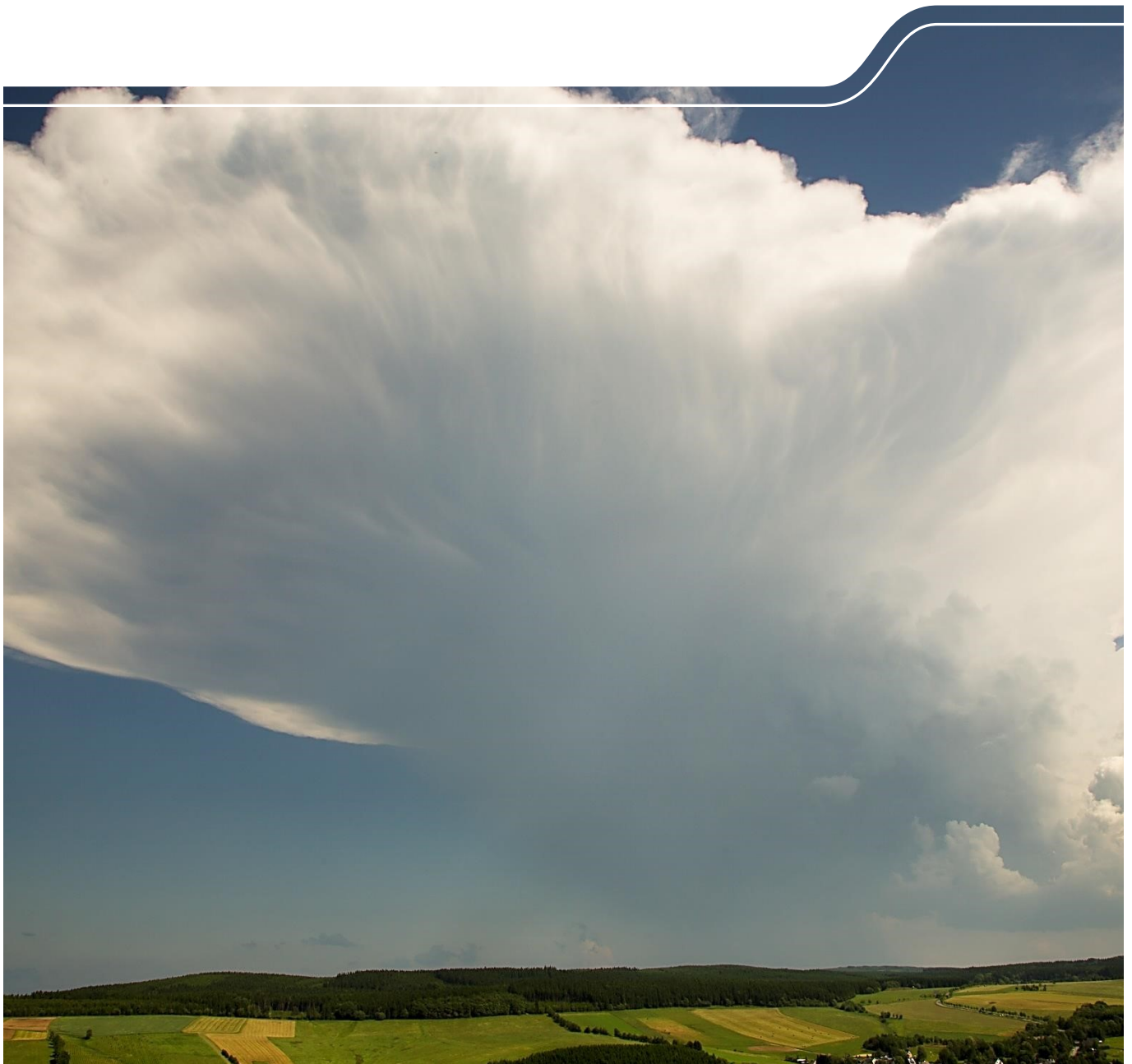




Atmosphärisches Konvektions- potential über Sachsen

Schriftenreihe, Heft 2/2022



Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Sachsen

Dr. Klemens Barfus, Prof. Dr. Christian Bernhofer

Inhalt

1	Einführung	9
1.1	Vorgehen der Studie	10
2	Daten und Methoden	11
2.1	Radardaten	11
2.2	Hageldaten.....	12
2.3	Blitzdaten	12
2.4	Reanalysedaten	13
2.5	Klimamodelldaten.....	13
2.6	Zelltracking.....	14
2.7	Gefährdungspotentiale	21
2.8	Objektive Wetterlagenklassifikation	22
2.8.1	Objektive Wetterlagenklassifikation für ERA-Interim.....	24
2.8.2	Objektive Wetterlagenklassifikation für ECHAM6	26
2.9	Auswahl der Konvektiven Tage	28
2.10	Berechnung der Prädiktoren.....	31
2.11	Anpassung der logistischen Regressionsmodelle.....	32
2.12	Anwendung des logistischen Regressionsmodelles	34
2.13	Regionale Klimamodellierung.....	35
2.13.1	Parametrisierung von Hagel.....	37
2.13.2	Parametrisierung von Blitzen.....	37
2.13.3	Bias-Korrektur	38
3	Ergebnisse	41
3.1	Zellstatistiken	41
3.2	Objektive Wetterlagenklassifikation	45
3.2.1	Rezentes Klima	45
3.2.2	Zukünftiges Klima.....	46
3.3	Konvektionspotentiale	48
3.3.1	Rezentes Klima	48
3.3.2	Zukünftiges Klima.....	50
3.4	Hagelanalysen	56
3.4.1	Rezentes Klima	56
3.4.2	Wetterlagen Hagel	57
3.4.3	Projektionen für die Zukunft	58
3.5	Blitzanalysen.....	62
3.5.1	Rezentes Klima	62
3.5.2	Wetterlagen Blitze	63
3.5.3	Projektionen für die Zukunft	64
4	Zusammenfassung und Ausblick	67
5	Danksagung	68
	Literaturverzeichnis	69
	Anhang	72
Anhang 1	Konvektionsindizes	72
Anhang 2	Hagelauswertung Schloß Wackerbarth	80
Anhang 3	Gefährdungspotentiale	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen der Studie.....	10
Abbildung 2: Abdeckung des YW-Produktes und der im Projekt analysierte Bereich.....	12
Abbildung 3: YW-Produkt für den 16.6.2012, 14:10 Uhr	14
Abbildung 4: Gefilterte Daten für den 16.6.2012, 14:10 Uhr	15
Abbildung 5: Identifizierte Zellkerne für den 16.6.2012, 14:10 Uhr.....	16
Abbildung 6: Identifizierte Zellen mit Zellkernen für den 16.6.2012, 14:10 Uhr	17
Abbildung 7: Histogramm der Zellgrößen für Zellen mit Zellkernen aus 1, 2 und 3 Pixeln.....	18
Abbildung 8: Zellkerne, Zellen und Verlagerungsvektoren für den 16.6.2012, 14:10 Uhr.....	19
Abbildung 9: k-Faktor und Suchradius in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.....	20
Abbildung 10: Verlagerungsvektoren, Suchradius und identifizierte Zellkerne in der nächsten Radarszene	20
Abbildung 11: Identifizierte Tracks.....	21
Abbildung 12: Klassifikationsgebiet für die objektive Wetterlagenklassifikation.....	23
Abbildung 13: Relative Feuchten für eine Auswahl an ERA-Interim-Datensätzen.....	24
Abbildung 14: Feuchteklimatologie für ERA-Interim (Juli 1979 bis Dezember 1996).....	25
Abbildung 15: Anteil der einzelnen Wetterlagen aus ERA-Interim-Daten für den Zeitraum 1979 bis 2016	25
Abbildung 16: Feuchteklimatologie für ECHAM6 (historischer Lauf, 1979 bis 1996).....	26
Abbildung 17: Wetterlagen für ECHAM6 für den Zeitraum 1979 bis 2016	27
Abbildung 18: Unterschiede der Wetterlagen zwischen ECHAM6 und ERA-Interim	27
Abbildung 19: Extreme konvektive Tage in den einzelnen Datensätzen	28
Abbildung 20: Ranking der konvektiven Tage hinsichtlich der 6 Parameter.....	30
Abbildung 21: Mittlere Zugbahnlänge und mittlere Zuggeschwindigkeiten der Zellen der extrem konvektiven Tage.....	31
Abbildung 22: Potentielle extreme konvektive Tage aus historischem Lauf und RCP8.5-Szenario von ECHAM6.....	35
Abbildung 23: Nestingschritte für WRF-Simulationen	36
Abbildung 24: Bias der Gitterzellen mit Niederschlag und angepasster Gamma-Verteilung	39
Abbildung 25: Zeitschritte mit Niederschlag in den Datensätzen zur Ermittlung der Biaskorrektur.....	40
Abbildung 26: Tracklängen aus Radardaten im Untersuchungsgebiet für den Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 (alle Monate)	41
Abbildung 27: Konvektive Zellen mit einer Lebensdauer von 5 Minuten im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 (alle Monate).	42
Abbildung 28: Konvektive Zellen mit einer Lebensdauer von 5 Minuten im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 (Sommer).	42
Abbildung 29: Verteilung von Zellen mit Andauer von 5 Minuten über den Tag (alle Monate)	43
Abbildung 30: Tracklängen (ganze Jahr) für das Weißeritz-Einzugsgebiet.....	44
Abbildung 31: Maximale Zellgrößen der für das Weißeritzgebiet relevanten Zellen (ganze Jahr)	44
Abbildung 32: Bewegungsrichtung der für das Weißeritzgebiet relevanten Zellen (ganze Jahr)	45
Abbildung 33: Anzahl der konvektiven und extremen konvektiven Tage in den einzelnen Wetterlagenklassen für den Zeitraum 2001 bis 2016 (Sommer).....	46
Abbildung 34: Veränderung des Auftretens der Wetterlagen im Zeitraum 2011 bis 2040 (Sommer) bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010.....	46

