/s]	UTH850/700
78	v-Komp therm. Wind [m/s]	VTH850/700
79	Advektions-Indikator +W -K	ADVIND850/700
80	u-Komp therm. Wind [m/s]	UTH700/500
81	v-Komp therm. Wind [m/s]	VTH700/500
82	Advektions-Indikator +W -K	ADVIND700/500
83	Pseudopotenzielle Temperatur	THETA850
84	Pseudopotenzielle Temperatur	THETA700
85	Pseudopotenzielle Temperatur	THETA500
86	Pseudopotenzielle Temperatur	THETA250
87	24-stündige Geopotenzialänderung	GPDELTA1000
88	24-stündige Geopotenzialänderung	GPDELTA850
89	24-stündige Geopotenzialänderung	GPDELTA700
90	24-stündige Geopotenzialänderung	GPDELTA500
91	Isallobarischer Wind	FFISALL1000
92	Isallobarischer Wind	FFISALL850
93	Isallobarischer Wind	FFISALL700
94	Isallobarischer Wind	FFISALL500
95	Maximale Sonnenhöhe	MAXSH

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Nr.	Name	Abkürzung/Level
96	Tageslänge [Std]	TAGL
97	Approx. kurzwellige Einstrahlung	KWERF1000-850
98	Approx. kurzwellige Einstrahlung	KWERF1000-700
99	Approx. kurzwellige Einstrahlung	KWERF1000-500
100	nicht verwendet	—
101*)	Temp. dyn. Kondensationsniveau	TDYNKN1000
102*)	Temp. dyn. Kondensationsniveau	TDYNKN850
103*)	Temp. dyn. Kondensationsniveau	TDYNKN700
104*)	Temp. dyn. Kondensationsniveau	TDYNKN500
105*)	Druck dyn. Kondensationsniveau	PDYNKN1000
106*)	Druck dyn. Kondensationsniveau	PDYNKN850
107*)	Druck dyn. Kondensationsniveau	PDYNKN700
108*)	Druck dyn. Kondensationsniveau	PDYNKN500
109*)	Dampfdr. dyn. Kondensationsniveau	DDYKN1000
110*)	Dampfdr. dyn. Kondensationsniveau	DDYKN850
111*)	Dampfdr. dyn. Kondensationsniveau	DDYKN700
112*)	Dampfdr. dyn. Kondensationsniveau	DDYKN500
113*)	Mischverh. dyn. Kondensationsniveau	MRDYNKN1000
114*)	Mischverh. dyn. Kondensationsniveau	MRDYNKN850
115*)	Mischverh. dyn. Kondensationsniveau	MRDYNKN700
116*)	Mischverh. dyn. Kondensationsniveau	MRDYNKN500
117*)	Niederschlagsfähiges Wasser	PRECWATR
118*)	Gewitterindex LI	GILI
119*)	Gewitterindex TT	GITT
120*)	Gewitterindex KI	GIKI
121*)	Gewitterindex BI	GIBI
122*)	SWEAT-Index	SWEAT
123	Frontneigungswinkel	FNW
124	Showalter Index	SHW
125	Enke-Labilitätsindex	ENKELI
126	Enke-Labilitätsindex mit Feuchte	ENKELIF
127	nicht verwendet	—
128	Multipler Regressionsparameter	MRP
129*)	CAPE-Index	CAPE
130*)	CIN-Index	CIN

B.2 Labilitätsgrößen im Pool der potenziellen Prediktoren

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte die Erweiterung des Pools an Potenziellen Prediktoren in zwei Stufen. Die neu hinzugekommen Prediktoren aus der *ersten Phase* des Vorhabens sind in Abschnitt 3.2.1 beschrieben.

In der *zweiten Phase* des Vorhabens lag der Fokus einer erneuten Erweiterung des Pools auf Labilitätsmaßen und Eigenschaften des Kondensationsniveaus. In

MBS2013 wurde angeregt, in dieser Richtung verstärkt weiter zu verfahren, da zu erwarten sei, Labilitätsmaße und starke konvektive Ereignisse haben Zusammenhänge (unterstützt von einigen Fachartikeln, z.B. CHAUDHURI und MIDDEY, 2012). Zudem galt es, zu überprüfen, welche Relevanz Indizes, die sich bei konvektiven Ereignissen in den Tropen bewährt haben, für analoge Ereignisse in den mittleren Breiten besitzen.

In den folgenden Unterabschnitten werden die neu erarbeiteten und aufbereiteten Maße vorgestellt. In einigen Fällen stellen sie Approximationen dar, da sie nur aus der dynamischen, thermischen und hygri-schen Information der vorhandenen Daten in den Flächen 1000, 850, 700, 500 und 250 hPa bestimmt werden konnten. Die vollständige Liste der verwendeten potenziellen Prediktoren findet sich in Anhang B – in Tab. B.1 sind die Erweiterungen im Zuge der zweiten Phase des Vorhabens gekennzeichnet. In den Folgeabschnitten wird auf die dort ausgewiesenen Prediktoren-Nummern Bezug genommen.

B.2.1 Physikalische Eigenschaften im Kondensationsniveau

Eine wichtige Quelle meteorologischer Information zu Labilität und Stabilität der Atmosphäre stellt das Konzept des Kondensationsniveaus dar. Dazu wird angenommen, ein Luftpaket startet eine Vertikalbewegung von einem Grundniveau z_{GN} (z.B. 1000 hPa oder 850 hPa). Es besitzt eine Ausgangstemperatur T_{GN} und -feuchte (RH_{GN} , relative Feuchte). Bei seiner Hebung ist es der Adiabasie unterworfen. In Grundzügen: Wenn ein Luftpaket aufsteigt, dehnt es sich auf Grund des geringer werdenden Umgebungsdrucks aus. Die innere (thermische) Energie, um diese „Ausdehnungsarbeit“ zu verrichten, wird verringert. Ergebnis ist eine Abkühlung des expandierenden Luftpakets. In grober Näherung beträgt die so begründete *adiabatische* Abnahmerate der Temperatur rund 1K pro 100m. Diese Gesetzmäßigkeit gilt aber nur, so lange kein Phasenübergang des im Luftvolumen enthaltenen Wasserdampfs erfolgt, das heißt, so lange die Luft bezüglich des Wasserdampfgehalts nicht gesättigt ist. Die Temperatur, bei der Sättigung eintritt, heißt auch Taupunkt T_d . Zu ihrer Berechnung ist die Bestimmung des temperaturabhängigen Dampfdrucks E notwendig. Dieser wird nach folgender Formel (auch als Magnus-Formel bekannt) berechnet

$$E_{GN} = 6,107 \cdot 10^{\frac{17,269 \cdot T_{GN}}{237,3 + T_{GN}}} \quad (B.1)$$

mit T_{GN} = Temperatur im Grundniveau in Kelvin (also unter Abzug von 273,15).

Des Weiteren wird die relative Feuchte im Grundniveau (RH_{GN}) benötigt, mit der ein „Sättigungsdefizit“ E_{sGN} bestimmt wird

$$E_{sGN} = RH_{GN} \cdot 100 \quad (B.2)$$

Der Taupunkt T_{dGN} mit Bezug zu einem Grundniveau GN , z.B. 1000 hPa oder 850 hPa, bestimmt sich nach

$$T_{dGN} = 31,55 \cdot \frac{\log \left[\frac{E_sGN}{6,107} \right]}{2,3026 - 0,1342 \cdot \log \left[\frac{E_sGN}{6,107} \right]} \quad (B.3)$$

Mit dieser Information lassen sich verschiedene physikalische Größen im dynamischen Kondensationsniveau, also derjenigen Höhe, in der Kondensation eintritt, bestimmen. Zunächst ist die Temperatur im Kondensationsniveau T_{KNGN} mit Bezug zu einem Grundniveau GN zu nennen

$$T_{KNGN} = T_{dGN} - (0,001296 \cdot T_{dGN} + 0,1963) \cdot (T_{GN} - T_{dGN}) \quad (B.4)$$

mit $T_{GN} :=$ Temperatur im Grundniveau (z.B. 1000 hPa oder 850 hPa) in Kelvin.

T_{KNGN} wird in der Datenaufbereitung mit den verfügbaren Temperatur- und Feuchtwerten in 1000, 850, 700 und 500 hPa berechnet und den potenziellen Prediktoren 101–104 (s. Tab. B.1) zugeordnet.

Des Weiteren erfolgt die Bestimmung des Geopotenzials im Kondensationsniveau P_{KNGN} mit Bezug zu einem Grundniveau GN

$$P_{KNGN} = T_{KNGN} + 273,15 \cdot \frac{z_{GN}^{0,2857}}{[T_{GN} + 273,15]^{\frac{1}{0,2857}}} \quad (B.5)$$

mit $z_{GN} :=$ Geopotenzial des Grundniveaus, auf das P_{KNGN} bezogen ist sowie $T_{GN} :=$ Temperatur im Grundniveau (z.B. 1000 hPa oder 850 hPa) in Kelvin.

P_{KNGN} wird in der Datenaufbereitung mit den verfügbaren Temperaturwerten in 1000, 850, 700 und 500 hPa berechnet und den potenziellen Prediktoren 105–108 (s. Tab. B.1) zugeordnet.

Der Partialdruck des Wasserdampfes (kurz: Dampfdruck, DD_{KNGN}) im dynamischen Kondensationsniveau mit Bezug zu einem Grundniveau GN bestimmt sich nach

$$DD_{KNGN} = 6,107 \cdot 10^{\frac{17,269 \cdot T_{KNGN}}{237,3 + T_{KNGN}}} \quad (B.6)$$

mit $T_{GN} :=$ Temperatur im Grundniveau (z.B. 1000 hPa oder 850 hPa) in Kelvin.

DD_{KNGN} wird in der Datenaufbereitung mit den verfügbaren Temperaturwerten in 1000, 850, 700 und 500 hPa berechnet und den potenziellen Prediktoren 109–112 (s. Tab. B.1) zugeordnet.

Schließlich erfolgt die Berechnung des Mischungsverhältnisses im Kondensationsniveau MR_{KNGN} mit Bezug auf ein Grundniveau GN

$$MR_{KNGN} = 0,622 \cdot \frac{DD_{KNGN}}{P_{KNGN} - DD_{KNGN}} \quad (B.7)$$

MR_{KNGN} wird in der Datenaufbereitung mit den verfügbaren Temperaturwerten in 1000, 850, 700 und 500 hPa berechnet und den potenziellen Prediktoren 113–116 (s. Tab. B.1) zugeordnet.

B.2.2 Niederschlagsfähiges Wasser

Hinter dieser Größe steht das Konzept, für eine vertikale Säule der Atmosphäre zu ermitteln, wie viel Wasserdampf in ihr enthalten und zum Ausfällen als Niederschlag geeignet ist. Im Vorhaben wurde eine Approximation verwendet, da die vollständige Berechnung physikalische Information aus einer Vielzahl zusätzlicher Atmosphärenflächen benötigen würde.

Als Aufbereitungsschritt wird der Sättigungsdampfdruck über Wasser E_w mit Hilfe der Temperatur T berechnet

$$E_w = \exp \left[\frac{-6096,9385}{T} + 16,635794 - 2,711193e^{-2} \cdot T + 1,673952e^{-5} \cdot T^2 + 2,433502 \cdot \log T \right] \quad (B.8)$$

Danach wird für jede verfügbare Information aus 5 Flächen eine Dampfdruckgröße bestimmt

$$y = \log \left[\frac{RF(i) \cdot E_w(i)}{100 \cdot 6,11213} \right] \quad (B.9)$$

mit $i :=$ eine der 5 Flächen 1000, 850, 700, 500 oder 250 hPa

$RF(i) :=$ Relative Feuchte in einer der i Flächen

$E_w(i) :=$ Sättigungsdampfdruck über Wasser in einer der i Flächen

Mit einer Reihenentwicklung erfolgt darauf die Bestimmung des Taupunkts t_d

$$t_d = \alpha \cdot y + \beta \cdot y^2 + \gamma \cdot y^3 + \delta \cdot y^4 \quad (B.10)$$

mit $\alpha := 13,715$ (Wasser) bzw. $13,7204$ (Eis)

$\beta := 8,4262 \cdot e^{-1}$ (Wasser) bzw. $7,36631 \cdot e^{-1}$ (Eis)

$\gamma := 1,9048 \cdot e^{-2}$ (Wasser) bzw. $3,32136 \cdot e^{-2}$ (Eis)

$\delta := 7,8158 \cdot e^{-3}$ (Wasser) bzw. $7,78591 \cdot e^{-3}$ (Eis)

Danach wird das Mischungsverhältnis MR berechnet

$$MR(j) = 0,622 \cdot t_d \quad (B.11)$$

mit $j :=$ eine der Flächen 1000, 850, 700, 500 oder 250 hPa

Zudem wird für jede der vier Schichten $L(j)$ (1000/850, 850/700, 700/500 oder 500/250 hPa) das mittlere Mischungsverhältnis \overline{MR} und die mittlere Druckdifferenz $\overline{\Delta PP}$ benötigt

$$\overline{MR(j)} = \frac{MR(i-1) + MR(i)}{2} \quad ; \quad \overline{\Delta PP(j)} = \frac{PP(i-1) + PP(i)}{2}$$

mit $j :=$ eine der vier Schichten 1000/850, 850/700, 700/500 oder 500/250 hPa

$i :=$ eine der fünf Flächen 1000, 850, 700, 500 oder 250 hPa

Schließlich wird das niederschlagsfähige Wasser PW aufsummiert

$$PW = - \sum_{j=1}^4 \left[\frac{1}{9,81} \cdot \overline{MR(j)} \cdot \overline{\Delta PP(j)} \right] \cdot 0,1 \quad (B.12)$$

mit $j :=$ eine der vier Schichten 1000/850, 850/700, 700/500 oder 500/250 hPa

B.2.3 Gewitterindex LI

LI bezeichnet den so genannten Lifted Index. Ihm liegt zu Grunde, dass ein Luftpaket trockenadiabatisch bis zum Kondensationsniveau und danach feuchtadiabatisch auf 500 hPa gehoben wird und dessen so entstandene Temperatur mit der tatsächlich in 500 hPa herrschenden Temperatur verglichen wird. [CHAUDHURI und MIDDEY \(2012\)](#) geben einen Bereich von $-12 \leq LI \leq -5$ für starke Gewitter an.

Die Höhe des Kondensationsniveaus wird nach Gleichung [B.5](#) mit $GN = 1000$ hPa bestimmt. Oberhalb dessen steigt das Luftpaket feuchtadiabatisch weiter bis 500 hPa auf. Der vertikale feuchtadiabatische Temperaturgradient γ_f kann als eine „Modifikation des trockenadiabatischen Gradienten“ γ_{tr} von rund $-1^\circ/100\text{m}$ erachtet werden und beträgt

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_f = \gamma_f = -0,973 \cdot \beta \quad (B.13)$$

mit $\beta = \frac{p+a}{p+b}$ dem Feuchtadiabatenbeiwert (p Bezugs-Geopotenzialfläche, a und b Kondensations-abhängige Temperaturfunktionen). Die Herleitung von β ist [LINKE und BAUR \(1970\)](#) auf S. 274f zu entnehmen. Dort findet sich auch eine Tabelle, die für den Temperaturbereich -70 bis $+30^\circ\text{C}$ die Temperaturfunktionen a und b für die Bezugsniveaus 1000, 700, 500, 300, 200 und 100 hPa ausweist. Im Fall von LI ist das Niveau der approximierten Mitte zwischen Boden und 500 hPa, also 700 hPa zu wählen.

Für stark negative Temperaturwerte ist β nahe 1 – es steht dann ja nur sehr wenig kondensationsfähiges Wasser zur Verfügung. Der Einfluss der Kondensationswärme nimmt aber für höhere Temperaturwerte deutlich zu. So ist β , bezogen auf die Verhältnisse in 700 hPa bei einer Temperatur von 0°C rund 0,6 und bei (eher den extrem warmen Luftmassen zuzurechnenden) 15°C in 700 hPa liegt β bei beachtlichen 0,4 also eine Veränderung des trockenadiabatischen Temperaturgradienten um 60%!

Damit bestimmt sich LI zu

$$LI = T_{500} - \gamma_{tr} \cdot (P_{KNGN} - GP_{1000}) - \gamma_f \cdot (GP_{500} - P_{KNGN}) \quad (B.14)$$

mit $T_{500} :=$ Temperatur im 500 hPa-Niveau; $GP_{1000} :=$ Geopotenzial des 1000 hPa-Niveaus; $GP_{500} :=$ Geopotenzial des 500 hPa-Niveaus.

B.2.4 Gewitterindex TT

Diese auch als „Total Total Index“ bekannte Beschreibungsgröße misst Labilität in einer Schicht zwischen 850 und 500 hPa. TT kombiniert die Temperaturdifferenz zwischen den Berandungsflächen 850 und 500 hPa mit der Differenz zwischen dem Taupunkt in 850 hPa ($T_{d(850)}$) und der Temperatur in 500 hPa, im Prinzip wird also

$$TT = T_{850} + T_{d(850)} - 2T_{500} \quad (B.15)$$

bestimmt. In Analogie zur Berechnung des niederschlagsfähigen Wassers erfolgt die Berechnung von $T_{d(850)}$ aus dem Sättigungsdampfdruck (vgl. Gleichung B.8) mit der Temperatur in 850 hPa, gezeigt in Gleichung B.10, wobei $T_{d(850)}$ noch in Kelvin umzurechnen ist. CHAUDHURI und MIDDEY (2012) geben einen Bereich von $44 \leq TT \leq 65$ für starke Gewitter an.

B.2.5 Gewitterindex KI

Die auch als „K-Index“ bekannte Beschreibungsgröße fokussiert noch stärker auf die Stabilitäts-/Labilitätsverhältnisse der unteren Atmosphäre, oberhalb der Reibungsschicht. Dazu wird auch Temperatur- und Feuchteinformation aus der 700 hPa-Fläche ausgewertet. Im Prinzip bestimmt sich KI nach

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + T_{d(850)} - (T_{700} - T_{d(700)}) \quad (B.16)$$

Die dazu benötigten Taupunktdifferenzen werden, in Analogie zum niederschlagsfähigen Wasser, bzw. dem TT-Index aus Gleichung B.8 mit der Temperatur in 850 bzw. 700 hPa, verarbeitet in Gleichung B.10 bestimmt. Laut CHAUDHURI und MIDDEY (2012) ist ein Bereich von $28 \leq KI \leq 40$ bei starken Gewitter relevant.