Abbildung 35: Veränderung des Auftretens der Wetterlagen im Zeitraum 2041 bis 2070 (Sommer) bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010.....	47
Abbildung 36: Veränderung des Auftretens der Wetterlagen im Zeitraum 2071 bis 2100 (Sommer) bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010.....	47
Abbildung 37: Allgemeines Konvektionspotential für Zellen > 20 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 2001 bis 2016.....	48
Abbildung 38: Starkniederschlagspotential für Zellen > 20 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 2001 bis 2016.....	49
Abbildung 39: Sturzflutpotential für Zellen > 20 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 2001 bis 2016	49
Abbildung 40: Allgemeines Konvektionspotential [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF.....	50
Abbildung 41: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen >20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	50
Abbildung 42: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	51
Abbildung 43: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	51
Abbildung 44: Starkniederschlagspotential für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September für den Zeitraum 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	52
Abbildung 45: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	52
Abbildung 46: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	53
Abbildung 47: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	53
Abbildung 48: Sturzflutpotential für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September für den Zeitraum 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	54
Abbildung 49: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	54
Abbildung 50: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	55
Abbildung 51: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	55
Abbildung 52: Hageltage pro Jahr für den Zeitraum 2001 bis 2016 (Sommer) aus Radardaten	56
Abbildung 53: Konvektive Tage mit Hagel für den Zeitraum 2001 bis 2016 (Sommer)aus Radardaten ..	57
Abbildung 54: Wetterlagen für Hageltage 2001 bis 2016 (Sommer) aus Radardaten	57
Abbildung 55: Extreme konvektive Tage mit simulierten Graupel 1979 bis 2100 (Sommer)	58
Abbildung 56: Extreme konvektive Tage mit Hagel 1979 bis 2100 (Sommer).....	59

Abbildung 57: Extreme konvektive Tage mit Hagel 1981 bis 2010 (Sommer).....	60
Abbildung 58: Extreme konvektive Tage mit Hagel 2011 bis 2040 (Sommer).....	60
Abbildung 59: Extreme konvektive Tage mit Hagel 2041 bis 2070 (Sommer).....	61
Abbildung 60: Extreme konvektive Tage mit Hagel 2071 bis 2100 (Sommer).....	61
Abbildung 61: Anzahl Blitze pro Jahr 1999 bis 2012 (Sommer).....	62
Abbildung 62: Anzahl an konvektiven Tagen mit Blitzen im Untersuchungsgebiet 2001 bis 2012 (Zeitraum der Blitzdaten)	63
Abbildung 63: Wetterlagen für Tage mit Blitzen 1999 bis 2012 (Sommer).....	63
Abbildung 64: Extreme konvektive Tage mit Blitzen simuliert mit WRF für den Zeitraum 1979 bis 2100 (Sommer)	64
Abbildung 65: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 1981 bis 2010 (Sommer) simuliert mit WRF	65
Abbildung 66: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 2011 bis 2040 (Sommer) simuliert mit WRF	65
Abbildung 67: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 2041 bis 2070 (Sommer) simuliert mit WRF	66
Abbildung 68: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 2071 bis 2100 (Sommer) simuliert mit WRF	66

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A1: Allgemeines Konvektionspotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	82
Abbildung A2: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	82
Abbildung A3: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	83
Abbildung A4: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	83
Abbildung A5: Allgemeines Konvektionspotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	84
Abbildung A6: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	84
Abbildung A7: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	85
Abbildung A8: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	85
Abbildung A9: Starkniederschlagspotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	86
Abbildung A10: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	86
Abbildung A11: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	87
Abbildung A12: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	87
Abbildung A13: Starkniederschlagspotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	88
Abbildung A14: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	88
Abbildung A15: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	89
Abbildung A16: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	89
Abbildung A17: Sturzflutpotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	90

Abbildung A18: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	90
Abbildung A19: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	91
Abbildung A20: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	91
Abbildung A21: Sturzflutpotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	92
Abbildung A22: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	92
Abbildung A23: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	93
Abbildung A24: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kontingenztabelle für die Modellanpassung von Cluster 1	33
Tabelle 2: Kontingenztabelle für die Modellanpassung von Cluster 2	33
Tabelle 3: Gütemaße der Modellanpassung	33
Tabelle 4: WRF-Konfiguration.....	37

Abkürzungsverzeichnis

WRF Weather Research and Forecast Model

1 Einführung

Hochreichende Konvektion mit seinen möglichen Begleiterscheinungen wie Starkregen, Hagel und Blitzen ist ein atmosphärisches Phänomen mit hohem Schadenspotential. So bilanziert der Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft die Schäden durch Stürme, Hagel, Blitze und Starkregen für 2019 auf 3,2 Milliarden Euro (GDV, 2019). In Einzeljahren kann dabei die Schadenssumme noch deutlich höher liegen. Durchschnittlich werden in Deutschland 110 Personen im Jahr bei Blitzunfällen verletzt und 4 Personen sterben (VDE, 2021).

Die Zahlen motivieren auch vor dem Hintergrund des beobachteten und des zu erwartenden Klimawandels zur Analyse entsprechender Prozesse und einer Abschätzung zukünftiger Gefährdungspotentiale auch auf regionaler Skala.

Bei der hochreichenden Konvektion kommt es aufgrund einer labilen Schichtung in der Troposphäre lokal begrenzt zu Vertikalbewegungen. Die labile Schichtung kann dabei sowohl durch eine verstärkte solare Einstrahlung am Boden mit entsprechenden Energieumsatz am Boden und Erwärmung der bodennahen Luftschicht als auch durch Kaltluftadvektion in der Höhe bedingt sein. Von der flachen Konvektion unterscheidet die hochreichende Konvektion, dass die vertikale Erstreckung der Ausgleichszirkulationen ausreicht um signifikante Niederschläge, die auch als Hagel niedergehen können, sowie durch Erreichen der Eisphase und spätere Ladungstrennung Blitze erzeugen zu können. NCEP (2014) gibt als Kriterium für hochreichende Konvektion Vertikalbewegungen aus dem bodennahen Bereich bis in das 500 hPa-Niveau an. Im Folgenden wird die in dieser Arbeit analysierte hochreichende Konvektion zur Vereinfachung als Konvektion bezeichnet.

Durch den Klimawandel kommt es zu einer Erhöhung der bodennahen Temperatur aber auch zur Erwärmung der gesamten Atmosphärensäule. Dadurch kann entsprechend des Clausius-Clapeyron-Verhältnisses pro 1 Grad Erwärmung 6 bis 7 % zusätzlicher Wasserdampf aufgenommen werden. Sowohl Messungen (Lenderink und Meijgard, 2008; Berg et al., 2013) als auch Modellierungen (Ban et al., 2015) zeigen, dass zukünftige Niederschlagsmengen im Sommerhalbjahr mit dem Anstieg des Wasserdampfes skalieren. Unter kurzzeitigen Ereignissen finden sich sogar solche mit Niederschlagsmengen oberhalb dieser Skalierung (Lenderink et al., 2017). Neben dem zusätzlichen Wasserdampf kommt es durch die überproportionale Erwärmung der bodennahen Luftschicht zu einer Reduzierung der troposphärischen Stabilität (Riemann-Campe et al., 2009)

Sowohl der erhöhte Wasserdampf als auch die reduzierte Stabilität sind neben weiteren Faktoren wie auslösenden Mechanismen (Doswell, 1987) verantwortlich für eine mögliche Zunahme der hochreichenden Konvektion die einhergeht mit der allgemeinen Klimaerwärmung.

Auch in Sachsen kommt es zu einem Anstieg des Starkregenanteils im Zeitraum Juli bis September (Bernhofer et al., 2015; Bernhofer et al., 2016). Dabei kommt es innerhalb Sachsens zu einer flächenhaften Differenzierung mit den markantesten Veränderungen im Auftreten von Starkregenereignissen in Südwest- und Nordostsachsen, den Kammlagen und dem Großraum Leipzig (Bernhofer et al., 2015).

Hochreichende Konvektion organisiert sich in Konvektionszellen mit einem Aufwindbereich und dem umschließenden, kompensierenden Abwindbereich. Es sind unterschiedliche Folgen des Klimawandels hinsichtlich dieser Zellen denkbar. Poujol et al. (2002) simulieren für Alaska beispielsweise eine Intensivierung der Zellen bei gleichbleibender räumlicher Ausdehnung. Peleg et al. (2018) finden für den Mittelmeerraum

sogar teilweise kleinere Zellen einhergehend mit einer Intensivierung. Für die mittleren Breiten fanden Lochbihler et al. (2019) weniger, aber intensivere und größere Zellen. Prein et al. (2017) fanden für die USA ebenso eine Ausdehnung der Zellen. Weiterhin ist auch eine Ausweitung des konvektiven Hauptzeitraums denkbar (Pujol et al., 2002).

Diese Studie hat zum Ziel, das aktuelle und basierend auf Klimaprojektionen zukünftige Konvektionspotential für Sachsen zu ermitteln. Die Methodik ist dabei angelehnt an die von Brendel et al. (2014) für Thüringen durchgeführte Studie.

1.1 Vorgehen der Studie

Das Vorgehen der Studie wird im folgenden Flussdiagramm (Abbildung 1) dargestellt.