B.2.6 Gewitterindex BI

Der so genannte Boyden-Index betrachtet Labilität in der untersten Atmosphäre, indem er die Schichtdicke zwischen 1000 und 700 hPa sowie die Temperatur in 700 hPa auswertet. Im Prinzip wird

$$BI = Z_{700} - 1000 - T_{700} - SKF \quad (B.17)$$

berechnet. SKF ist ein Skalierungsfaktor, der für BI bei -200 liegt. Laut CHAUDHURI und MIDDEY (2012) ist ein Bereich von $98 \leq BI \leq 108$ bei starken Gewitter relevant.

B.2.7 SWEAT-Labilitätsindex

Das Akronym SWEAT steht für **S**evere **W**eather **T**hreat **I**ndex, auch als SWI in der Literatur bekannt. In ihm wird das Gefahrenpotenzial von schweren Gewit-

tern beschrieben. Betrachtungsschicht der Atmosphäre ist der Bereich oberhalb der Reibungsschicht, zwischen 850 und 500 hPa. Dazu ist neben den zur Ermittlung von TT (s.o., Gleichung [B.15](#)) konsultierten thermischen und hygri-schen Größen auch Information zur Windscherung notwendig. In empirischer Weise verknüpft SWEAT die Taupunkttemperatur in 850 hPa ($T_{d(850)}$) mit TT, der Windgeschwindigkeit in 850 und 500 hPa (f_{850} bzw. f_{500} sowie der Windrichtungsänderung s zwischen 850 und 500 hPa:

$$\text{SWEAT} = 12 \cdot T_{d(850)} + 20 \cdot (\text{TT} - 49) + 2f_{850} + f_{500} + 125 \cdot (s + 0, 2) \quad (\text{B.18})$$

mit der Windrichtungsscherung $s = \sin(dd_{500} - dd_{850})$, wobei dd_{500} und dd_{850} die Windrichtung in 500 bzw. 850 hPa repräsentieren. Zur praxisunterstützten Berechnungsvorschrift von SWEAT gehört, dass

- $T_{d(850)}$ für negative Werte auf 0 gesetzt wird;
- der Term $20 \cdot (\text{TT} - 49)$ für $\text{TT} < 49$ auf 0 gesetzt wird;
- der Term $125 \cdot (s + 0, 2)$ auf 0 gesetzt wird, wenn eine der vier folgenden Bedingungen *nicht* erfüllt ist:
 - die Windrichtung in 850 hPa liegt im Bereich von 130 bis 250°,
 - die Windrichtung in 500 hPa liegt *nicht* im Bereich von 210 bis 310°,
 - die Differenz der Windrichtungen ist positiv,
 - sowohl f_{850} als auch f_{500} sind kleiner als 15 kn.

[CHAUDHURI und MIDDEY \(2012\)](#) geben einen Bereich von $200 \leq \text{SWEAT} \leq 500$ für starke Gewitter an. Ab einem SWEAT Index von 400 besteht die Gefahr des Auftretens von Tornados.

B.2.8 CAPE-Index-Äquivalent

CAPE steht für **C**onvective **A**vailable **P**otential **E**nergy. Bei den bisher beschriebenen Labilitäts-/Stabilitätsindizes wurde das Konzept der thermischen Energie zu Grunde gelegt, zum Teil in Form von fühlbarer Wärme, zum Teil in Form von latenter Wärme, d.h. unter Einfluss von Energiequellen, die in Zusammenhang mit den Phasenübergängen von Wasserdampf vorhanden sein können. Sie lösen Vertikalbewegungen aus oder dämpfen diese und beeinflussen die Bildung/Auflösung von Wolken. Im Extremfall, folgen daraus starke konvektive Ereignisse. Eine dynamische Komponente, repräsentiert durch die Scheerung von Windrichtung und -geschwindigkeit ist zusätzlicher Bestandteil des SWEAT-Index.

Mit dem CAPE-Index wird das Phänomen aus einem anderen Blickwinkel betrachtet, da es um verfügbare potenzielle Energie geht. Dahinter steht die Betrachtung von Luftpaketen (parcel theory). Im Prinzip wird auf Instabilität

getestet, indem ein Luftpaket aus einem Gleichgewichtszustand heraus verlagert wird. Die Grundannahme ist, nur dieses Luftpaket, jedoch nicht die Umgebungsluft, wird physikalisch verändert. Teile dieses Ansatzes werden durch das Konzept der Trocken- und Feuchtadiabasis (s. vorige Unterabschnitte) gefasst.

In die Betrachtungen zu CAPE wird eine zusätzliche wichtige Komponente eingebracht: Die Tatsache, dass die Luft in einer Schicht als stabil eingestuft wird, ist als „quasi-vorläufig“ zu erachten. Beim LI-Index (s.o.) wurde nicht näher auf die Natur der hebenden Prozesse eingegangen, sondern ein hypothetischer Aufstieg des Luftpakets vom Kondensationsniveau auf 500 hPa angenommen. Eine solche weitere Hebung kann real z.B. durch orografische Hindernisse erzwungen werden. Dadurch wird u.U. das *bedingt stabil geschichtete* Luftpaket in eine Höhe verfrachtet, in der es, bezogen auf die Umgebungsluft, durchaus *erneut* Labilität zeigen kann. Wichtig für das Ausbilden von aufwärts gerichteter Vertikalbewegung und mithin für sich selbst verstärkende Konvektion ist, ob die Bedingungen für *Auftrieb* gegeben sind oder nicht. Für eingehende Erläuterungen sei z.B. auf [AMBAUM \(2010\)](#), Kap. 6, verwiesen. Dort wird der Begriffskomplex *Labilität/Auftrieb/Energie* unter Verwendung von thermodynamischen Diagrammen detailliert dargestellt.

Neben dem Kondensationsniveau ist also ein weiteres Niveau von Bedeutung: Dasjenige, bei dem, unter fortgesetzter Hebung, „abwärts gerichtete Auftriebskräfte“ in aufwärts gerichtete übergehen. Es wird das *Niveau der freien Konvektion* (Level of Free Convection, LFC) genannt. Es ist verbreitet in der Atmosphäre der Fall, dass eine durch Auftrieb bewirkte, vom LFC startende Aufwärtsbewegung in einer gewissen Höhe wieder „ausgebremst“ wird – wenn beispielsweise der ab dem LFC vorhandene Wärmevorsprung des Luftpakets von der Umgebungsluft wieder kompensiert wird. Oftmals ist dies der Fall, wenn in einer noch höheren Luftschicht sich das vertikale Grundverhalten der Temperatur, also Abnahme mit der Höhe, in ihr Gegenteil kehrt (Temperatur-Inversion; es kann aber auch eine Abschwächung des vertikalen Abnahmeverhaltens der Umgebungsluft ausreichend sein). Dieses, oberhalb des LFC befindliche Niveau wird *Neutrales Auftriebsniveau* (Level of neutral buoyancy, LNB) genannt¹⁾.

Oberhalb des LFC erfährt das Luftpaket eine Auftriebskraft F_a

$$F_a = g \frac{T_{v(LP)} - T_{v(UMG)}}{T_{v(UMG)}} \quad (B.19)$$

mit $g :=$ Gravitationskonstante; $T_{v(LP)} :=$ virtuelle Temperatur des Luftpakets und $T_{v(UMG)} :=$ virtuelle Temperatur der Umgebungsluft. Die virtuelle Temperatur ist eine hilfreiche Zusatzgröße, denn mit ihr kann die Zustandsgleichung der trockenen Luft auch für Luft mit einem Wasserdampfanteil verwendet werden. Ein „virtueller Zuschlag“ steht für die notwendige Temperaturerhöhung eines Luftpakets bei gleichem Druck und gleicher Dichte, wenn es nicht aus

¹⁾Das ultimative LNB ist die Tropopause, in der eine starke Veränderung, i.d.R. eine Umkehr, der vertikalen Temperaturabnahme erfolgt.

trockener sondern aus feuchter Luft besteht.

$$T_v = T \cdot \left[\frac{\frac{1+MR}{0,622}}{1 + MR} \right]$$

mit $T :=$ Temperatur; $MR :=$ Mischungsverhältnis, s.a. Gleichung B.11; 0,622 ist das Verhältnis der Gaskonstanten von trockener und feuchter Luft.

Die geometrische Interpretation von CAPE ist die Fläche, die zwischen einer grafischen Darstellung der Temperatur mit der Höhe, z.B. eines Radiosondenaufstiegs, wie sie beispielsweise in einem thermodynamischen Diagramm durchgeführt wird und der sie begrenzenden Feuchtadiabaten. Die adäquate Umschreibungsgröße ist die Differenz der virtuellen Temperaturwerte von aufsteigendem Luftpaket und Umgebungsluft – so lange der Auftrieb im positiven Bereich ist. Solche Flächen werden analytisch durch ein Integral dargestellt

$$\text{CAPE} = \int_{LFC}^{LNB} R_d (T_{v(LP)} - T_{v(UMG)}) d \ln p \quad (B.20)$$

mit $R_d :=$ spezifische Gaskonstante für trockene Luft und p Geopotenzial.

In der Berechnungspraxis muss auf die Approximation durch eine endliche Zahl von Stützstellen übergegangen werden. Eine weitere Randbedingung ist, dass nur die Daten aus den Flächen 1000, 850, 700, 500 und 250 hPa zur Verfügung stehen. Die Berechnungsstrategie umfasst das Aufteilen der Schicht zwischen 1000 und 850 hPa in 15 gleich große Segmente. Auch die Schicht zwischen 850 und 700 hPa wird in 15 gleich große Segmente unterteilt. Die Schicht 700 bis 500 hPa wird in 20 Segmente geteilt und die Schicht 500 bis 250 hPa erhält eine Aufteilung in 25 Segmente.

Insgesamt wird also die Temperatur in 75 vertikalen Segmenten bestimmt, wobei als Stützstellen Segment 1 den Wert der Temperatur in 1000 hPa (T_{1000}) erhält, Segment 15 enthält T_{850} , Segment 30 enthält T_{700} , Segment 50 enthält T_{500} und Segment 75 enthält T_{250} .

Mit Hilfe der folgenden Schritte werden diejenigen Segmente $Seg_{LFC} \dots Seg_{LNB}$ identifiziert, die zwischen P_{KNGN} und demjenigen Niveau, ab dem $T_{v(LP)} = T_{v(UMG)}$ ist, liegen

- aus der Anwendung von Gleichung B.5 bekanntes Konvektionsniveau P_{KNGN} (auf der Basis eines GN von 1000 hPa),
- Konstruktion eines „Hintergrundtemperaturprofils“ (ausgehend von der Temperatur in 1000 hPa werden unter Beachtung des virtuellen Temperaturzuschlags sukzessive mit der Höhe abnehmende Temperaturwerte aufgebaut [$\rightarrow T_{v(UMG)}$])
- Berechnung des in 75 Segmente unterteilten, an 5 Stützstellen orientierten „aktuellen Temperaturprofil bezogen auf das Luftpaket“ ($\rightarrow T_{v(LP)}$).

Damit wird ein genäherter CAPE-Index $\text{CAPE}_{\text{equiv}_{\text{approx}}}$ berechnet. Dieser stellt ein *Äquivalent* zu CAPE dar, bei dem nicht der exakte Wertebereich von

CAPE reproduziert wird, sondern eine für den Einsatz in Regressionen adäquate Größe, die sich zwar vom „echten“ CAPE um einige Skalierungsfaktoren unterscheidet, aber das qualitativ wichtige gleichsinnige Verhalten wie CAPE aufweist:

$$\text{CAPE-equiv}_{approx} = \sum_{i=Seg_{LFC}}^{Seg_{LNB}} [(T_{v(LP)}(i) - T_{v(UMG)}(i)) \cdot (\log z(i) - \log z(i+1))] \quad (B.21)$$

mit $z :=$ zugehörige geopotenzielle Höhe. CHAUDHURI und MIDDEY (2012) geben einen Bereich von $2000 \leq \text{CAPE} \leq 7000$ für starke Gewitter an.

B.2.9 CIN-Index-Äquivalent

Die Berechnungen von CAPE gehen davon aus, dass ein Luftpaket von seinem Kondensationsniveau bis zum neutralen Auftriebsniveau (LNB) gehoben wird und quantifiziert die damit verbundene verfügbare potenzielle Energie. Aber wie gelangt das Paket zum Kondensationsniveau? Und welche Energie ist dazu notwendig? Mit anderen Worten, um welchen Betrag ist ein CAPE für die gesamte Atmosphäre bis zum LNB zu reduzieren, weil die Hebung bis zum Kondensationsniveau ihrerseits Energie verbraucht? Diese Größe wird mit dem CIN-Index (Convective Inhibition) beschrieben.

Im Grunde wird zur Berechnung von CIN lediglich eine Variante von Gleichung B.20 benötigt, die über einen anderen vertikalen Bereich integriert. Auch bei CIN handelt es sich um ein dem „realen“ Index äquivalentes, für die Berechnung von Regressionen adäquates Maß (s.a. Erläuterung zu CAPE)

$$\text{CIN} = - \int_{z_{1000}}^{LFC} R_d (T_{v(LP)} - T_{v(UMG)}) d \ln p \quad (B.22)$$

In der Praxis wird, analog zu Gleichung B.21 ein genährter CIN-Index $\text{CAPE-equiv}_{approx}$ aus den Segmenten 1 bis Seg_{LFC} , dem Niveau der beginnenden freien Konvektion, bestimmt

$$\text{CIN-equiv}_{approx} = \sum_{i=Seg_{z_{1000}}}^{Seg_{LFC}} [(T_{v(LP)}(i) - T_{v(UMG)}(i)) \cdot (\log z(i) - \log z(i+1))] \quad (B.23)$$

mit $z :=$ zugehörige geopotenzielle Höhe. CHAUDHURI und MIDDEY (2012) geben einen Bereich von $0 \leq \text{CIN} \leq -150$ an.

B.2.10 Stabilitätsindex nach Enke

Der Stabilitätsindex nach Enke existiert bereits seit vielen Jahren als potenzieller Prediktor und wurde auch schon als Auswahlgröße in der ersten Phase des Vor-

habens im seinerzeit noch 60 potenzielle Prediktoren umfassenden Pool eingesetzt – d.h. auch in früheren Versionen das KLaMuKo-Verfahrens oder in WETTREG gab es bereits eine Einbeziehung von vertikaler Stabilitätsinformation. Im Rahmen der zweiten Phase dieses Vorhabens wurde das Augenmerk verstärkt auf weitere Labilitätsmaße gerichtet, zu deren Bestimmung auch weitere Information aus einigen Geopotenzialflächen implementiert werden musste, die bislang noch nicht vorlag. Der Stabilitätsindex nach Enke sowie die weiteren, ab hier in diesem Abschnitt als Unterabschnitte **B.2.10–B.2.13** vorgestellten Stabilitäts-/Labilitätsmaße sind der Vollständigkeit halber aufgeführt, da sie den Themenkomplex *Stabilitätsmaße* abrunden.

Dieses Maß für die Stabilität der Atmosphäre wird aus Geopotenzialdaten der Flächen 1000, 700 und 500 hPa berechnet, d.h. es benötigt keinerlei Feuchte- maße. Es quantifiziert die Abweichung des vertikalen feuchtadiabatischen Temperaturgradienten ΔT_f vom vertikalen Gradienten der sensiblen Temperatur ΔT

$$SIE = \Delta T_f - \Delta T \quad (B.24)$$

Die Stützstellen sind dabei die Daten in der 850 bzw. der 600 hPa-Fläche, deren Temperaturwerte approximativ für die Mitte der Schichten 700/1000 hPa bzw. 500/700 hPa sind. Es ist also

$$\Delta T_f = T_{f850} - T_{f600} \quad (B.25)$$

oder

$$\Delta T_f = T_{f850} - (T_{850} - \gamma_f \cdot \Delta z) \quad (B.26)$$

mit

$$\gamma_f = \left(\frac{dT}{dz} \right)_f = 0.973\beta \left[\frac{\text{K}}{100\text{m}} \right] ; \quad \beta = \frac{p+a}{p+b}$$

(p: Luftdruck; a und b: empirische Konstanten nach [LINKE und BAUR, 1970](#))

$$\Delta z = z_{600} - z_{850} = \bar{T}_v \cdot \frac{R}{g} \ln \left(\frac{850}{600} \right)$$

B.2.11 Stabilitätsindex nach Enke mit Feuchte

Diese Größe (SIE_f) kann auch als *Labilitätsindex unter Verwendung von Feuchte- und Vorticityinformation* bezeichnet werden. Die Vorticity an einer Position (i, j) eines in Gitterpunktform vorliegenden Geopotenzialfeldes z (z.B. in 500 hPa) bestimmt sich zu

$$VOR(i, j) = \frac{[-4 \cdot z(i, j)] + z(i, j-1) + z(i, j+1) + z(i-1, j) + z(i+1, j)}{GKE} \quad (B.27)$$

mit $GKE :=$ Großkreisentfernung zwischen den Gitterpunkten. Der Index SIE_f an einer Koordinate (i,j) berechnet sich nach

$$SIE_f(i, j) = [T_{850}(i, j) - T_{700}(i, j)] \cdot \left[\frac{[RH_{850}(i, j) + RH_{700}(i, j)] \cdot RH_{500}(i, j)}{3} \cdot 0,01 \right] + 0,15 \cdot VOR(i, j) \quad (B.28)$$

mit T_{850} und $T_{700} :=$ Temperatur in 850 bzw. 700 hPa, RH_{850} , RH_{700} und $RH_{500} :=$ relative Feuchte in 850, 700 bzw. 500 hPa, jeweils an den Koordinaten (i, j) .

B.2.12 Stabilitätsindex nach Showalter

Dieser Index verwendet die Temperatur- und Feuchteinformation aus den Flächen 850 und 500 hPa. Der Showalter-Index wird nach der Formel

$$SSI = T_{500} - T_{P_{500}} \quad (B.29)$$

mit der Temperatur in 500 hPa T_{500} und der modifizierten potenziellen Temperatur $T_{P_{500}}$, die unter der Annahme ermittelt wird, dass ein Luftpaket zunächst trockenadiabatisch von 850 hPa bis zum Kondensationsniveau gehoben wurde und von da an feuchtadiabatisch aufgestiegen ist.

SSI ist eine Variante des Lifted Index (LI, s. S. XII), wobei im Fall von LI die Hebung vom 1000 hPa-Niveau erfolgt und der Showalter-Index die Reibungsschicht ausblendet.

B.2.13 Frontneigungswinkel nach Margules

Eine weitere physikalische Größe, die quantitative Aussagen über die Intensität von Niederschlagsprozessen durch dynamische Hebung ermöglicht ist der Frontenneigungswinkel α nach Margules und Stüve.

Voraussetzung ist die Bestimmung des Sättigungsdampfdrucks E_w in 850 hPa nach Formel B.8 als Informationsquelle für die virtuelle Temperatur (s.u.), wie auch schon bei der Bestimmung des niederschlagsfähigen Wasser verwendet. Der Winkel α wird dann wie folgt berechnet:

$$\tan \alpha = \frac{f}{g} \cdot T \cdot \frac{\Delta v}{\Delta T} \quad (B.30)$$

mit dem Coriolisparameter f , der Gravitationskonstanten g , der Temperatur T sowie der Differenz der Windgeschwindigkeiten Δv bzw. der Temperaturwerte ΔT in der warmen und der kalten Luftmasse.

Zwar ist dieser Winkel im strengen Sinne aus Gitterpunktdaten nur angenähert zu ermitteln und es ist zudem erforderlich, ihn in seiner Projektion auf das geographische Koordinatensystem zu berechnen; es lassen sich aber

dennoch mit ihm Abschätzungen zur Wetterwirksamkeit von atmosphärischen Diskontinuitäten vornehmen. Der approximierter Winkel γ' wird mit Hilfe von

$$\gamma' = \frac{f}{g} T_v \frac{\Delta_z v_y}{\Delta_{x'} T_v} \quad (B.31)$$

bestimmt. Dies erfolgt in der 850 hPa-Fläche, in der $\Delta_{x'} T_v$ den Sprung der virtuellen Temperatur bezeichnet.

C Relevanz der Prediktoren: Rangfolgeuntersuchung

C.1 Prinzip der Untersuchung

Die Grundidee ist, herauszufinden, ob Prediktoren für Teile, z.B. einzelne Jahreszeiten oder einzelne Klimagrößen Relevanz besitzen. Dazu wird folgender Weg beschritten:

- Bestimmung der Korrelation jedes der 130 potenziellen Prediktoren an allen Gitterpunkten mit der Zielgröße. Beispiel: Korrelation der Vorticity in 500 hPa an der Koordinate (10,10) – was in der Mitte des mitteleuropäischen Ausschnitts ist – mit der Maximumtemperatur im Sommer. Diese wurde zuvor als Mittel über diejenigen hessischen Klimastationen, an denen relativ hohe Maxima auftreten (tief gelegene Stationsorte) aufbereitet.
- Für jeden der 130 potenziellen Prediktoren: Registrierung der Koordinate, zu der eine besonders starke Korrelation errechnet wird, sowie des Betrags der Korrelation.
- Durchführen dieser Analyse für eine Vielzahl von Klimagrößen in Hessen (Temperatur, Feuchte, Bewölkung, Luftdruck, Sonnenscheindauer, Wind), in mehreren Jahreszeiten.
- Erstellung einer Rangfolge, in der festgehalten wird, welcher Prediktor bei welcher Klimagröße wie hohe Relevanz besitzt.
- Vereinfachung zu Relevanzstufen – dies erfolgt durch die Bildung von Perzentilen der Rangzahlen. Die Relevanzstufen sind bei 130 Prediktoren wie folgt:
 - Platz 1–7** Perzentil ≈ 5 – Spitzengruppe – dunkelrote Markierung in Abb. C.1
 - Platz 8–14** Perzentil ≈ 10 – sehr hohe Relevanz – hellrote Markierung in Abb. C.1
 - Platz 15–33** Perzentil ≈ 25 – hohe Relevanz – gelbe Markierung in Abb. C.1
 - Platz 34–44** Perzentil ≈ 33 – mittlere Relevanz – hellgrüne Markierung in Abb. C.1

Platz 45–66 Perzentil ≈ 50 – geringe Relevanz – hellgraue Markierung in Abb. C.1

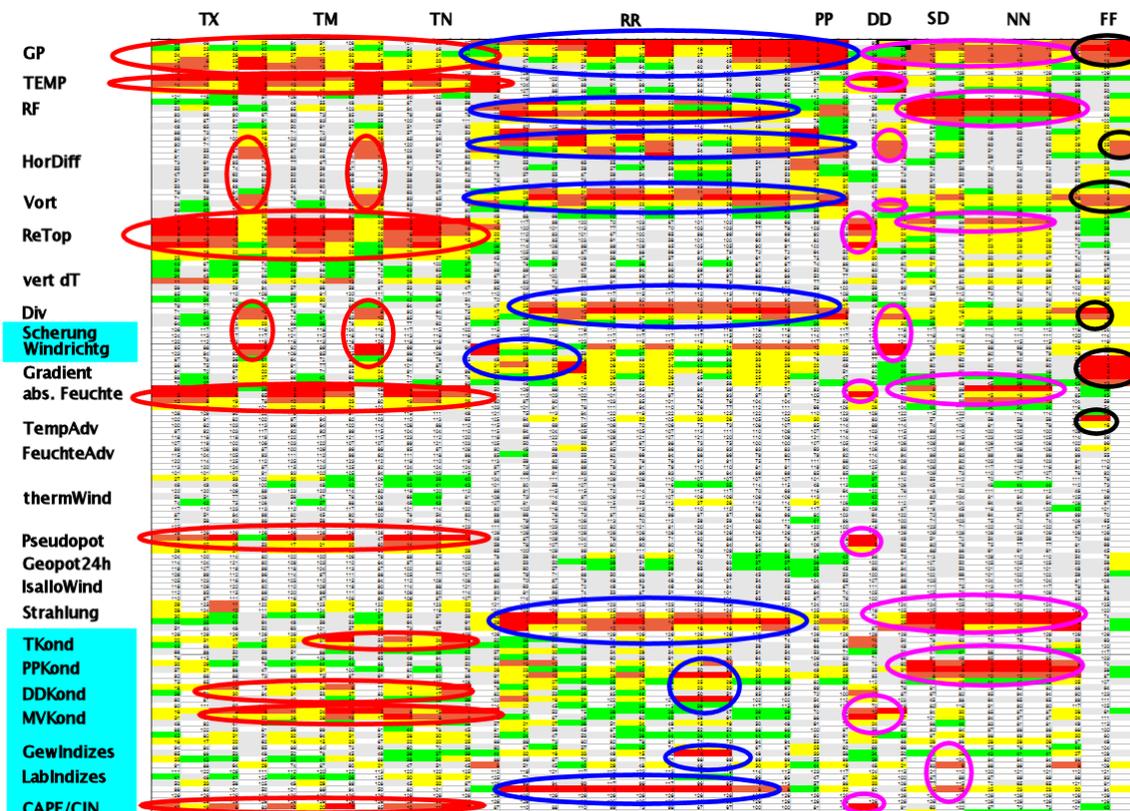


Abbildung C.1: Übersicht der Relevanzstufen (Farbzuordnung in der Aufstellung auf S. XXI) der 130 potenziellen Prediktoren (genaue Bezeichnungen: s. Tab. B.1; die mit der Erweiterung auf 130 Mitglieder hinzugekommenen Prediktoren sind mit hellblauen Rechtecken unterlegt) für verschiedene Klimaparameter und Jahreszeiten: Berechnungsgrundlage: Messungen an Stationen in Hessen. Die jeweiligen Spaltenzuordnungen für die Prediktanden (TX...FF) sind in den zugehörigen Beschreibungsabschnitten (C.2...C.7) erläutert.

Es zeigt sich, ob ein Prediktor häufig in der „Spitzengruppe“, dem Vordergrund oder dem Mittelfeld der Beschreibungen befindet, oder ob er faktisch von vernachlässigbarer Bedeutung für die Auswahl der Prediktoren ist.

In den folgenden Abschnitten wird die Relevanz für einzelne Klimavariablen aufgeschlüsselt – nicht alle sind mit Extremen oder konvektiven Ereignissen verbunden – dennoch ist es aus synoptischer Sicht interessant, welche Atmosphärenfelder zu ihrer Beschreibung als relevant eingestuft werden.

C.2 Relevante Prediktoren für die Temperatur (TX, TM, TN)

Es sind jeweils vier Spalten pro Parameter (TX, TM, TN) in Abb. C.1 wiedergegeben. Sie zeigen die Rangfolgen für Frühjahr (MAM), Sommer (JJA), Herbst

(SON) und Winter (DJF) für eine objektive Auswahl der hessischen Klimastationen (vgl. Abschnitt 4.5.8 der MBS2013). Die Auswahl fasst Stationen zusammen, die relativ hohe Temperaturwerte verzeichnen, die relativ niedrig gelegen sind¹⁾. Rote Ovale kennzeichnen in Abb. C.1 die für die Temperatur besonders wichtigen Prediktoren und heben Korrelationen hervor, die sich im Bereich der obersten 14 Ränge (hellrote bzw. dunkelrote Markierungen) befinden.

Es ist bemerkenswert, dass im Winter (Dez.-Jan.-Feb.) andere relevante Prediktoren gefunden werden als in den anderen Jahreszeiten. Ähnliches wurde in der Vergangenheit z.B. auch bei Studien mit der Regionalisierungsmethode WETTREG konstatiert. Dort wird im Winter ein anderer Satz Prediktoren verwendet als in den übrigen Jahreszeiten (siehe z.B. BAUMGART et al., 2012).

Die zentrale Größe für die Beschreibung der regionalen Temperatur ist im Grunde die Temperatur in 1000 hPa – dies gilt in allen Jahreszeiten. Dennoch wurde sie aber, s. Abschnitt 3.2.4, für die Vergleichsstudie nicht verwendet. Weitere, nahezu gleich bedeutende Prediktoren zur Beschreibung der regionalen Temperatur (TX, TM, TN) sind die relative Topografie 1000/850 hPa und 1000/700 hPa sowie die Temperatur in den Niveaus 850 und 700 hPa. Insbesondere die relativen Topografien beschreiben den Wärmeinhalt einer Luftschicht, so dass die hohe Korrelation keine Überraschung ist.

Weitere relevante Größen sind die absolute Feuchte sowie die pseudopotenzielle Temperatur. Diese sind mit Wolken- und Nebelprozessen verbunden. Auch finden sich unter den relevanten Größen einige mit Cumuluskonvektion und den Kondensationsniveaus in Verbindung stehende Größen. Diese sind erst mit der Erweiterung auf 130 Felder verfügbar.

Die Temperatur der freien Atmosphäre ist in allen Jahreszeiten für die Beschreibung von TX, TM und TN bedeutsam. Es gibt aber einen weiteren Hinweis darauf, dass die Atmosphäre im Winter andere Zustände annimmt als in den übrigen Jahreszeiten. Im Winter (farbige Spalten 4, 8 und 12) sind die Relative Topografie, die absolute Feuchte und die pseudopotenzielle Temperatur, anders als im Frühjahr, Sommer und Herbst, von nachrangiger Bedeutung. Statt dessen ist im Winter die Verbindung zu Temperatur und *Geopotenzial* besonders relevant. Darüber hinaus finden sich in dieser Jahreszeit bezüglich der Bodentemperatur gut erkennbare Verbindungen zu horizontale Geopotenzialdifferenzen, Vorticity und Windrichtung. Das heißt, im Winter ist ein ausgeprägter Einfluss der *Atmosphären-Bewegung* auf die Bodentemperatur erkennbar.

C.3 Relevante Prediktoren für den Niederschlag (RR)

Insgesamt enthält Abb. C.1 zehn Niederschlags-bezogene Spalten:

(i)–(iv) Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter mit der Maßgabe, Schwell-

¹⁾Anmerkung: Die Identifikation der Stationsgruppen erfolgt dabei nicht Jahreszeiten-spezifisch, sondern unter Beachtung des gesamten Jahres. Damit wird sicher gestellt, dass die Analyse in allen Jahreszeiten identische Gruppen von Stationen nutzt.

wertüberschreitungen von 10mm/Tag darzustellen, Selektion der Stationen mit hohen Niederschlagsmengen;

(v)–(vi) Sommer und Winter mit der Maßgabe, Schwellwertüberschreitungen von 10mm/Tag darzustellen, keine Selektion der Stationen bezüglich hohen oder niedriger Niederschlagsmengen;

(vii) Sommerniederschlag ohne Schwellwertberücksichtigung und unter Verwendung der Klimastationen, Selektion derjenigen Stationen mit niedrigen Niederschlagsmengen;

(viii) wie (vii) aber unter Nutzung der Klima- und Niederschlagsstationen;

(ix)–(x) wie (vii)–(viii) aber für den Winter. Blaue Ovale in Abb. C.1 weisen auf Prediktoren mit besonderer Relevanz für den Niederschlag hin.

Von überragender Bedeutung für die Beschreibung des Niederschlags ist das Geopotenzial in 1000 hPa. Im Winter ist auch, anders als in anderen Jahreszeiten, der Einfluss des Geopotenzials der Flächen 850 und 700 hPa erkennbar. Generell sollte beachtet werden: Ist das Geopotenzial hoch, so werden Niederschlagsprozesse gedämpft oder unterbunden, ist es niedrig, steigt die Niederschlagswahrscheinlichkeit.

Weiterhin sind die Felder des Enke-Labilitätsindex mit Feuchte und der relative Feuchte in 700 hPa relevant. Sie stehen für die Stärke von Vertikalbewegungen – ein wichtiger Vorgang, der die Niederschlagsintensität steuert – bzw. den Vorrat an verfügbarem Wasser für Niederschlagsprozesse.

Außerdem werden dynamische, mit der Strömung verbundene Feldgrößen wie Vorticity und Divergenz als bedeutungsvoll für die Beschreibung des Niederschlags identifiziert.

Prozesse der Wolkenbildung finden durch die starke Verbindung mit Einstrahlungsgrößen ihren Einfluss. Für die Beschreibung der Niederschlagsverhältnisse im Sommer sind zudem einige der im Rahmen des Vorhabens erstellten Kondensationsniveau-Größen und Gewitterindizes von Bedeutung.

Bei der Bewertung der Bedeutung *einzelner Prediktoren* für den Niederschlag ist zu beachten, dass die Beträge der Korrelation nur selten eine Größenordnung von 0,5 erreichen; meist liegen sie darunter. Die *multiple Korrelation*, die durch das Zusammenspiel mehrerer Prediktoren entsteht, liegt jedoch im Bereich von 0,5 bis 0,7.

C.4 Relevante Prediktoren für den Luftdruck (PP)

In Abb. C.1 finden sich zwei Luftdruck-bezogene Spalten: Sommer bzw. Winter bei Selektion der Klimastationen mit relativ hohen Druckwerten (tiefer gelegene Stationen). Die blauen Ovale in Abb. C.1 zeigen neben den Niederschlags-bezogenen wichtigen Prediktoren auch diejenigen des Luftdrucks an.

Erwartungsgemäß ist die Korrelation zum Geopotenzial sehr ausgeprägt, insbesondere zu GP1000 aber auch zu den anderen Flächen. „Nebenmaxima“ finden sich bei den horizontalen Differenzen, der Vorticity und der Divergenz. Auffällige Verbindungen zu weiteren Prediktoren, wie sie etwa im Zusammenhang mit dem Niederschlag identifiziert wurden, finden sich für den Luftdruck nicht.

Die Stärke der gefundenen Zusammenhänge ist beim Luftdruck deutlich höher als beim Niederschlag – die Korrelationskoeffizienten erreichen für zahlreiche Prediktoren Beträge von 0,5–0,7 und bezüglich des Geopotenzials liegen sie über 0,9.

C.5 Relevante Prediktoren für den Dampfdruck (DD)

In Abb. C.1 finden sich zwei Dampfdruck-bezogene Spalten: Sommer bzw. Winter bei Selektion der Klimastationen mit relativ hohen Dampfdruckwerten (tiefer gelegene Stationen). Die magentafarbenen Ovale zeigen neben den Dampfdruck-bezogenen wichtigen Prediktoren auch diejenigen der Sonnenscheindauer und der Bewölkung an.

Auffällig ist beim Dampfdruck, wie unterschiedlich die Verhältnisse im Sommer und Winter sind. Lediglich die Temperatur in 850 hPa ist in beiden Jahreszeiten prominent an der Beschreibung des Dampfdrucks beteiligt. In den Sommermonaten zählen eher Temperatur- und Feuchte-bezogene Größen wie relative Topografie, absolute Feuchte, Pseudopotenzielle Temperatur und insbesondere der CAPE-Index zum Kreis der weiteren relevanten Größen. In den Wintermonaten sind es eher dynamische Größen wie Windrichtung, horizontale Differenzen im Geopotenzialfeld, Divergenzen, Vorticity und in geringerem Maße die Einstrahlung, die Bezug zum Dampfdruck besitzen.

Verbreitet ist der Betrag der Korrelationen im Sommer größer als im Winter – d.h. das Potenzial, den Stations-Dampfdruck mit atmosphärischen Feldgrößen zu beschreiben ist im Sommer ebenfalls größer.

C.6 Relevante Prediktoren für Sonnenscheindauer (SD) und Bewölkung (NN)

In Abb. C.1 finden sich zwei Sonnenscheindauer-bezogene Spalten: Sommer bzw. Winter bei Selektion der Klimastationen mit relativ hohen Sonnenscheindauerwerten. Außerdem beinhaltet die Abbildung vier Bewölkungs-bezogene Spalten: (i) und (ii) Sommer und Winter bei Wahl der Klimastationen mit relativ großem Bewölkungsanteil; (iii) und (iv) Sommer und Winter bei Wahl der Klimastationen mit relativ geringem Bewölkungsanteil. Die magentafarbenen Ovale zeigen neben den Sonnenscheindauer- und Bewölkungs-bezogenen wichtigen Prediktoren auch diejenigen des Dampfdrucks an.