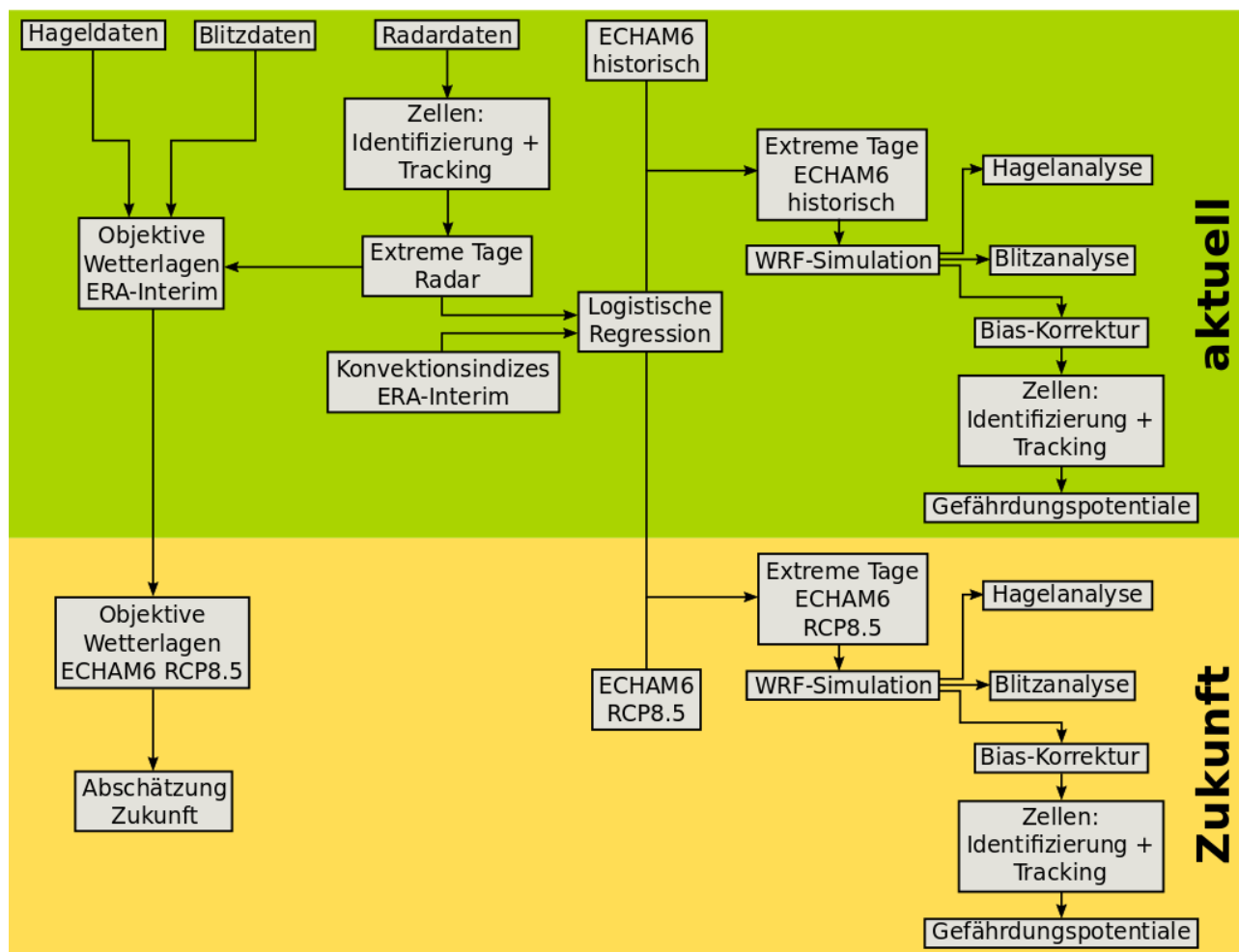


Abbildung 1: Vorgehen der Studie

Der obere Bereich bezieht sich dabei auf Analysen für das rezente Klima, während der untere Bereich Abschätzungen für das zukünftige Klima beinhaltet, basierend auf Klimaprojektionen für das RCP8.5 Szenario (Moss et al., 2010) mit dem Globalen Klimamodell ECHAM6 (Stevens et al., 2013).

Die Analyse beginnt mit der Analyse von Radardaten, die einem Zellidentifizierungs- und -tracking-Algorithmus unterzogen werden. Danach werden aus dem erhaltenen Datensatz die 150 extremsten Tage ermittelt. In einem impliziten Verfahren wird nun für diese Tage die Objektive Wetterlagenklassifikation (Ditmann und Bissoli, 2001) basierend auf ERA-Interim-Reanalysen (Dee et al., 2011) analysiert. Über eine Analyse der für

hochreichende Konvektion im Untersuchungsgebiet verantwortlichen Wetterlagen aus ECHAM6-RCP8.5-Simulationen kann nun die Gefährdung durch hochreichende Konvektion für zukünftige Zeiträume abgeschätzt werden. Ebenso erlaubt die Kombination der Objektiven Wetterlagen mit gemessenen Hagel- und Blitzdaten eine Abschätzung für entsprechende Hagelpotentiale in der Zukunft.

In einem expliziten Verfahren werden die extremen konvektiven Tage mithilfe einer logistischen Regression durch für die ERA-Interim-Reanalyse abgeleitete Konvektionsindizes erklärt. Die logistische Regression kann dann auch für den nicht durch Radardaten beobachteten Zeitraum der historischen Simulationen mit ECHAM6 angewendet und so potentiell extreme Tage ermittelt werden. Für diese Tage werden Simulationen mit dem regionalen Klimamodell Weather Research and Forecast Model (WRF, Skamarock et al., 2008) durchgeführt. Aus diesen Simulationen wird das Schadenspotential für Hagel und Blitze bestimmt. Weiterhin wird der Zellidentifizierungs- und -tracking-Algorithmus auf die Simulationen angewandt und so die Schadenspotentiale durch Starkniederschlag bestimmt. Ebenso wird die logistische Regression auf ECHAM6-Simulationen für das RCP8.5-Szenario angewandt, um so potentiell extreme konvektive Tage für die projizierte Zukunft zu ermitteln. Für diese Tage werden dann ebenfalls WRF-Simulationen durchgeführt, der Zellidentifizierungs- und -trackings-Algorithmus angewendet und schließlich die Gefährdungspotentiale ermittelt. Über den Vergleich der Gefährdungspotentiale für den historischen und die zukünftigen Zeiträume lässt sich dann der Einfluss des projizierten Klimawandels abschätzen.

2 Daten und Methoden

Im Rahmen der Arbeit wurden unterschiedliche Datensätze verwendet, wie sie zum Teil auch schon im Kapitel 1.1 angesprochen wurden. Dabei handelt es sich um Radardaten, Reanalysedaten, Daten eines Globalen Klimamodells sowie Hagel- und Blitzdaten. Diese Datensätze werden im Folgenden beschrieben gefolgt von einer Beschreibung der verwendeten Methoden.

2.1 Radardaten

Hochreichende Konvektion ist ein Phänomen, welches auf kleinen Raum- (< 4 km) und Zeitskalen (< 1 Stunde) stattfindet. Entsprechend eignen sich zur Analyse die Daten von Regenradargeräten. In dieser Arbeit wurden der YW-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (Winterrath et al., 2018) verwendet. Dieser Datensatz ist ein Komposit aus bis zu 15 über Deutschland verteilten Radargeräten. Er enthält Niederschlagsintensitäten mit einer Auflösung von 5 Minuten und 1 km und liegt in polarstereographischer Projektion vor. Die Radardaten sind hinsichtlich auftretender Radarfehler korrigiert und an ca. 2000 Bodenstationen angepasst.

In dieser Studie kam der Datensatz für den Zeitraum von 2001 bis 2016 zur Anwendung. Die Abdeckung des Datensatzes (innerhalb des Datensatzes variabel) sowie das Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 2 dargestellt.

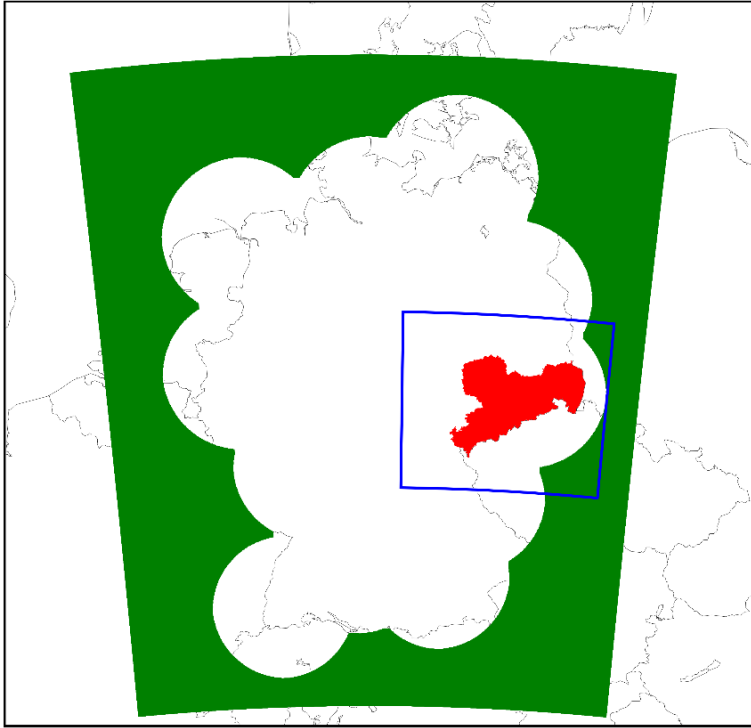


Abbildung 2: Abdeckung des YW-Produktes und der im Projekt analysierte Bereich

2.2 Hageldaten

Zur Analyse des Hagelpotentials wurde eine Hagelklimatologie des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Klimatologie nutzt Radardaten sowie Bodenbeobachtungen. In der Auflösung der Radardaten (1 km, polarstereographische Projektion) enthält sie für jeden Tag die Information, ob Hagel beobachtet wurde. Die Klimatologie stand für den Zeitraum von 2001 bis 2016 zur Verfügung.

Zusätzlich wurden Hageldaten des Weinguts Schloss Wackerbarth (Radebeul) verwendet. Diese beinhalten für 7 Tage zwischen 2007 und 2015 Hagelmeldungen für einzelne Weinberge.

2.3 Blitzdaten

Zur Analyse des Blitzpotentials wurden Blitzdaten des BLIDS-Systems von Siemens verwendet. Diese Daten beinhalten zeitgenaue Messungen von Blitzen inklusive Ortsangaben im geographischen Koordinatensystem. Hierbei werden sowohl Wolke-Wolke-Blitze als auch Wolke-Boden-Blitze registriert. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die verwendeten Sensoren des BLIDS-Systems keine umfänglichen Blitzsensoren sind (Drüe et al., 2007), so dass zu wenig Wolke-Wolke-Blitze detektiert werden und folglich keine Abschätzungen über das Verhältnis zwischen Wolke-Wolke- und Wolke-Boden-Blitzen gemacht werden können. Die Daten standen für die Jahre 1999 bis 2012 zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Blitzdaten innerhalb von 1,5 Sekunden und einem Radius von 5 km zusammengefasst.

2.4 Reanalysedaten

Reanalysedaten entstammen Modellrechnungen für die Vergangenheit, bei denen Messdaten während des Simulationsvorgangs assimiliert wurden. Als Messdaten dienen z.B. Radiosondendaten und Satellitendaten. Entsprechend wird das Modell immer wieder an die Messdaten „herangezogen“ ohne dabei den Anspruch auf zeitlich konsistente Modellläufe aufzugeben. Es resultieren daraus lückenlose, global verfügbare Klimadaten in definierter räumlich-zeitlicher Auflösung. Die Daten sind vertikal aufgelöst, beinhalten nahezu alle Klimavariablen zur Beschreibung des Systems und sind physikalisch konsistent. Dennoch können durch die Modelle nicht alle Prozesse aufgelöst werden, so dass Parametrisierungen notwendig sind.

In dieser Studie wurde die ERA-Interim-Analyse (Dee et al., 2011) des Europäischen Zentrums für Mittel- und langfristwettervorhersage (EZMWF) verwendet. Die horizontale Auflösung der Reanalyse liegt bei 0.75 Grad (~75 km), die zeitliche Auflösung sind 6 Stunden. ERA-Interim hat eine Vertikalauflösung von 60 Schichten in einem hybriden Sigma-Druck-Koordinatensystem bis 0.01 hPa und eignet sich damit sehr gut für Konvektionsanalysen.

Die Datenassimilation geschieht durch ein 4D-Var-System, wobei hier keine durch Wolken und Niederschlag beeinflusste Satellitendaten verwendet wurden.

ERA-Interim-Daten sind neben dem Sigma-Druck-Koordinatensystem auch in einem Druck-Koordinatensystem verfügbar. Dies verlangt die Extrapolation, wenn bestimmte Druckniveaus unterhalb der Geländeoberfläche liegen. Entgegen der Methodik von Trenberth et al. (1993), die im Rahmen dieser Arbeit für ECHAM6-Daten angewendet wurde, wurden die ERA-Interim-Daten mit einer modifizierten Methodik beschrieben z.B. in Yessad (2019) extrapoliert.

2.5 Klimamodelldaten

Zur Abschätzung des Konvektionspotentials in der Zukunft, werden in diesem Projekt Daten des Globalen Zirkulationsmodells ECHAM6 (Stevens et al., 2013) verwendet. Hierbei kommen der historische Lauf (1979 bis 2005) sowie das RCP8.5-Szenario (Realisierung r1i1p1, 2006 bis 2100) zum Einsatz, welche auch im Climate Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) verwendet wurden. Die horizontale Auflösung des Modells ist ~200 km (1.875 Grad), mit 47 vertikalen Schichten in einem hybriden Sigma-Druck-Koordinatensystem. Entsprechend sind die Schichten optimal zwischen Geländehöhe und oberstem Druckniveau (0.01 hPa / 80 km Höhe) verteilt, so dass die maximale Vertikalauflösung mit gegebener Anzahl Schichten erreicht wird. Damit sind die Daten gut für Analysen der Konvektion (z.B. bei der Berechnung von Konvektionsparametern wie CAPE) geeignet. Um jedoch z.B. die Objektive Wetterlagenklassifikation oder bestimmte Konvektionsindizes für das Modell abzuleiten, ist eine Inter- bzw. Extrapolation der Daten auf Druckniveaus notwendig. Dies wurde im Rahmen dieser Studie basierend auf der Methode von Trenbert et al. (1993) gemacht. Die zeitliche Auflösung der Daten liegt bei 6 Stunden, so dass sie als Eingangsdaten für Mesoskalige Atmosphärenmodelle genutzt werden können. Die Daten wurden aufbereitet für die Nutzung mit Regionalen Klimamodellen aus der CERA-Datenbank am Deutschen-Klimarechenzentrum bezogen.