Nicht überraschend besitzt die Einstrahlung, die relative Feuchte in 1000, 850 und 700 hPa sowie der in der zweiten Projektphase neu hinzugekommene Prediktor *Druck im Kondensationsniveau* besonders große Relevanz sowohl für Sonnenscheindauer als auch Bewölkung. Ergänzt wird dies durch die absolute Feuchte, die relative Topografie und das Geopotenzial. Die relevanten Größen stellen eine Mischung aus thermischen, dynamischen und Feuchte-Größen mit Bezug zu Wolkenbildungsprozessen dar.

Auch für diese beiden Prediktanden gilt, das unter Sommergehältnissen in der Regel höhere Beträge der Korrelationen auftreten, als im Winter.

C.7 Relevante Prediktoren für die Windgeschwindigkeit (FF)

In Abb. C.1 finden sich zwei Wind-bezogene Spalten: Sommer bzw. Winter bei Selektion der Klimastationen mit relativ hohen Windgeschwindigkeitswerten (Bergstationen). Die schwarzen Ovale zeigen für den Wind besonders wichtigen Prediktoren an.

Dabei werden durch die Analyse, wie zu erwarten, die Geopotenzial-Gradienten der Flächen 1000, 850, 700 und 500 hPa als bedeutungsvollste Prediktoren für den Wind ermittelt. Auch weitere dynamische Größen wie das Geopotenzial, Divergenzen, Vorticity besitzen Relevanz für die Beschreibung des Windes.

Wind ist eine komplexe Größe mit zahlreichen kleinräumigen Einflussfaktoren. Sie wird nur scheinbar durch gut nachvollziehbare physikalische Effekte gesteuert. Wären diese die einzigen „Stellgrößen“ so lägen die Korrelationen nahe bei 1. Es zeigt sich jedoch, dass die Beträge der *einfachen* Korrelationskoeffizienten höchstens eine Größenordnung von 0,7 zumeist aber deutlich unter 0,5 erreichen. Im Zusammenspiel mehrerer Prediktoren werden aber durchaus multiple Korrelationskoeffizienten um 0,8 erreicht.

C.8 Beurteilungsmaße für die KlaMuKo-Klassifikationen

In diesem Abschnitt wird gezeigt, inwiefern die Nutzung eines erweiterten Pools an Prediktoren zu Kombinationen von Prediktoren führt, die eine zunehmende Effizienz des KlaMuKo-Verfahrens nach sich ziehen. Es werden zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des eingesetzten KlaMuKo-Verfahrens zwei Analysegrößen eingesetzt:

- Multipler Korrelationskoeffizient (MKK) – dieser berechnet sich aus der multiplen Korrelation der vier wichtigsten Prediktoren, identifiziert im Pool der 130 potenziellen Prediktoren.
- Aufspreizung des Wertebereichs (AWB) – diese Größe basiert auf der Menge der entstandenen KlaMuKo-Klassen. Verglichen werden die Klassenmittelwerte und die Analysegröße bestimmt sich aus dem Unter-

schied zwischen höchstem und niedrigstem Klassenmittelwert. Eine solche Größe kann nur sinnvoll bestimmt werden, wenn die Ausgangsdaten, die KlaMuKo klassifiziert nicht binarisiert sind. Ist sie hingegen binarisiert so treten der Erfahrung nach einerseits Klassen auf, in denen sich nur Tage mit der Ausprägung ‚0‘ befinden und andererseits entstehen Klassen ausschließlich mit Tagen der Ausprägung ‚1‘. Die Aufspreizung zwischen ‚höchster‘ und ‚niedrigster‘ wäre dann 1. Da sich dieser Fall praktisch immer einstellt ist mit einem solchen Kriterium nicht zwischen hoher, mittlerer oder niedriger Leistungsfähigkeit zu differenzieren. Bei dieser Analyse sind zudem zwei Angaben wissenswert: Die Aufspreizung des Wertebereichs infolge der Klassifikation der ersten Stufe, basierend auf der Gesamtheit der Daten und infolge der zweiten Stufe, d.h. bei Durchführung von weiteren KlaMuKo-Durchläufen für die einzelnen in Stufe 1 ermittelten Klassen. Ein Rechenbeispiel zum Nachvollziehen dieses Maßes findet sich in Anhang F.

Es werden, unter Verwendung des Pools von 130 potenziellen Prediktoren, KlaMuKo-Analysen für weitere ausgewählte Größen durchgeführt. Der Fokus liegt auf der Betrachtung saisonaler Unterschiede so wie verschiedener Aufbereitungsformen der Prediktanden Maximumtemperatur (TX), Niederschlag (RR) und Wind (FF). In Tab. C.1 sind dazu aufgelistet: (i) Der multiple Korrelationskoeffizient (MKK), wie er sich aus den vier durch das Screening identifizierten wichtigsten Prediktoren bestimmt und (ii) die mit Hilfe der 10 KlaMuKo-Klassen erreichbare Aufspreizung des Wertebereichs (AWB) aufgelistet.

Ganz deutlich zeigt sich, dass die *Maximumtemperatur* in den Jahreszeiten Frühjahr, Sommer und Herbst sowie im Sommerhalbjahr (Apr–Sep) in sehr hohem Maß durch die relevanten Prediktoren wiedergegeben werden kann. Die MKKs liegen nahe 1,00. Im Winter ist TX von einem größeren „Wirkkomplex“ an Einflussfaktoren abhängig; insbesondere das häufige Auftreten von Inversionen bewirkt dann eine stärkere Entkoppelung von Einflüssen der freien Atmosphäre auf die Maximumtemperatur. Daher ist die multiple Korrelation im Winter mit 0,82 immer noch hoch, aber deutlich unterhalb derjenigen in den übrigen Jahreszeiten.

Werden die Prediktanden transformiert, zum Beispiel in Form einer Binarisierung durch Definieren eines Schwellwertes (0: Wert unterhalb der Schwelle; 1: Wert oberhalb der Schwelle) so ist der daraus resultierende Prediktand ebenfalls nicht mehr so deutlich durch die atmosphärischen Prediktoren beschreibbar. Als Beispiele finden sich in Tab. C.1 die Korrelationen für die Überschreitung der 30°C-Schwelle im Sommer (heiße Tage) und die Unterschreitung der 0°C-Schwelle im Winter (Eistage) mit MKKs von unter 0,8 bzw. bei 0,6. Als Zusatzinformation kann die erreichbare Aufspreizung des Wertebereichs AWB genutzt werden (zur Berechnung von AWB: s. Anhang F). Diese ist im Winter mit 2,6 für die KlaMuKo-Stufe 1 relativ gering. In den übrigen Jahreszeiten und im Sommerhalbjahr ist mit AWB1-Werten von 3,5 bis 5 eine deutlich höhere Differenzierung des Wertebereichs durch die Klassifikation auf der KlaMuKo-Stufe 1 erreichbar. Ein gewisses Zusatzpotenzial liegt in der Nutzung der zweiten

KlaMuKo-Stufe, was aus den Angaben AWB2 erkennbar wird. In allen Jahreszeiten außer dem Sommer finden sich für TX in Tab. C.1 deutliche Steigerungen.

Tabelle C.1: Analyse von multiplem Korrelationskoeffizienten (MKK) mit den vier relevantesten aus 130 potenziellen Prediktoren selektierten Größen sowie Aufspreizung des Wertebereichs unter Verwendung der Klassen der KlaMuKo-Stufe 1 (AWB1) und aller Klassen der KlaMuKo-Stufe 2 (AWB2, Berechnung: s. Anhang F) für die Klimatelemente (Ele) Maximumtemperatur (TX), Niederschlag (RR) und Wind (FF), mehrere Jahreszeiten (Jahrz), optionale Schwellwerte (Schwelle) und optional vorausgewählte Stationsgruppen (Stat-Sel.). Letztere können folgenden Einträge besitzen: Hi Auswahl der Stationen mit hohen mittleren Werten; Lo (Auswahl der Stationen mit niedrigen mittleren Werten); Alle Auswahl aller Stationen; KliNied Auswahl sowohl der Niederschlags- als auch der Klimastationen (bei RR); Klistat Auswahl nur der Klimastationen (bei RR); Hi/Lo 30% Kriterium muss an mindestens 30% der Stationen erfüllt sein.

Ele	Jahrz	Schwelle	Stat-Sel.	MKK	AWB1	AWB2
TX	Fru	—	Hi	0,97	4,81	5,47
TX	Som	—	Hi	0,97	3,52	3,84
TX	SomHJ	—	Hi	0,98	4,21	4,56
TX	Her	—	Hi	0,97	4,78	6,20
TX	Win	—	Hi	0,82	2,63	4,52
TX	Som	> 30°C	Hi	0,78	—	—
TX	Win	< 0°C	Hi	0,63	—	—
RR	Som	—	Lo KliNied	0,56	1,64	2,04
RR	Som	—	Lo Klistat	0,58	1,70	2,82
RR	Win	—	Lo KliNied	0,71	1,15	1,19
RR	Win	—	Lo Klistat	0,71	1,12	1,16
RR	Fru	p > 10mm	Hi	0,58	—	—
RR	Som	p > 10mm	Hi	0,58	—	—
RR	Her	p > 10mm	Hi	0,61	—	—
RR	Win	p > 10mm	Hi	0,61	—	—
RR	Som	p > 10mm	Alle	0,56	—	—
RR	SomHJ	p > 10mm	Hi	0,55	—	—
RR	Win	p > 10mm	Alle	0,62	—	—
FF	Som	> 8 m/s	Hi 30%	0,59	—	—
FF	Som	> 8 m/s	Lo 30%	0,40	—	—
FF	Win	> 8 m/s	Hi 30%	0,70	—	—
FF	Win	> 8 m/s	Lo 30%	0,63	—	—

Für den *Niederschlag* (RR) lässt sich zunächst konstatieren, dass durch KlaMuKo beachtlich hohe Korrelationen von rund 0,6 (Sommer) bis über 0,7 (Winter) erzielt werden können. Ob die Niederschlagsdaten der rund 200 Niederschlagsstationen (Stat-Sel: KliNied) oder der rund 20 Klimastationen (Stat-Sel: KliStat) zum Einsatz kommen hat nur marginalen Einfluss auf MKK – die Korrelation

bleibt praktisch gleich. Wird das Überschreiten einer Schwelle von 10mm/Tag als Prediktand verwendet, so sind die multiplen Korrelationen in den Jahreszeiten relativ ähnlich.

Bezüglich der Aufspreizung des Wertebereichs durch die verschiedenen KLaMuKo-Klassifikationen sind für RR mit AWB1 zwischen 1,1 und 1,7 deutlich niedrigere Werte als für TX zu verzeichnen. Es gibt Hinweise, dass im Sommer ein geringes zusätzliches Potenzial in der Nutzung der zweiten KLaMuKo-Stufe liegt (Zunahmen auf AWB2-Werte bis rund 2,8), während im Winter die erste Stufe ausreichend ist.

Bei den Untersuchungen des *Tagesmittels der Windgeschwindigkeit* (FF) wurde dieser Prediktanden in transformierter Form zur Analyse verwendet: Es erfolgte eine Binarisierung mit Schwellwert- und Repräsentanz-Fokussierung. Für einen Tag wurde in der transformierten Zeitreihe eine 1 gesetzt, falls an 30% der Stationen eine Schwelle von 8m/s überschritten wurde. Eine 0 wurde gesetzt, falls diese Kriterium nicht erfüllt war. Zudem erfolgte die Analyse mit der Untermenge der Stationen mit hohen (*Stat.-Sel:* Hi, Bergstationen) bzw. niedrigen (*Stat.-Sel:* Lo, Flachlandstationen) klimatischen Windmittelwerten. Die Untersuchungsjahreszeiten waren der Sommer und der Winter. Insgesamt ist im Winter ein höheres Korrelationsniveau (0,6...0,7) als im Sommer (0,4...0,6) zu verzeichnen. Zudem zeigen die MKK-Werte, dass an Stationen, die im klimatischen Mittel relativ hohe Windgeschwindigkeitswerte aufweisen (Bergstationen) die Neigung zu relativ hohen MKK-Werten besteht. Das heißt, für diese Höhenlage ist die Beschreibbarkeit durch die Prediktoren relativ gut. Tiefer gelegenen Stationen weisen hingegen geringere MKK-Werte aus. Das hängt damit zusammen, dass die Einflussfaktoren auf den Bodenwind an Talstationen vielgestaltiger sind, was die Korrelationen reduziert.

C.9 Gewitter-, Schauer- und Starkwind-Indikatoren aus SYNOP-Daten als Prediktanden

Die Ausführungen im vorigen Abschnitt dienten der Veranschaulichung, in welchem Maß für die dort untersuchten Prediktanden (Klimavariablen TX...FF) Saisonalität und Aufbereitungsmethoden bezüglich der Beschreibung mit KLaMuKo verknüpft sind. Der Kern des Vorhabens sind jedoch konvektive Ereignisse im Sommer, auf deren Beschreibung in diesem Abschnitt eingegangen wird.

Anders als bei den Klimavariablen wie TX, RR oder FF, die auf einen Zeitraum von 1979–2010 zurückgreifen können, ist der „Lernzeitraum“ für das Modell bei SYNOP-Daten mit 1991–2010 kürzer. Diesbezügliche Randbedingungen sind in Abschnitt 2.2 dargestellt.

Welche der potenziellen Prediktoren sind aber für die Beschreibung der Prediktanden Gewitter, Schauer und Starkwind relevant? Aus Abb. C.2 ist dies für verschiedene Indizes und deren Kombinationen ersichtbar.

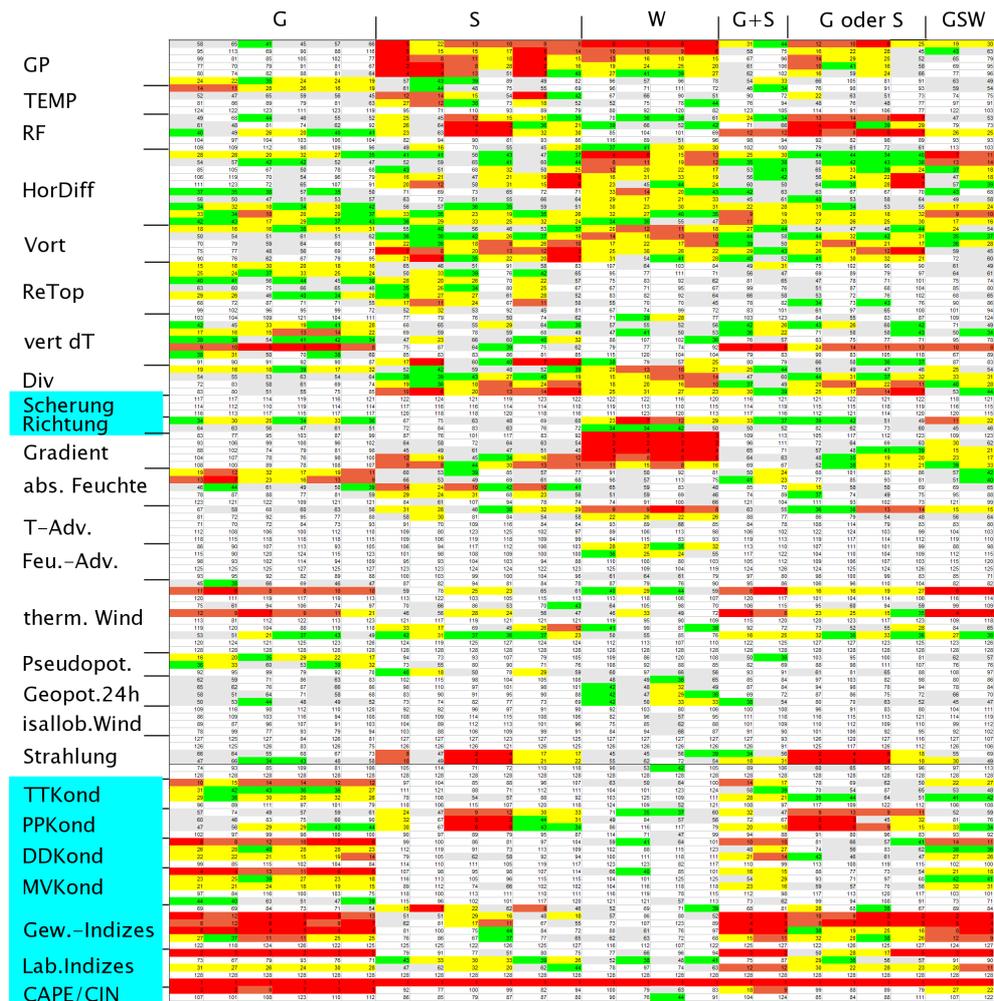


Abbildung C.2: Übersicht der Relevanzstufen (Farbzuordnung in der Aufstellung auf S. XXI) der 130 potenziellen Prediktoren (genaue Bezeichnungen: s. Tab. B.1; die mit der Erweiterung auf 130 Mitglieder hinzugekommenen Prediktoren sind mit hellblauen Rechtecken unterlegt) für Gewitter-, Schauer- und Starkwindindizes, ermittelt aus SYNOP-Meldungen an Stationen in Hessen.