2.6 Zelltracking

Die Identifizierung und das Tracken von konvektiven Zellen stellt das Rückgrat dieser Studie dar. Entsprechend wird im Folgenden der verwendete Algorithmus vorgestellt. Er basiert auf den Arbeiten von Steinacker et al. (2001) und erweitert den von Brendel et al. (2014) verwendeten Algorithmus. Die Erweiterung besteht darin, dass nicht nur Zellkerne, sondern auch umliegende Zellen ausgewiesen werden. Die Methode kann in drei Teile unterteilt werden: a.) die Identifizierung von Zellkernen und dazugehörigen Zellen, b.) die Projektion der Zellposition im nächsten Zeitschritt und bei Erfüllung gegebener Bedingungen die Zusammenfassung von Zellen unterschiedlicher Zeitschritte zu einem Zelltrack sowie c.) die Interpolation von Zellposition und -entwicklung innerhalb der Stützstellen des Tracks.

In einem ersten Schritt werden die Rohdaten für jeden Zeitschritt (Abbildung 3), einem Gaussfilter unterzogen. Dadurch sollen Fehler im Radarbild eliminiert und kleinere Zellen zusammengefügt werden.

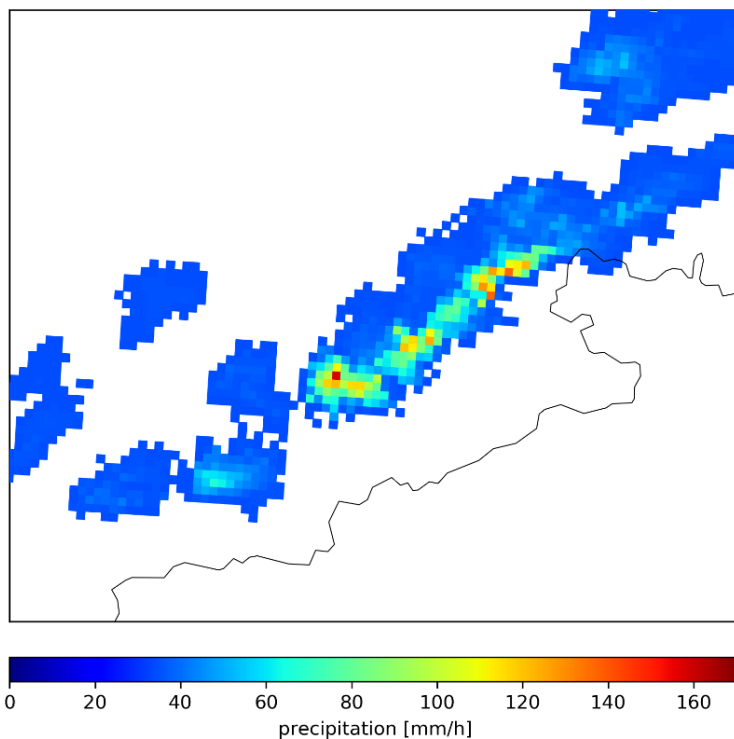


Abbildung 3: YW-Produkt für den 16.6.2012, 14:10 Uhr

Die gefilterten Werte werden als

$$v_{Filter}(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}}$$

mit i und j den Indizes für die beiden Raumrichtungen und σ der Standardabweichung berechnet. Für die Standardabweichung wird hier ein Wert von 0.85 gewählt. Es resultiert ein Feld wie in Abbildung 4.

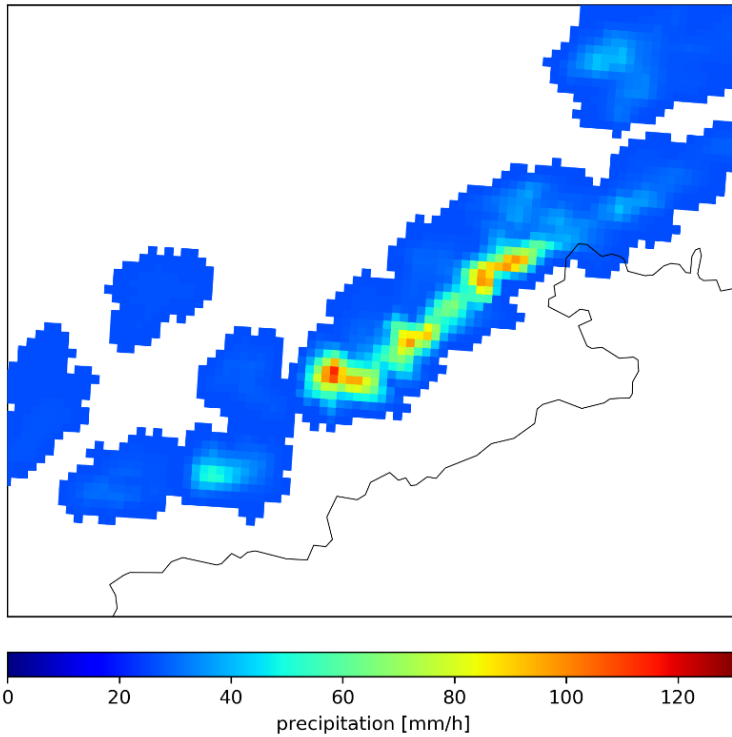


Abbildung 4: Gefilterte Daten für den 16.6.2012, 14:10 Uhr

Als Zellkerne werden Pixel identifiziert, die einen vorgegebenen Schwellwert (hier 8.12 mm/h) überschreiten und durch umliegende Pixel mit niedrigeren Werten sowie einer gewissen Inhomogenität, die auf konvektive Niederschlagsprozesse hindeutet, charakterisiert sind. Als umliegende Pixel gelten hier alle Pixel einer den potentiellen Zellkern umgebenden 7x7 Matrix mit $v_{4,4}$ als dem potentiellen Zellkern:

$$v_{i,j} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{2,1} & v_{3,1} & v_{4,1} & v_{5,1} & v_{6,1} & v_{7,1} \\ v_{1,2} & v_{2,2} & v_{3,2} & v_{4,2} & v_{5,2} & v_{6,2} & v_{7,2} \\ v_{1,3} & v_{2,3} & v_{3,3} & v_{4,3} & v_{5,3} & v_{6,3} & v_{7,3} \\ v_{1,4} & v_{2,4} & v_{3,4} & v_{4,4} & v_{5,4} & v_{6,4} & v_{7,4} \\ v_{1,5} & v_{2,5} & v_{3,5} & v_{4,5} & v_{5,5} & v_{6,5} & v_{7,5} \\ v_{1,6} & v_{2,6} & v_{3,6} & v_{4,6} & v_{5,6} & v_{6,6} & v_{7,6} \\ v_{1,7} & v_{2,7} & v_{3,7} & v_{4,7} & v_{5,7} & v_{6,7} & v_{7,7} \end{bmatrix}$$

Neben den gegenüber dem potentiellen Zellkern $v_{4,4}$ niedrigeren umliegenden Werten muss eine der folgenden Bedingungen hinsichtlich der räumlichen Variabilität erfüllt sein, damit es zur endgültigen Identifikation von $v_{4,4}$ als Zellkern kommt:

1.) $v_{4,4} > v_a + \bar{v}_a$ mit

$$v_a = v_{4,4} \cdot 0.07 \frac{mm}{h} + 1.25 \frac{mm}{h} \quad \text{und}$$

$$\bar{v}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^6 \sum_{j=2}^6 v_{i,j} \quad (\text{ohne } v_{4,4})$$

Die Formel für v_a wurde dabei aus Brendel et al (2014) übernommen.