Die Spalten in Abb. C.2 sind wie folgt zugeordnet:

- Gewitterindikatoren (G), Spalten 1–6
 - bin 30pro** Binarisiert (Werte 0 oder 1) nach der Maßgabe, dass an 30% der Stationen Gewitter auftraten, für die Sommermonate
 - bin 70pro** Binarisiert (Werte 0 oder 1) nach der Maßgabe, dass an 70% der Stationen Gewitter auftraten, für die Sommermonate
 - bin einfach, Sommer** Binarisiert (Werte 0 oder 1) nach der Maßgabe, dass an irgendeiner der Stationen Gewitter auftraten, für die Sommermonate (JJA)
 - bin einfach, Sommerhalbjahr** Binarisiert (Werte 0 oder 1) nach der Maßgabe, dass an irgendeiner der Stationen Gewitter auftraten, für die Sommerhalbjahre (AMJJAS)

Anteil, Sommer Stationsanteil (Wertebereich zwischen 0 und 1) mit Gewittern an einem Tag für die Sommermonate

Anteil, Sommerhalbjahr Stationsanteil (Wertebereich zwischen 0 und 1) mit Gewittern an einem Tag für die Sommerhalbjahre

- Schauerindikatoren (S), Spalten 7–12, Zuordnung der dargestellten Kriterien in Analogie zu den Gewitteruntersuchungen (s.o.)
- Starkwindindikatoren (W), Spalten 13–16, reduzierte Zuordnung der dargestellten Kriterien – benutzt wurden die oben unter 1., 3., 4. und 5. aufgeführten Untersuchungen
- G und S gemeinsam, sofern dies an irgendeiner der Stationen der Fall war; Spalten 17 (Sommermonate) und 18 (Sommerhalbjahr)
- Entweder G oder S oder beide, sofern dies an irgendeiner der Stationen der Fall war; Spalten 19 (Sommermonate) und 20 (Sommerhalbjahr)
- Entweder G oder S oder beide, ausgedrückt als Stationsanteil (0...1); Spalten 21 (Sommermonate) und 22 (Sommerhalbjahr)
- G und S und W gemeinsam, sofern dies an irgendeiner der Stationen der Fall war; Spalten 23 (Sommermonate) und 24 (Sommerhalbjahr)

Zunächst ist anzumerken, dass der multiple Prediktor (Nr. 128) naturgemäß in jedem Fall den ersten Platz einnimmt, weswegen sich in Abb. C.2 unten ein rotes Band durch alle Spalten zieht.

Es fällt auf, dass für die *Gewitter*-Indikatoren eine Häufung an roten und gelben Markierungen bei den Prediktoren im unteren Viertel der Abb. C.2 zu erkennen ist. Die im Rahmen des Vorhabens neu hinzu gekommen Prediktoren, die den Bestand an potenziellen Prediktoren auf 130 ausweiten, sind also für die Gewitter-Beschreibung von besonderer Bedeutung. Insbesondere gilt für die Labilitäts-Indizes TT, KI, BI und CAPE. Des weiteren finden sich Gewitter-relevante Prediktoren in Form des „klassische“ Showalter-Index. Hingegen wird der Enke-Index (sowohl mit als auch ohne Feuchte) in der Rangfolge der relevanten Prediktoren nicht so weit oben geführt. Andere, synoptisch schlüssige, mit Gewittern verbundene Prediktoren sind die vertikale Temperaturdifferenz, ein Hauptverursacher von Labilität, sowie der thermische Wind, per Windscherung mit starker Konvektion verbunden. Eine leichte Assoziation findet sich zudem zur Temperatur der unteren Troposphäre (1000 und 850 hPa), was auf eine Verbindung zur Labilität und Gewitter auslösenden bodennahen Überhitzung hinweist.

Eine weitere Auffälligkeit ist, dass Gewitter offenkundig mit einem deutlich anderen Satz an Prediktoren in Verbindung sind als Schauer und Starkwind. Das Auftreten von *Schauern* besitzen eine starke Assoziation zu dynamischen

Größen (Geopotenzial in verschiedenen Niveaus, Vorticity) aber auch zu thermodynamischen Größen (relative Feuchte) und mit Wolkenbildung verbundene Strahlungsgrößen.

Für die Beschreibung des *Starkwinds* ist, wie bei den Schauern ebenfalls das Geopotenzial relevant. Ein weiterer Schwerpunkt der relevanten Prediktoren liegt beim Gradienten des Geopotenzials. Die meisten seit der zweiten Vorhabsphase hinzu gekommenen Labilitätsmaße haben hingegen keine ausgeprägte Verbindung zu Schauern und Starkwind.

In den kombinierten Maßen (G+S, G oder S, G+S+W) findet sich im Wesentlichen eine Überlagerung der maßgeblichen Prediktoren aus den beteiligten Indikatoren. Durch die Beteiligung des Gewitterindikators an den untersuchten Kombinationen wird ein relativ starker Einfluss der Labilitätsmaße sichtbar.

Beurteilung der KlaMuKo-Klassifikation für die Prediktanden Gewitter, Schauer und Starkwind – im Lichte der verschiedenen Aufbereitungsarten der Prediktanden-Zeitreihen

Wie Tab. C.2 zeigt, sind Gewitter, wie sie aus den synoptischen Stationsmeldungen ermittelt wurden, mit atmosphärischen Feldgrößen je nach Selektionsstrategie (binarisiert in den drei Varianten (i) Auftreten überhaupt, (ii) Auftreten an 30% der Stationen oder (iii) Auftreten an 70% der Stationen sowie Bestimmung des Stationsanteils normiert auf das Intervall [0...1]) mit einer multiplen Korrelation zwischen rund 0,5 und 0,65 assoziiert.

Zudem besteht eine ganz leichte Neigung, dass die Korrelationen höher sind, wenn die meteorologischen Sommermonate (JJA) und nicht das Sommerhalbjahr (AMJJAS) betrachtet wird – ein Hinweis darauf, dass beim Halbjahr Einflüsse der übrigen Jahreszeiten mit ihren Spezifika das Resultat ‚verwässern‘.

Deutliche Unterschiede der Leistungsfähigkeit zwischen einfacher Binarisierung und der Bestimmung des Anteils der Stationen, für die an einem Tag das Gewitterkriterium zutraf, sind nicht zu konstatieren, in beiden Fällen ist MKK bei $\sim 0,60 \dots 0,65$. Von ähnlicher Größenordnung sind auch die Korrelationen bei einer Binarisierung mit einem relativ „toleranten“ Kriterium, das einen Stationsanteil von 30% fordert. Demgegenüber zeigt es sich, dass eine Binarisierung mit dem verschärften Kriterium, dass Gewitter bei einem Stationsanteil von 70% fordert, möglicherweise zu streng ist – hier liegt die Korrelation deutlich unter 0,5.

Schauer- und Starkwindtage werden, so die KlaMuKo-Analysen, von den großräumigen Atmosphärenfeldern mit einer multiplen Korrelation von 0,5 bis 0,8 (!) beschrieben. Am besten arbeitet KlaMuKo diese Verbindung heraus, wenn die analysierten Daten den Anteil der Stationen darstellen, an denen Schauer, bzw. Gewitter auftraten. Eine besonders ausgeprägte Fokussierung der Ergebnisse, wenn die Sommermonate oder das Sommerhalbjahr betrachtet werden ist bei Schauern und Starkwind jedoch nicht erkennbar.

C.9 Gewitter-, Schauer- und Starkwind-Indikatoren als Prediktanden

Tabelle C.2: Analyse von multiplem Korrelationskoeffizienten (*MKK*) mit den vier relevantesten aus 130 potenziellen Prediktoren selektierten Größen sowie Aufspreizung des Wertebereichs unter Verwendung der Klassen der KlaMuKo-Stufe 1 (*AWB1*) und aller Klassen der KlaMuKo-Stufe 2 (*AWB2*) für die Indikatoren (*Ind*) für Gewitter (G), Schauer (S) und Wind (W) und einige Kombinationen in den Sommermonaten (*Som*) bzw. im Sommerhalbjahr (*SHJ*). Zudem kamen verschiedenen Selektionskriterien *Sel.* zum Einsatz: bin - Auftreten an irgendeiner der Stationen; 30pro Auftreten an mindestens 30% der Stationen; 70pro - Auftreten an mindestens 70% der Stationen; RStat - Anteil der Stationen, an denen das Kriterium auftrat (0...1).

<i>Ele</i>	<i>Som/SHJ</i>	<i>Sel.</i>	<i>MKK</i>	<i>AWB1</i>	<i>AWB2</i>
G	Som	30pro	0,57	—	—
G	Som	70pro	0,45	—	—
G	Som	bin	0,65	—	—
G	SHJ	bin	0,60	—	—
G	Som	RStat	0,64	0,15	0,16
G	SHJ	RStat	0,59	0,12	0,13
S	Som	30pro	0,54	—	—
S	Som	70pro	0,45	—	—
S	Som	bin	0,70	—	—
S	SHJ	bin	0,68	—	—
S	Som	RStat	0,80	0,20	0,25
S	SHJ	RStat	0,76	0,19	0,25
W	Som	30pro	0,54	—	—
W	Som	bin	0,53	—	—
W	SHJ	bin	0,51	—	—
W	Som	RStat	0,61	0,10	0,13
W	SHJ	RStat	0,61	0,10	0,11
G+S	Som	bin	0,62	—	—
G+S	SHJ	bin	0,58	—	—
G+S	Som	RStat	0,74	—	—
G+S	SHJ	RStat	0,72	—	—
G oder S	Som	bin	0,70	—	—
G oder S	SHJ	bin	0,68	—	—
G oder S	Som	RStat	0,74	0,31	0,32
G oder S	SHJ	RStat	0,74	0,27	0,29
G+S+W	Som	bin	0,59	—	—
G+S+W	SHJ	bin	0,54	—	—
G+S+W	Som	RStat	0,73	—	—
G+S+W	SHJ	RStat	0,70	—	—

Kombinationen der Eintrittskriterien (G+S, G oder S, G+S+W) weisen zum Teil etwas höhere multiple Korrelationen auf als die einzelnen Eintrittskriterien. Das heißt, es besteht eine leichte Tendenz, dass die Forderung, mehrere Kriterien mögen erfüllt sein, auch durch besser definierte Atmosphärenzustände reflektiert wird.

Stichprobenartig wurde zudem untersucht, wie viel Informationsgewinn in der Nutzung der ersten bzw. zweiten Stufe von KlaMuKo liegt. Es sei darauf hingewiesen, dass hier, wie schon im Zusammenhang mit den KlaMuKo-Analysen der Klimaparametern (TX...FF, Abschnitt C.8) gilt: Das AWB-Maß, mit dem die Aufspreizung des Wertebereichs durch die Klassifikation gemessen wird, kann nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn die klassifizierte Größe nicht binarisiert ist, sondern einen kontinuierlichen Wertebereich annehmen kann. Diese Voraussetzung ist nur bei der Aufbereitungsform *Stationsanteil* gegeben. In der Zusammenschau sollte festgehalten werden, dass keine großen Unterschiede zwischen AWB1 und AWB2 bestehen, die Aufspreizung des Wertebereichs durch die Verwendung der Klassifikation der zweiten KlaMuKo-Stufe nur in sehr geringem Maße zunimmt.

C.10 Ergänzende Betrachtung: KlaMuKo mit zufällig angeordneten Prediktandenreihen

In einem Experiment wurde der Frage nachgegangen, welche ‚scheinbare Leistungsfähigkeit‘ das Verfahren besitzt, d.h. welche Verbindungen zwischen lokalen Klimaparametern und großräumigen Feldeigenschaften rein zufällig und ohne die Existenz von real ablaufenden Wetterepisoden entstehen. Dazu wurde die Zeitreihe in eine zufällige Reihenfolge gebracht und auf diese das KlaMuKo-Verfahren angewandt. Diese Untersuchung erfolgte für

- die Maximumtemperatur im Sommer, Selektion der tief gelegenen Stationen, Nutzung des Pools von 130 potenziellen Prediktoren ohne die Bildung des multiplen Prediktors sowie
- den Niederschlag im Sommer, Selektion der Stationen mit relativ geringen Niederschlagsmengen und Selektion der Klimastationen ohne den Einsatz der Niederschlagsstationen, Nutzung des Pools von 130 potenziellen Prediktoren ohne die Bildung des multiplen Prediktors.

Bezüglich der *Temperatur* ist KlaMuKo sehr wohl in der Lage, *kalte* und *warme* Klassen zu bilden. Allerdings liegt die erreichbare multiple Korrelation zwischen dem Prediktor und den per Screening gefundenen Prediktanden in einer Größenordnung von 0,15²⁾ – zur Erinnerung: Bei der Analyse der regulären, nicht randomisierten Zeitreihe war diese Korrelation deutlich über 0,9.

Auch beim Niederschlag werden multiple Korrelationen von einer Größenordnung von 0,15 mit der randomisierten Prediktandenreihe gefunden.

²⁾Die Einfachkorrelationen überschreiten 0,07 nicht

Eine Erkenntnis dieses Experiments ist, dass eine „Minimalforderung“ bezüglich der Korrelation abgeschätzt werden kann. Zudem ist auffällig, dass die Klassen, die unter Verwendung der randomisierten Daten gebildet werden, deutlich stärkere klassenspezifische Streuungen aufweisen – das heißt die mit den regulären Daten gewonnenen Klassen sind kompakter und orientieren sich dichter um ihren Mittelpunkt.

D Reproduzierbarkeit von GP, TE und RF in Modellergebnissen

D.1 Motivation

Um ein realistisches Bild zu erhalten, inwieweit das untersuchte Klimamodell (MPI-ESM) in der Lage ist, den Wertebereich von atmosphärischen Größen wiederzugeben erfolgte eine dezidierte Analyse. Schließlich werden diese ja als potenzielle Prediktoren oder zur Bestimmung deren Berechnung verwendet, und es ist zu klären, wie belastbar Modell-gestützte Aussagen sein können. Hier wurde wie folgt vorgegangen.

- An einem Gitterpunkt im äquidistanten Feld¹⁾ werden die Daten für folgende Größen jeweils in den Flächen 850, 700 und 500 hPa extrahiert:
 - Geopotenzial (GP),
 - Temperatur (TE) – beim Pool der 60 potenziellen Prediktoren, wie er in zu Beginn Machbarkeitsstudie (Stand 2012) zur Verfügung stand sind nicht alle Flächen vorhanden,
 - Relative Feuchte (RF) – beim Pool der 60 potenziellen Prediktoren, wie er in zu Beginn Machbarkeitsstudie (Stand 2012) zur Verfügung stand sind nicht alle Flächen vorhanden.
- Die Untersuchung betrachtet folgende Datenquellen und Zeithorizonte:
 - NCAR2-Reanalysen (1979–2010) um das *gemessene Klima* abzubilden; NCAR2 ist eine aktualisierte und höher aufgelöste Variante der Reanalysen des NCAR, die in mehr Flächen aber nur für einen verkürzten Zeitraum verfügbar ist;
 - 20C-Simulationen des Globalen Klimamodells MPI-ESM (1979–2000);
 - Klimaprojektionen des Globalen Klimamodells MPI-ESM, angetrieben mit einem Treibhausgas-Szenario (2071–2100)

¹⁾Ausgangspunkt für KLaMuKo-Analysen ist die Interpolation von einem Längen-/Breitenkreis-bezogenen auf ein Gitter, bei dem alle Punkte in gleichem Abstand von rund 100 km sind. Der zentrale Punkt, auf den sich dieses Gitter bezieht, liegt bei 50°N 10°E. An diesem werden auch die in diesem Kapitel vorgestellten Daten extrahiert.

- Für den Zustand „60 potenzielle Prediktoren“ (wie er vor dem Beginn dieses Vorhabens, zur Zeit der Durchführung der Machbarkeitsstudie herrschte) wurde die Kombination NCAR – ECHAM5 – Szenario A1B betrachtet.
Für den Zustand „130 potenzielle Prediktoren“ (wie er im Laufe dieses Vorhabens entstand) wurde die Kombination NCAR2 – MPI-ESM – Szenario RCP8.5 betrachtet.
- Es wurden Häufigkeitsverteilungen der extrahierten Werte bestimmt und in prozentuale Häufigkeiten umgerechnet.
- Um einen Eindruck von den Unterschieden der beiden im Laufe der Zeit verwendeten NCAR-Reanalysen zu erhalten, wurden zusätzlich tägliche Differenzen zwischen den Feldwerten von NCAR und NCAR2 bestimmt.

D.2 Ergebnisse

Eine Gegenüberstellung der Klimas (repräsentiert durch Reanalysen) und den Modellierungen für die Gegenwart und die Zukunft (MPI-ESM, 20C bzw. RCP8.5) findet sich in Abb. D.1. Hier zeigen die Verteilungen der relativen Häufigkeiten für die „ori“-Daten (s.o.), dass Geopotenzial und Temperatur im Modell relativ ähnliche Größenordnungen besitzen, während für die relative Feuchte deutliche systematische Abweichungen auftreten.

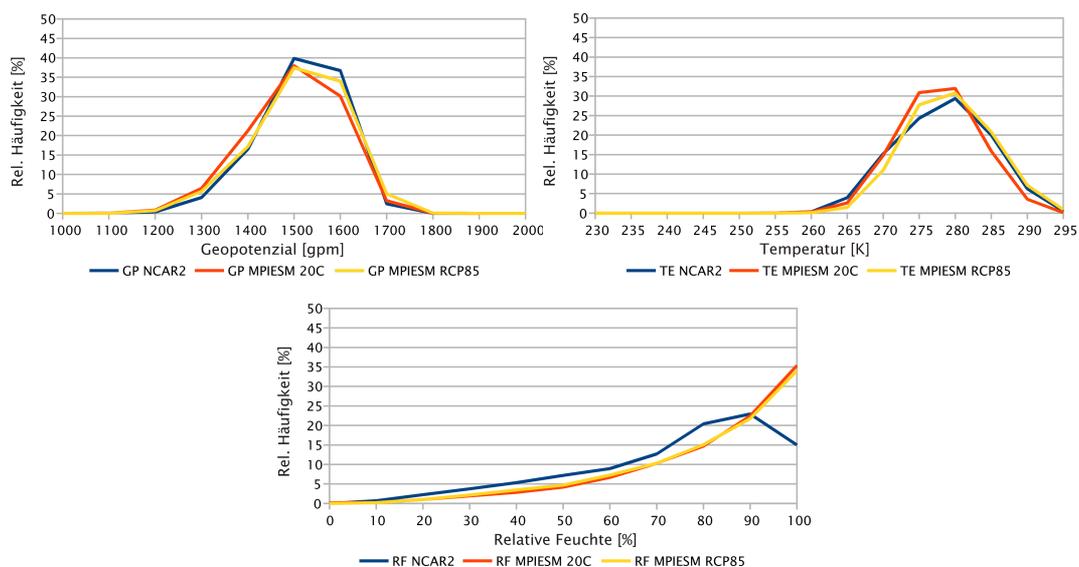


Abbildung D.1: Relative Häufigkeit der 850 hPa-Werte für Geopotenzial (oben links), Temperatur (oben rechts) und relative Feuchte (unten) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume. Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979–2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979–2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071–2100.