2.) $v_{4,4} > v_b + \bar{v}_b$ mit

$$v_b = v_{4,4} \cdot 0.11 \frac{mm}{h} + 1.75 \frac{mm}{h} \quad \text{und}$$

$$\bar{v}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 v_{i,j} \quad (\text{ohne } v_{4,4})$$

Die identifizierten Zellkerne sind in Abbildung 5 dargestellt:

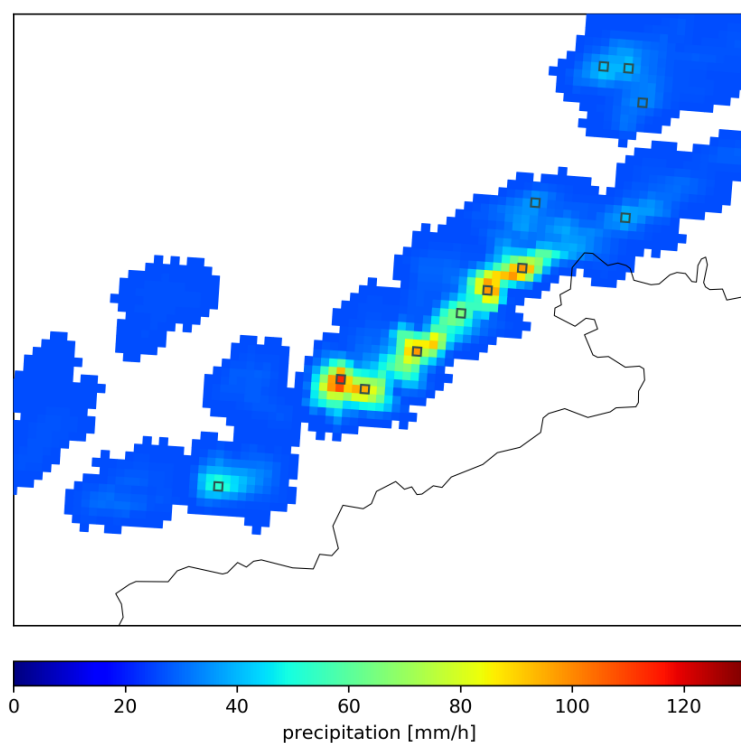


Abbildung 5: Identifizierte Zellkerne für den 16.6.2012, 14:10 Uhr

Weiterhin werden die den Zellkern umliegenden Pixel dahingehend untersucht, ob sie einen vorgegebenen Schwellwert überschreiten und über eine Kante direkt oder indirekt über andere Zellpixel mit dem Zellkern verbunden sind. Ist dies der Fall, so werden sie der Zelle des entsprechenden Zellkerns zugeordnet. Existieren mehrere Lösungen, wird das Pixel der Zelle mit dem nächstliegenden Zellkern zugeordnet. Ist auch über die Distanz keine eindeutige Zuordnung möglich, entscheidet der Zufall. Ermittelte Zellen und dazugehörige Zellkerne sind in Abbildung 6 dargestellt.

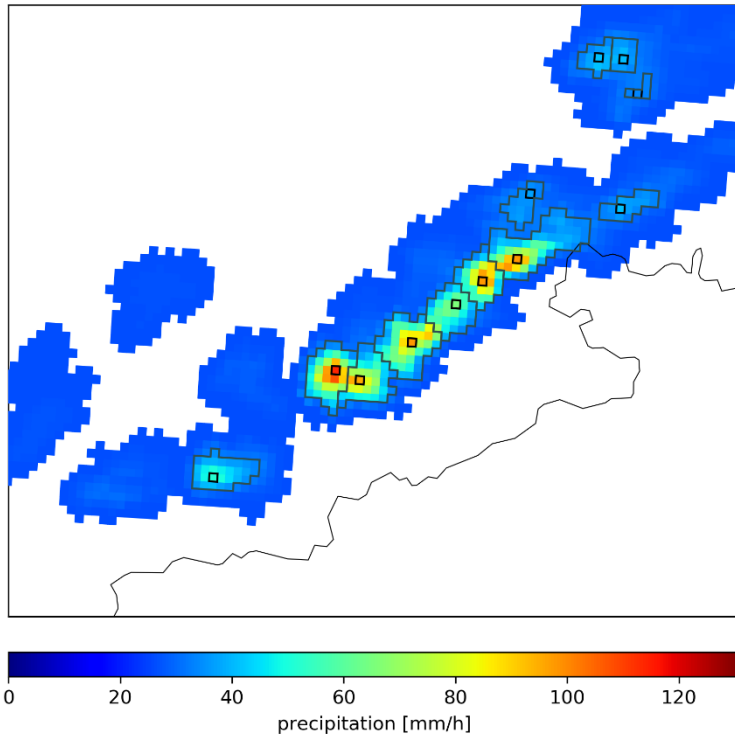


Abbildung 6: Identifizierte Zellen mit Zellkernen für den 16.6.2012, 14:10 Uhr

Neben der Ermittlung und Abspeicherung der Koordinaten des Zellkerns werden auch die Größe der Zelle sowie die minimale, mittlere und maximale Niederschlagsintensität in der Zelle erfasst. Zusätzlich wird die Distanz zum nächsten Nachbarn (basierend auf der Distanz der Zellkerne) bestimmt und eine Ellipse an die jeweiligen Zellen angepasst. Durch die Abspeicherung der beschreibenden Parameter der Ellipse (Zentroid, Länge und Ausrichtung der Achsen) ist es möglich einzelne Zellpopulationen statistisch zu beschreiben und entsprechende Zufallsfelder zu simulieren.

Aus der Bedingung, dass ein Zellkern nur aus einem Pixel bestehen darf, resultiert die Frage, welchen Einfluss diese restriktive Bedingung auf die Analyse hat? Beispielsweise könnte ein Zellkern auch aus zwei Pixeln mit identischer Niederschlagsintensität über dem Schwellwert bestehen. Solche Fälle werden beim angewendeten Algorithmus von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Zur Beantwortung der Frage wurde der Identifikationsalgorithmus dahingehend modifiziert, dass Zellkerne auch aus mehreren, über die Kanten zusammenhängenden Pixeln mit Niederschlagsintensitäten über dem Schwellwert bestehen können. Die zusätzlichen Bedingungen hinsichtlich der umliegenden Pixel gelten für das die Zellkerne umlagernde Band. Das Ergebnis der Analyse wird in Abbildung 7 dargestellt.