Im Wertebereich zwischen 0 und 70% ist die Übereinstimmung zwischen reanalysierter (d.h. Messungs-basierter) und modellierter relativer Feuchte in dieser Fläche noch akzeptabel – jedoch tritt jenseits der 90% eine große Diskrepanz auf: Während die Reanalysen diesen Bereich sehr hoher Feuchten mit rund 15% aller Fälle ausweisen, ist es bei den mit MPI-ESM simulierten Daten mehr als das Doppelte (!), wobei der Unterschied zwischen 20C und der RCP8.5-Projektion nur sehr gering ist. Die analysierten Feuchte-Verhältnisse in 850, 700 und 500 hPa sind Abb. D.2 einander gegenüber gestellt.

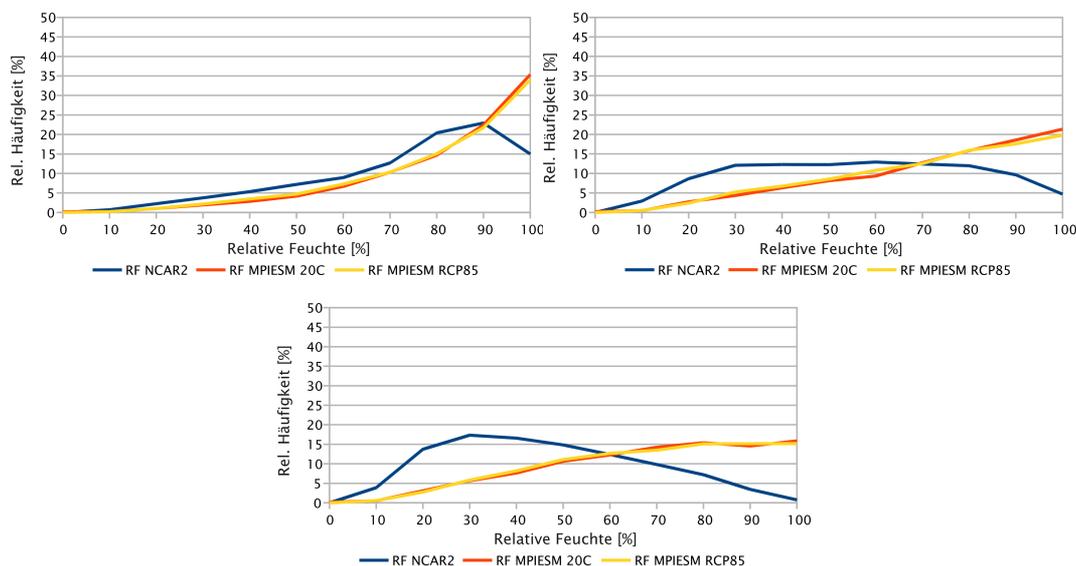


Abbildung D.2: Relative Häufigkeit der Werte für die relative Feuchte 850 hPa (oben links), 700 hPa (oben rechts) und 500 hPa (unten) am Gitterpunkt 50°N 10°E für jeweils rund 30-jährige Zeiträume. Datenquellen: Reanalysen (blaue Linien): NCAR2, 1979–2010; 20C (rote Linien): MPI-ESM 20C, 1979–2000; Projektion (gelbe Linien): MPI-ESM RCP8.5, 2071–2100.

Es zeigt sich, dass der in 850 hPa konstatierte Effekt der Überrepräsentierung hoher Luftfeuchten im Modell sich in höheren Luftschichten weiter verstärkt. Während die Messungs-basierterem Resultate der Reanalysen für 700 hPa eine Sättigung nur mit 5% Häufigkeit und für 500 hPa fast überhaupt keine relativen Feuchten von 90% und mehr ausweisen.

Ist dies vielleicht ein Folgeerscheinung des Übergangs der Datenkette NCAR – ECHAM5 – A1B \Rightarrow NCAR 2 – MPI-ESM – RCP8.5 also zwischen den Datenlagen der Machbarkeitsstudie und dieses Vorhabens?

Abb. D.3 zeigt die Verhältnisse bei Nutzung der Datenkette NCAR – ECHAM5 – A1B. Der Vergleich mit Abb. D.1 ergibt für GP und TE ein analoges Bild mit relativ hoher Ähnlichkeit der Größenordnung von Messdaten-basierten und simulierten Werten. Die deutliche Diskrepanz zwischen gemessenen und simulierten Feuchtwerten im Bereich der sehr hohen Luftfeuchten ist ebenfalls in dieser Datenkette erkennbar.

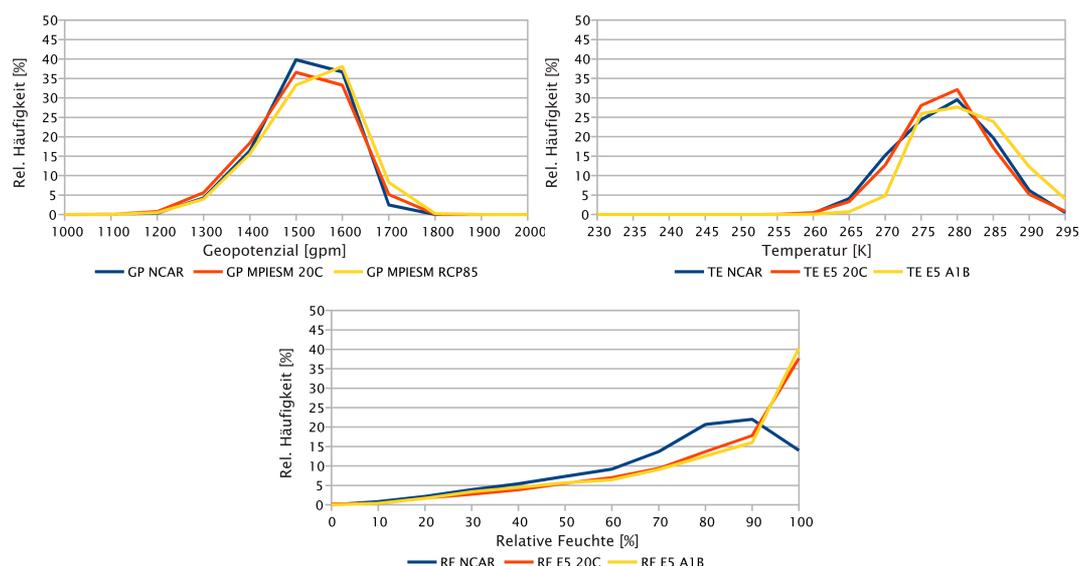


Abbildung D.3: Wie Abb. D.1, jedoch auf der Datenbasis von 2012, wie sie bei der Machbarkeitsstudie existierte: Reanalysen (blaue Linien): NCAR, 1979–2010; 20C (rote Linien): ECHAM5 20C, 1979–2000; Projektion (gelbe Linien): ECHAM5 A1B, 2071–2100.

Mit Blick auf die beiden Reanalysen (NCAR und NCAR2) wurde zudem untersucht, welche Unterschiede für jeweils gleiche Tage zwischen dem älteren (NCAR) und dem neueren (NCAR2) Datensatz bestehen. Dazu wurden für GP, TE und RF die Differenzen $NCAR_d - NCAR2_d$ für alle Tage d gebildet und daraus relative Häufigkeitsverteilung berechnet. Abb. D.4 zeigt jeweils Ausschnitte aus der relativen Häufigkeitsverteilung in der Umgebung des Nullpunkts.

Wären beide Reanalysen exakt gleich, so wäre die Differenz an jedem Tag $\equiv 0$. Dies ist zwar nicht der Fall, aber es gibt eine deutlich Häufung der Differenzen im Bereich um 0 bei allen untersuchten Klimagrößen und Flächen. Die Welligkeit der Verteilungen ist von Rundungen im Aufbereitungsprozess verursacht, die bestimmte Werte bevorzugen. Somit zeigt sich auch im Zuge dieser Betrachtung, dass die beiden Reanalyse-Datensätze nur geringe Unterschiede aufweisen.

D.3 Schlussfolgerungen: Belastbarkeit der GP-, TE- und RF-Simulationsdaten

Viele der potenziellen Prediktoren (vgl. Tab. B.1) werden nur auf der Basis von Geopotenzial und Temperatur berechnet. Bei diesen besteht ein relativ hoher Grad an Übereinstimmung, die Größenordnung und die Häufigkeitsverteilung der Werte betreffend, zwischen Reanalyse und simulierten Daten.

Anders stellt es sich bei der Feuchte dar. Für diese Größe gibt es bei den Daten des Modells Probleme bei der Reproduktion einer aus den NCAR-Reanalysen

D.3 Schlussfolgerungen: Belastbarkeit der GP-, TE- und RF-Simulationsdaten

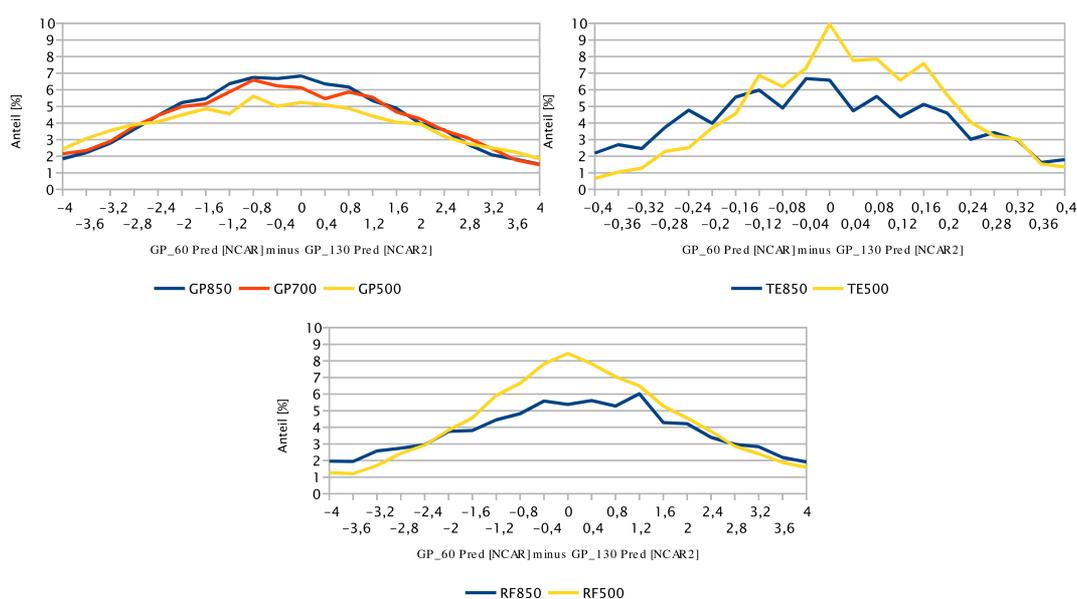


Abbildung D.4: Unterschiede zwischen den Reanalysen NCAR und NCAR2, bestimmt aus täglichen Differenzen zwischen diesen beiden Datenarten im Zeitraum 1979–2010. Die Subfiguren zeigen Verteilungen der relativen Häufigkeit für das Geopotenzial (oben links), die Temperatur (oben rechts) und die relative Feuchte (unten) in verschiedenen Niveaus: 850 hPa (blaue Linien); 700 hPa (rote Linien, nur Geopotenzial); 500 hPa (gelbe Linien).

berechneten Häufigkeitsverteilung der Werte. Insbesondere simuliert das Modell deutlich zu viele sehr hohe Feuchtwerte. Dies hat Einfluss auf die Belastbarkeit einiger auch schon in der Vergangenheit benutzten Prediktoren (vgl. Tab. B.1), also die absolute Feuchte, die Feuchteadvektion, die pseudopotenzielle Temperatur, die Einstrahlung oder die Indizes nach Showalter und Enke. Die Mehrheit der im Laufe der zweiten Projektphase hinzugekommenen Labilitäts-Prediktoren bezieht ebenfalls Feuchteinformation mit ein.

Welchen Einfluss hat die identifizierte Feuchteproblematik auf die Ergebnisse dieses Vorhabens? Wie in Abschnitt C vorgestellt, ermittelt das Screening-Verfahren dazu: Es gibt – spezifisch für die betrachteten Zielgrößen (Prediktanden) – Prediktoren und Prediktorengruppen, die über hohe Korrelationen mit den Zielgrößen verfügen. Andere werden bei der Ermittlung der besonders relevanten Prediktoren im Rahmen von KlaMuKo nur selten oder gar nicht in Betracht gezogen. KlaMuKo-Untersuchungen, bei denen der Prediktand eine aus Messungen von Klima- bzw. Niederschlagsstationen bestimmte, in der Fläche gemittelt Größe ist, wurden in Abb. C.1 auf Seite XXII vorgestellt. Hier ist zu konstatieren:

- Naturgemäß werden *Temperatur*-bezogenen Zielgrößen (z.B. Mittel von TX aus Messungen an Stationen in Hessen) häufig aus GP- oder TE-verbundenen Prediktoren zu ermitteln sein. Aber auch absolute Feuchte oder die Pseudopotenzielle Temperatur (beide stehen u.A. für den Einfluss von Wolkenbildung auf das Temperaturregime) sind für die Temperaturbeschreibung relevant.

- Beim Prediktanden *Niederschlag* hingegen stehen viele der identifizierten relevanten Prediktoren im Zusammenhang mit Feuchte. Andererseits gibt es auch dort dynamische, stärker vom Geopotenzial abhängige, relevante Prediktoren, wie die Vorticity und die Divergenz (beide haben einen starken Zusammenhang mit Bildung/Auflösung von Niederschlagsgebieten).
- Der Prediktand *Wind* wird praktisch exklusiv mit GP-verbundenen Prediktoren (Betrag des Geopotenzials und Geopotenzial-Gradient) beschrieben.

Umfangreiche Untersuchungen fanden mit abgeleitete Indizes für Gewitter, Schauer und Starkwind statt, die aus SYNOP-Daten gewonnen wurden (vgl. Abb. C.2 auf Seite XXX). Hier gilt:

- Der Prediktand *Gewitterindex* ist besonders stark mit Labilitätsindizes verknüpft, die in hohem Maße auf Feuchteinformation beruhen. Eine weitere relevante Informationsquelle ist der (nicht mit der Feuchte verknüpfte) vertikale Temperaturverlauf.
- Im Falle des Prediktanden *Schauerindex* ist eine Mischung aus Geopotenzial- und Feuchte-bezogenen Prediktoren relevant, die sich aber deutlich von derjenigen für die Beschreibung von Gewittern unterscheidet. Insbesondere ist hier Vorticity und Divergenz (GP-Bezug) sowie verschiedene Feuchtegrößen und Information zum Kondensationsniveau (RF-Bezug) zu nennen.
- Für die KlaMuKo-Beschreibung des SYNOP-*Windindex* finden sich ähnliche relevante Prediktoren wie bei der Untersuchung mit Hilfe von Windmessungen an Klimastationen (s.o.): Das Geopotenzial und dessen Gradient haben zentrale Bedeutung.

Im Lichte der Betrachtungen zur Belastbarkeit der Simulation einzelner atmosphärischer Größen ist festzuhalten, dass es bei vielen mit KlaMuKo beschriebenen Prediktanden eine Mischung aus Prediktoren mit guter und mit weniger guter Modell-Reproduktionsgüte gibt. Diese Situation ist nicht optimal, es kann aber erwartet werden, dass hier bei Zukunfts-Entwicklungsaussagen eine zufriedenstellende Belastbarkeit gibt. Die Beschreibung von Gewittern hingegen bezieht ihre überwiegende Information aus Feuchtegrößen, bei denen die Übereinstimmung von Simulation und Messungen geringer ist – insbesondere im Bereich der besonders hohen Feuchtwerte. Hier ist folglich bei der Interpretation Vorsicht geboten.

E Trends von Prediktoren

Im Kern des KlaMuKo-Verfahrens steht die Strategie, lokale atmosphärische Eigenschaften – insbesondere Extreme – durch großräumige atmosphärische Größen zu umschreiben oder indirekt zu beschreiben.

Ein solche indirekt beschreibende Größe heißt in der Terminologie der Statistik *Prediktor*. In diesem Teil der Untersuchungen ist die Fragestellung, ob es trendartige zeitliche Entwicklungen von Größen gibt, die einen deutlichen Zusammenhang mit bestimmten Extremen (beispielsweise im Auftreten von Starkregen oder Gewittern) aufweisen. Die Auswahl bezieht sich auf die Analyse der relevanten Prediktoren (Abschnitt C, Abb. C.1 und C.2). Sie umfasst

- Temperatur in 850 hPa (T_{850}) – diese Größe steht zum Beispiel mit der Maximumtemperatur (TX) in starker Verbindung; Rangfolgeuntersuchungen (vgl. Abschnitt C) ergeben, dass T_{850} häufig unter den 10 Prediktoren mit der höchsten Korrelation für TX ist. Zwar liegt der Fokus dieser Studie auf konvektiven Ereignissen und nicht auf den Extremen der Temperatur; dennoch wurde TX hier hinzugezogen, weil mit dieser Größe einige Zusammenhänge gut veranschaulicht werden können.
- Absolute Feuchte in 1000 hPa (aF_{1000}) – eine Größe, die konvektive Ereignisse (insbesondere Gewitter) und Niederschlagsprozesse wichtig ist. aF_{1000} ist zudem, wie auch T_{850} für TX bedeutungsvoll.
- TT-Labilitätsindex (TT, s. Abschnitt B.2.4) – diese Größe findet sich bei den Rangfolgeuntersuchung für die Gewitter-Relevanz der 130 Prediktoren verbreitet unter den ersten zehn Rängen. Sie ist somit für die Beschreibung von Gewitterereignissen besonders wichtig.
- CAPE-Labilitätsindex (CAPE, s. Abschnitt B.2.8) – diese Größe findet sich bei den Rangfolgeuntersuchung für die Gewitter-Relevanz der 130 Prediktoren verbreitet unter den ersten fünf Rängen. Sie ist somit für die Beschreibung von Gewitterereignissen besonders wichtig.
- Labilitätsindex nach Showalter (SHW, s. Abschnitt B.2.12) – diese Größe findet sich bei den Rangfolgeuntersuchung für die Gewitter-Relevanz der 130 Prediktoren verbreitet unter den ersten fünf Rängen. Sie ist somit für die Beschreibung von Gewitterereignissen besonders wichtig.

Für die Trendanalysen werden verschiedene Datenquellen verwendet. Die klimatischen Verhältnisse der Gegenwart werden von der Messungen-basierten Klimatologie der NCAR/NCAR2¹⁾ Reanalysen relativ gut dargestellt werden. Daher wird zuerst der Trend der o.g. fünf Prediktoren in den NCAR2-Daten für die Sommermonate des Zeitraums 1979–2010 (rund 3000 Tage) identifiziert.

Diesem *klimatologischen Trend* wird in einem zweiten Schritt der Trend der o.g. fünf Prediktoren, wie er aus den Simulationen eines Klimamodells für diesen Zeitraum berechnet werden kann, gegenübergestellt. Das bedeutet, es erfolgt eine Trendbestimmung der Prediktoren aus der Resimulation des Gegenwarts-klimas mit dem Modell MPI-ESM Lauf 1 für die Sommermonate der Jahre 1979–2010 (rund 3000 Tage). Es sollten zumindest keine widersprüchlichen Trends aus den Reanalysen und den 20C-Simulationen resultieren.

Im dritten Schritt wird die jeweilige zukünftige Trendentwicklung für die fünf Prediktoren ermittelt. Diese Analyse erstreckt sich über einen Zeitraum, der die Sommermonate der Jahre von 1951 bis 2100 (rund 14000 Tage) umfasst. Zum Einsatz kommen 20C-Daten (bis 2005) und Klimaprojektionen, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 (2006–2100) aus dem Modell MPI-ESM Lauf 1.

Analysiert werden Zeitreihen der fünf o.g. Prediktoren, die aus den NCAR2-Reanalysen bzw. des MPI-ESM-Modells an der Koordinate 50N 10E herausgelesen werden. Für alle Prediktoren bis auf T_{850} ist eine Aufbereitung aus den Basisgrößen Temperatur, Geopotenzial und relativer Feuchte notwendig (s. Abschnitt B.2).

E.1 Trends von T_{850}

Diese Größe weist, vom MPI-ESM-Modell simuliert, einen ausgeprägten Anstiegstrend aus. Er beträgt pro Dekade rund 0,35K und für den Zeitraum 1951–2100 rund 5,1K, was Abb. E.1 (c) und Tab. E.1 zeigen. In der Gegenwart ist dieser Trend etwas geringer. Das mittlere Niveau von T_{850} am Gitterpunkt 50N 10E im Zeitraum 1979–2010 wird sowohl von den NCAR2-Reanalysen als auch den 20C Daten mit rund 280K sehr ähnlich bestimmt.

Tabelle E.1: Lineare Trends der Temperatur in 850 hPa für verschiedenen Datenquellen und Zeiträume. Analyse der Sommermonate (JJA).

<i>Datenquelle</i>	<i>Zeitraum</i>	<i>Trend/Dekade</i>	<i>Trend/Zeitraum</i>
NCAR2	1979–2010	0,30	0,98
MPI-ESM 20C	1979–2010	0,22	0,70
MPI-ESM 20C–RCP8.5	1951–2100	0,34	5,10

¹⁾NCAR2 ist die höher aufgelöste, aber nur für einen kürzeren Zeitraum verfügbare, Neufassung der NCAR-Reanalysedaten.

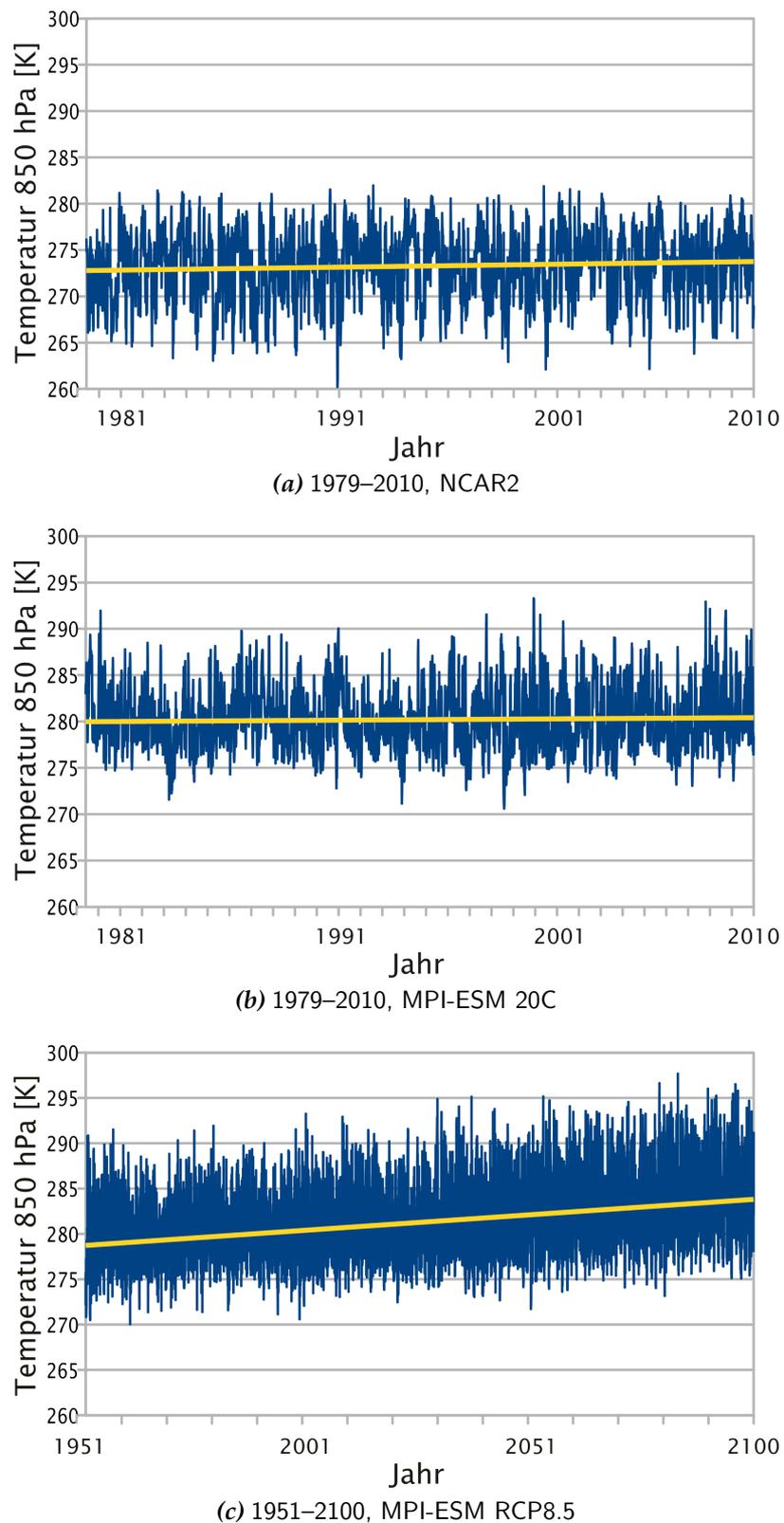


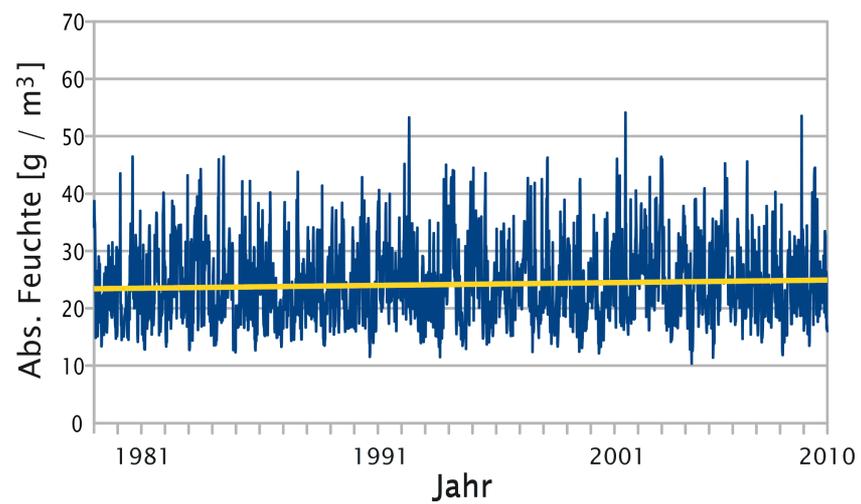
Abbildung E.1: Trends der Temperatur in 850 hPa (dicke gelbe Linie), ermittelt aus (a) Reanaly-sedaten der Jahre 1979–2010, (b) 20C-Daten von MPI-ESM Lauf 1 der Jahre 1979–2010 und (c) Klimaprojektionsdaten von MPI-ESM Lauf 1, angetrieben mit dem Szenario RCP8.5 der Jahre 1951–2100. Koordinate: 50N 10E. Jahreszeit: Sommer (JJA).

E.2 Trends von aF_{1000}

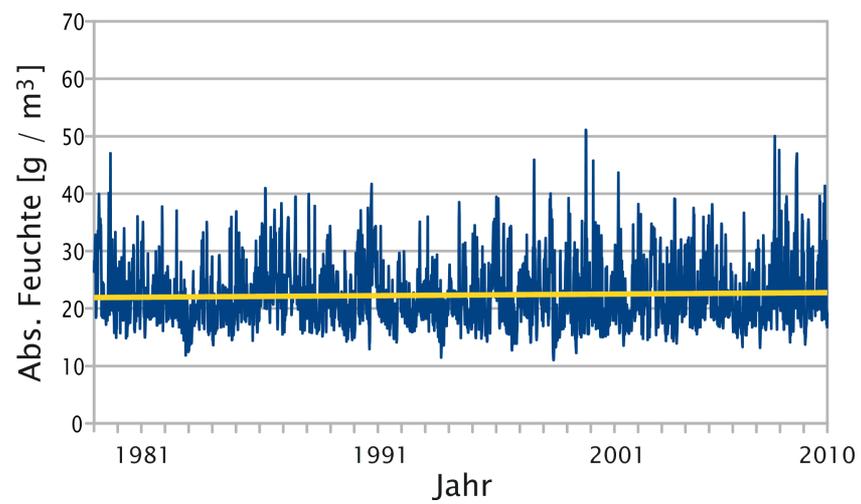
Diese Größe weist, vom MPI-ESM-Modell simuliert, einen ausgeprägten Trend aus. Er beträgt pro Dekade rund $0,6 \text{ g/m}^3$ und für den Zeitraum 1951–2100 rund 9 g/m^3 , was Abb. E.2 (c) und Tab. E.2 zeigen. In der Gegenwart ist dieser Trend geringer. Das mittlere Niveau von aF_{1000} am Gitterpunkt 50N 10E im Zeitraum 1979–2010 wird von den NCAR2-Reanalysen mit rund $24,2 \text{ g/m}^3$ und den 20C Daten mit rund $22,3 \text{ g/m}^3$ abweichend voneinander wiedergegeben.

Tabelle E.2: Wie Tab. E.1, jedoch für die Trends der absoluten Feuchte in 1000 hPa.

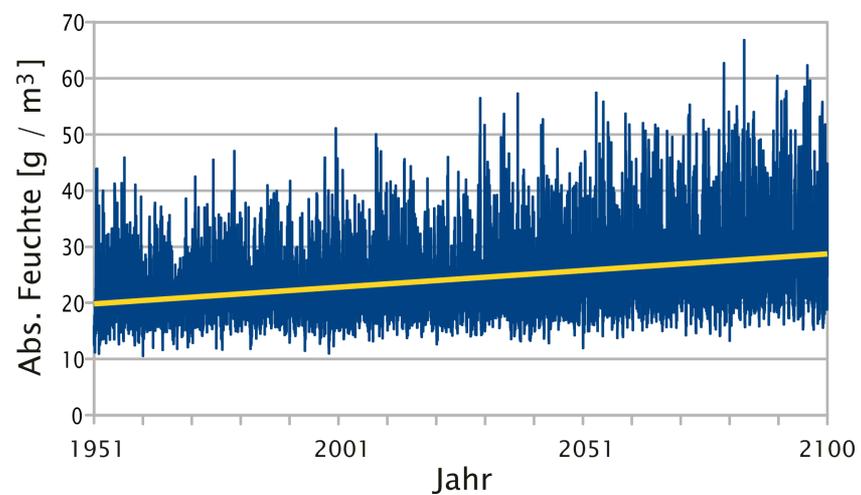
<i>Datenquelle</i>	<i>Zeitraum</i>	<i>Trend/Dekade</i>	<i>Trend/Zeitraum</i>
NCAR2	1979–2010	0,47	1,51
MPI-ESM 20C	1979–2010	0,42	1,34
MPI-ESM 20C–RCP8.5	1951–2100	0,59	8,89



(a) 1979–2010, NCAR2



(b) 1979–2010, MPI-ESM 20C



(c) 1951–2100, MPI-ESM RCP8.5

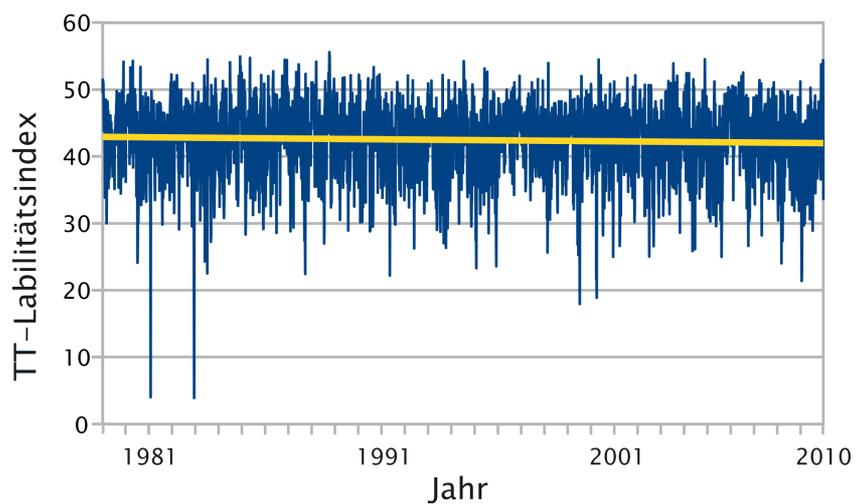
Abbildung E.2: Wie Abb. E.1, jedoch für die Trends der absoluten Feuchte in 1000 hPa (dicke gelbe Linie).

E.3 Trends von TT

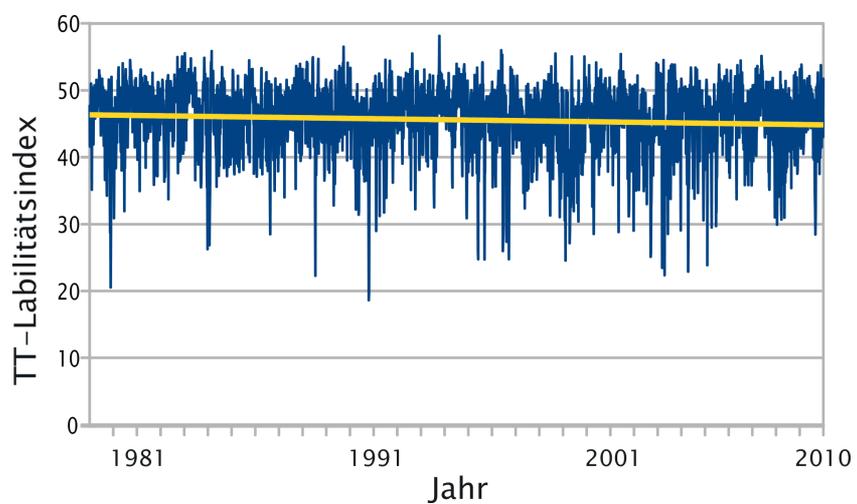
Diese Größe weist, vom MPI-ESM-Modell simuliert, einen gut erkennbaren Abnahmetrend aus. Er beträgt pro Dekade rund $-0,3$ TT-Einheiten und für den Zeitraum 1951–2100 rund $-4,8$ TT-Einheiten, was Abb. E.3 (c) und Tab. E.3 zeigen. In der Gegenwart wird dieser Trend von den NCAR2-Reanalysen und den 20C-Daten von MPI-ESM relativ unterschiedlich wiedergegeben. Das mittlere Niveau von TT am Gitterpunkt 50N 10E im Zeitraum 1979–2010 wird von den Reanalysen mit rund 42,5 Indexeinheiten und den 20C Daten mit rund 45,5 Indexeinheiten ebenfalls leicht abweichend voneinander wiedergegeben.

Table E.3: Wie Tab. E.1, jedoch für die Trends des TT-Labilitätsindex.

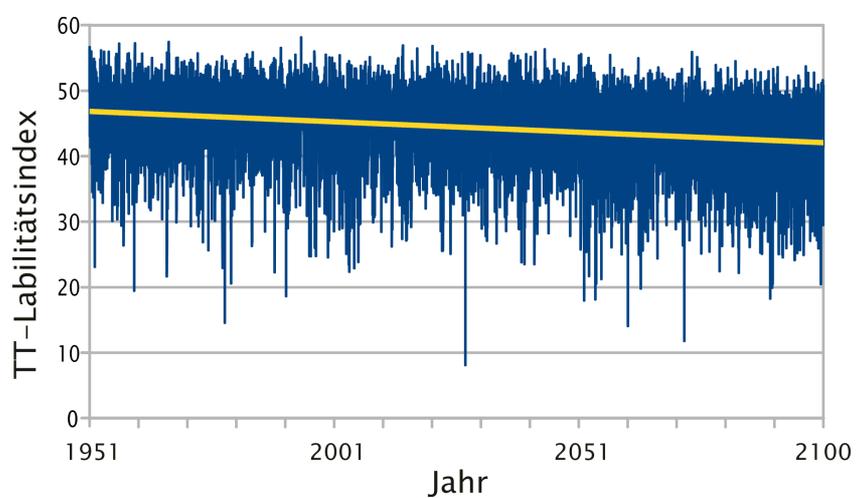
<i>Datenquelle</i>	<i>Zeitraum</i>	<i>Trend/Dekade</i>	<i>Trend/Zeitraum</i>
NCAR2	1979–2010	$-0,29$	$-0,92$
MPI-ESM 20C	1979–2010	$-0,46$	$-1,47$
MPI-ESM 20C–RCP8.5	1951–2100	$-0,32$	$-4,79$



(a) 1979–2010, NCAR2



(b) 1979–2010, MPI-ESM 20C



(c) 1951–2100, MPI-ESM RCP8.5

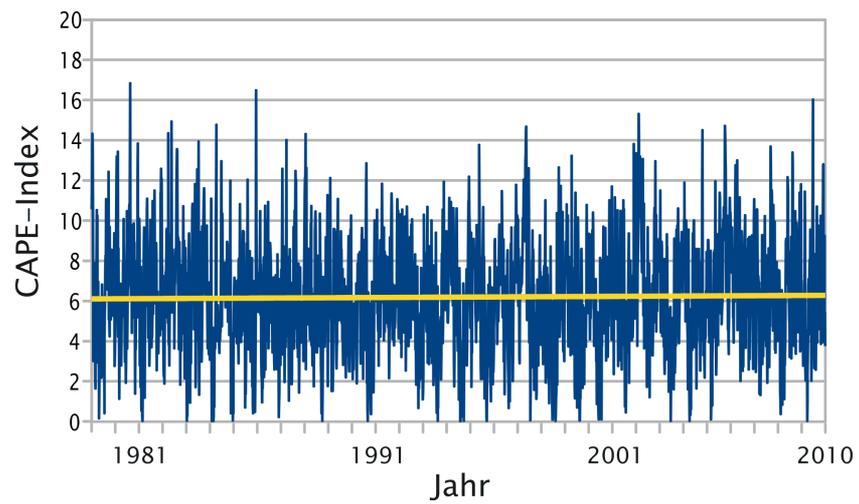
Abbildung E.3: Wie Abb. E.1, jedoch für die Trends des TT-Labilitätsindex (dicke gelbe Linie).

E.4 Trends von CAPE

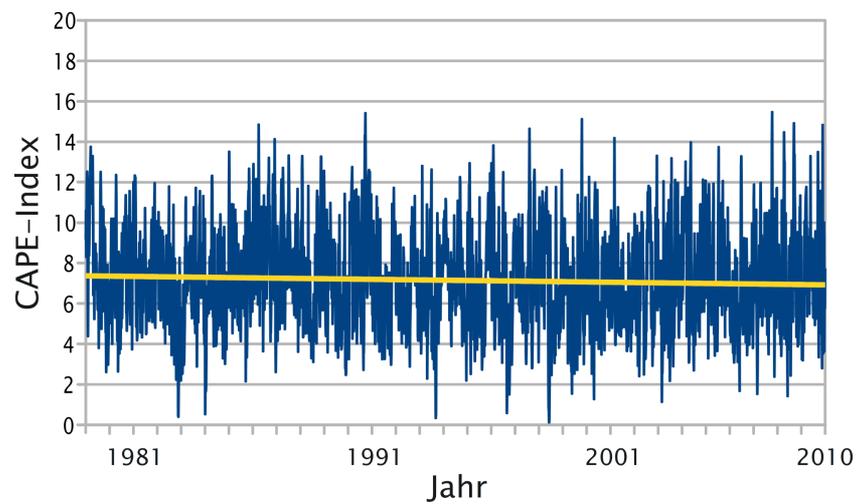
Diese Größe stellt ein Äquivalent zum CAPE-Index dar (s. Abschnitt B.2.8). Sie weist praktische keinen zeitlichen Trend aus (s. Abb. E.4 (c) und Tab. E.4). In der Gegenwart wird dieser Trend von den NCAR-Reanalysen und den 20C-Daten von MPI-ESM zwar nominell unterschiedlich wiedergegeben, aber diese Unterschiede sind eher zufällig. Das mittlere Niveau von CAPE am Gitterpunkt 50N 10E im Zeitraum 1979–2010 wird von den Reanalysen mit rund 6,2 Indexeinheiten und den 20C Daten mit rund 7,2 Indexeinheiten allerdings deutlich abweichend voneinander wiedergegeben.

Tabelle E.4: Wie Tab. E.1, jedoch für die Trends des CAPE-Labilitätsindex.

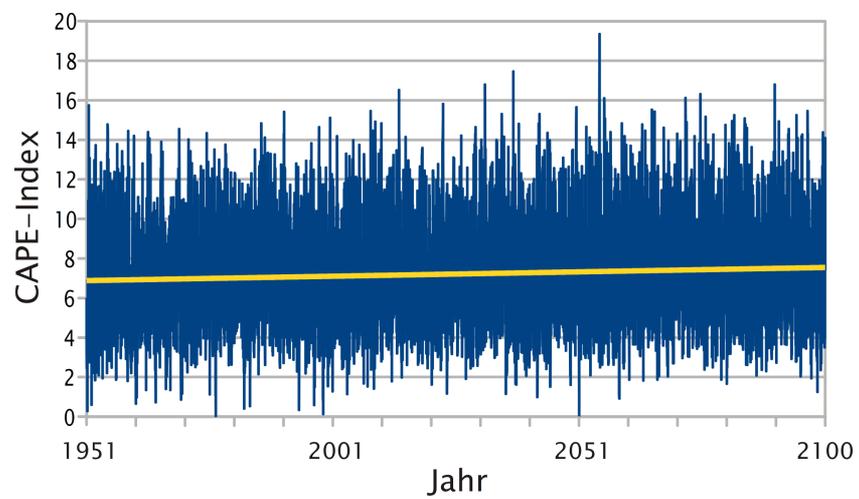
<i>Datenquelle</i>	<i>Zeitraum</i>	<i>Trend/Dekade</i>	<i>Trend/Zeitraum</i>
NCAR2	1979–2010	0,06	0,18
MPI-ESM 20C	1979–2010	–0,07	–0,23
MPI-ESM 20C–RCP8.5	1951–2100	0,04	0,66



(a) 1979–2010, NCAR2



(b) 1979–2010, MPI-ESM 20C



(c) 1951–2100, MPI-ESM RCP8.5

Abbildung E.4: Wie Abb. E.1, jedoch für die Trends des CAPE-Labilitätsindex (dicke gelbe Linie).

E.5 Trends von SHW

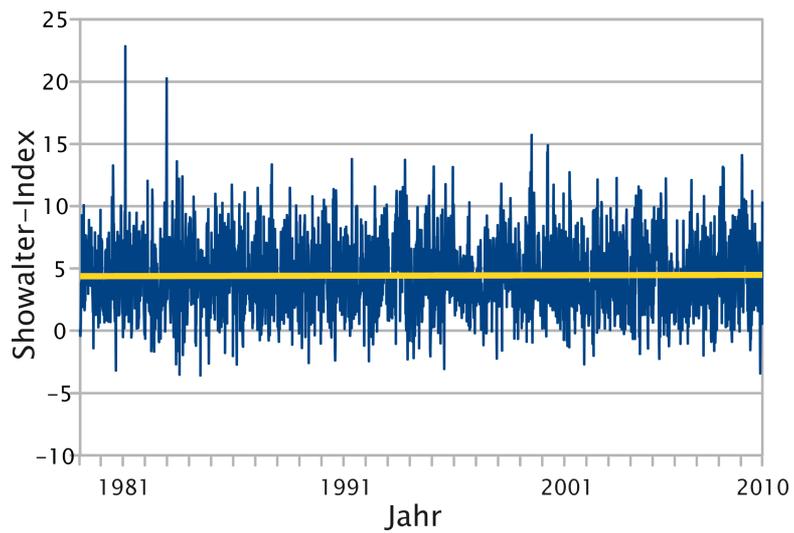
Der Showalter-Index weist, vom MPI-ESM-Modell simuliert, praktisch keinen Trend aus (s. Abb. E.5 (c) und Tab. E.5). Auch in der Gegenwart zeigt sich praktisch kein Trend; Unterschiede zwischen den NCAR-Reanalysen und den 20C-Daten von MPI-ESM sind eher zufällig. Das mittlere Niveau des Showalter-Index am Gitterpunkt 50N 10E im Zeitraum 1979–2010 wird allerdings von den Reanalysen mit rund 4,4 Indexeinheiten und den 20C Daten mit rund 3,4 Indexeinheiten relativ stark abweichend voneinander wiedergegeben.

Tabelle E.5: Wie Tab. E.1, jedoch für die Trends des Showalter-Index.

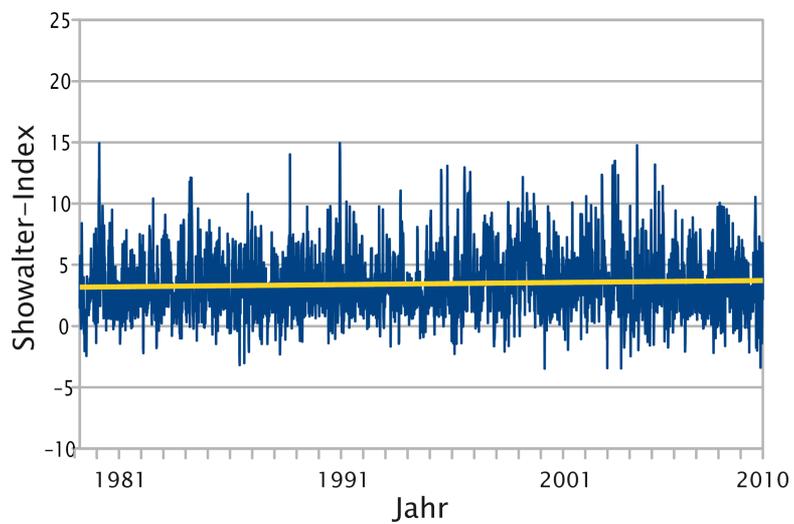
<i>Datenquelle</i>	<i>Zeitraum</i>	<i>Trend/Dekade</i>	<i>Trend/Zeitraum</i>
NCAR2	1979–2010	0,03	0,10
MPI-ESM 20C	1979–2010	0,13	0,42
MPI-ESM 20C–RCP8.5	1951–2100	0,01	0,21

E.6 Fazit

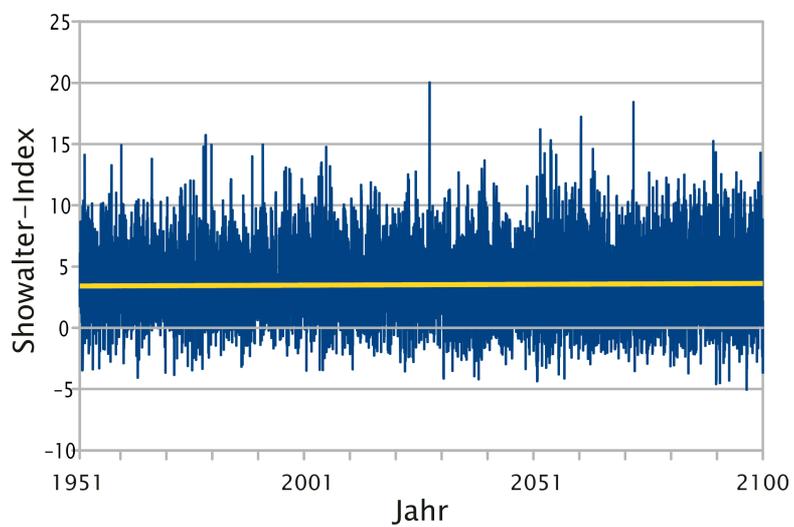
Es wurde anhand von Größen, von denen mehrere relevant für die Beschreibung konvektiver Ereignisse sind aufgezeigt, dass in den Klimasimulationen von MPI-ESM Trends nur teilweise projiziert werden. Oder die Trends sind gegenläufig, was zu ihrer „Neutralisierung“ beim Einbeziehen in eine multiple Regression führen kann. Dies ist bedeutungsvoll für die Interpretation von Trends (resp. deren Nichtauftreten) bei einigen Indikatoren, z.B. denjenigen für Gewitter.



(a) 1979–2010, NCAR2



(b) 1979–2010, MPI-ESM 20C



(c) 1951–2100, MPI-ESM RCP8.5

Abbildung E.5: Wie Abb. E.1, jedoch für die Trends des Showalter-Index (dicke gelbe Linie).

F Rechenbeispiel zur Ermittlung des Maßes für die Aufspreizung des Wertebereichs (AWB) infolge der KlaMuKo-Klassifikation

Wie in Abschnitt C.8 (ab Seite XXVI) erwähnt, gibt es ein Maß, mit dem evaluiert werden kann, welche Differenzierung zwischen den Klassen (Aufspreizung des Wertebereichs, AWB) durch das Klassifikationsverfahren erreicht wird. Es handelt sich im Beispiel um die zweite Zeile von Tab. C.1.

Angenommen, bei einem Einsatz von KlaMuKo werden 10 Klassen (K) mit den Besetzungszahlen N_K und den klassenspezifischen Mittelwerten $MW(P)_K$ des Prediktanden P bestimmt. Dann errechnet sich, im Sinne einer gewichteten Aufsummierung der Beitrag jeder Klasse K zu $MW(P)_K \cdot N_K$

K	N_K	MW_K	Beitrag	Kum. Beitrag
1	544	19,2	10444,8	10444,8
2	6	35,5	213,0	10657,8
3	3	11,8	35,4	10693,2
4	53	33,3	1764,9	12458,1
5	53	14,5	768,5	13226,6
6	149	30,9	4604,1	17830,7
7	309	16,8	5191,2	23021,9
8	244	28,7	7002,8	30024,7
9	674	26,1	17591,4	47616,1
10	909	22,4	20361,6	67977,7

Die Gesamtzahl aller untersuchten Tage $\sum N_K$ ist im Beispiel 2944 und der gewichtete Mittelwert des Prediktanden P (\bar{P}^{gew}) über alle 10 Klassen ist der kumulierte Endbeitrag (67977,7) geteilt durch $\sum N_K$, also $\bar{P}^{gew} = 23,1$.

Mit dem so bestimmten gewichteten Mittelwert wird für jede Klasse K die mit der Klassenbesetzung N_K gewichtete Abweichung vom individuellen Klassenmittelwert $\Delta_K = |\bar{P}^{gew} - MW_K| \cdot N_K$ errechnet. Die Δ_K werden aufsummiert (letzte Spalte der nachstehende Tabelle).

K	N_K	MW_K	$\bar{P}^{gew} - MW_K$	Δ_K	Kumulierung von Δ_K
1	544	19,2	3,9	2121,6	2121,6
2	6	35,5	-12,4	74,4	2196,0
3	3	11,8	11,3	33,9	2229,9
4	53	33,3	-10,2	540,6	2770,5
5	53	14,5	8,6	455,8	3226,3
6	149	30,9	- 7,8	1162,2	4388,5
7	309	16,8	6,3	1946,7	6335,2
8	244	28,7	- 5,6	1366,4	7701,4
9	674	26,1	- 3,0	2022,0	9723,6
10	909	22,4	0,7	636,3	10359,9

Die Aufspreizung des Wertebereichs (AWB) wird aus dem kumulierten Δ_K dividiert durch die Gesamtzahl der analysierten Tage, hier 2944 bestimmt, d.h. AWB ist in diesem Beispiel $10359,9 / 2944 = 3,52$. Da die Berechnung auf Basis der Klassifikation der Stufe 1 stattfand, handelt es sich bei der ermittelten Größe um den in Abschnitt C.8 beschriebenen Indikator AWB1.

Der zweite Indikator AWB2 misst die erreichbare Aufspreizung des Wertebereichs, wenn sowohl die erste als auch die zweite Stufe von KlaMuKo verwendet wird. In der zweiten Stufe wird sukzessive für jede einzelne KlaMuKo-Klasse eine weitere Analyse durchgeführt, d.h. es werden beispielsweise alle Tage der Klasse 6 separat betrachtet, mit dem Ziel, eine Prediktorenkombination zu finden, die genau den in dieser Klasse zusammengefassten Atmosphärenzustand bestmöglich beschreibt. Aus Gründen der statistischen Stabilität kann eine solche Analyse auf der Stufe 2 aber nur durchgeführt werden, wenn die individuelle KlaMuKo-Klasse über mindestens 20 Mitglieder verfügt.

Die Nomenklatur der Klassen KK ist dabei wie folgt: KK11 ist die KlaMuKo-Klassifikation der ersten Stufe, KK201 ist die KlaMuKo-Klassifikation der zweiten Stufe, die die Tage der ersten KlaMuKo-Klasse von KK11 separat klassifiziert etc.

AWB_{KK} ist dabei die Aufspreizung auf der Stufe 1 bzw. 2, Letzteres für die entsprechenden Klassen der Stufe 1 (s.o.). Der Anteil S_{KK} ist $AWB_{KK} \cdot N_K$ dividiert durch die Gesamtzahl der untersuchten Tage (2944).

KK	N_K	\bar{P}^{gew}	AWB_{KK}	$AWB_{KK} \cdot N_K$	S_{KK}	Kum. v. S_{KK}
KK11	2944	23,1	3,52	10359,90	3,52	3,52
KK201	544	19,2	0,22	119,68	0,04	3,56
KK204	53	33,3	0,75	39,75	0,01	3,57
KK205	53	14,5	0,42	22,26	0,01	3,58
KK206	149	30,9	0,51	75,99	0,03	3,61
KK207	309	16,8	0,41	126,69	0,04	3,65
KK208	244	28,7	0,41	100,04	0,04	3,69
KK209	674	26,1	0,34	229,16	0,08	3,77
KK210	909	22,4	0,24	218,16	0,07	3,84

Die unter Berücksichtigung aller KlaMuKo-Klassen der Stufe 1 und 2 erreichbare Aufspreizung AWB2 ist also 3,84.