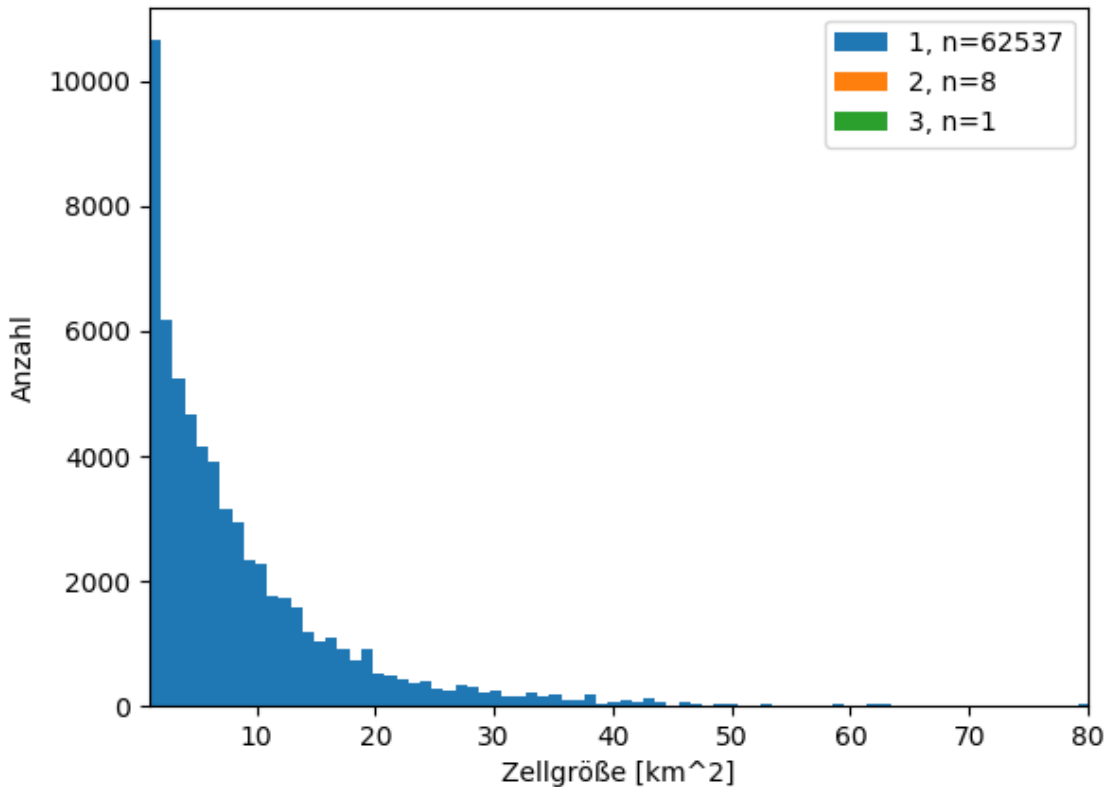


Abbildung 7: Histogramm der Zellgrößen für Zellen mit Zellkernen aus 1, 2 und 3 Pixeln. N gibt jeweils die Gesamtanzahl der Zellen an.

Die hier aufgetragene Anzahl der Zellen entspricht der für einen zeitlichen Ausschnitt aus dem Untersuchungszeitraum aus allen Szenen ermittelten Zellen. Im späteren Verlauf der Arbeit wird ein Teil dieser Zellen durch den Trackingalgorithmus zusammengefasst wodurch sich die Anzahl der Zellen erheblich reduziert. Es wird deutlich, dass auch vor dem Hintergrund eines sich verkomplizierenden Trackingalgorithmus Zellen mit Zellkernen > 1 Pixel vernachlässigt werden können. Ebenso zeigt sich aber auch, dass die Betrachtung von Zellen statt lediglich Zellkernen Sinn macht.

Die ermittelten Zellen der einzelnen Szenen werden zu Zelltracks zusammengefasst. Dazu wird ein Verlagerungsvektor zur Identifikation einer Zelle in der folgenden Szene (5 Minuten später) aus der Position des Zellkerns in der vorherigen Szene sowie der Windgeschwindigkeit und -richtung in 700 hPa (Moseley et al., 2013) aus Daten der ERA-Interim-Reanalyse (Dee et al., 2011) ermittelt. Hierbei wird darauf Rücksicht genommen, dass Abszissen- und Ordinatenachse der polarstereographischen Projektion der Radardaten nicht mit Längen- und Breitenkreisen an denen sich u- und v-Windgeschwindigkeiten in ERA-Interim ausrichten, übereinstimmen. Die Verlagerungsvektoren sind in Abbildung 8 dargestellt.

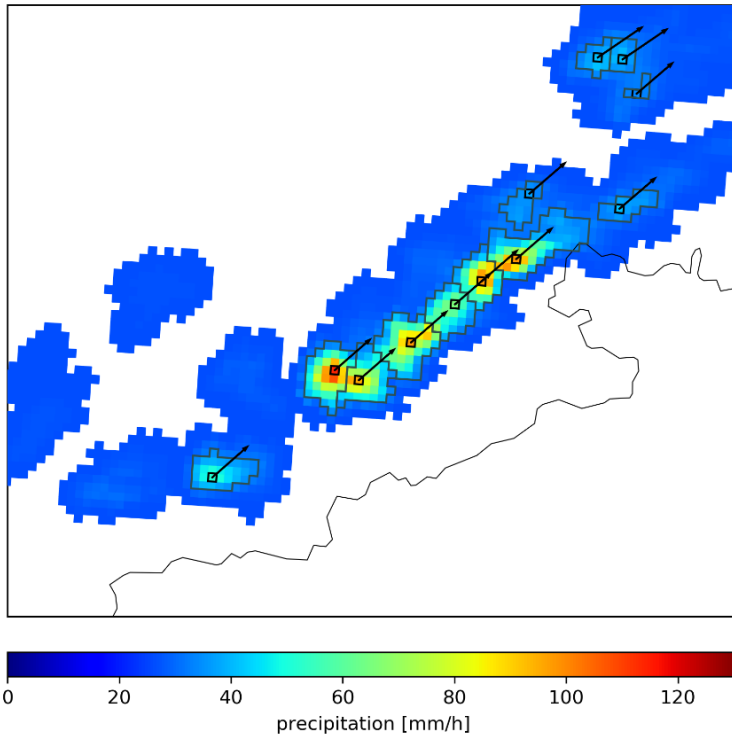


Abbildung 8: Zellkerne, Zellen und Verlagerungsvektoren für den 16.6.2012, 14:10 Uhr

Da den Zellen in ihrer Bewegung ein gewisses Eigenleben und den ERA-Interim-Daten ein gewisser Fehler zugestanden wird, wird um die durch den Verlagerungsvektor bestimmte neue Position des Zellkerns ein Suchradius festgelegt, in dem der neue Zellkern gesucht wird. Dieser Radius wird über den Faktor k bestimmt, der die Länge des Verlagerungsvektors skaliert. Steinacker et al. (2001) diskutieren die Größe von k und geben Werte von 1.2 bis 3.5 an, erwähnen aber gleichzeitig auch die Möglichkeit k von der Länge des Verlagerungsvektors abhängig zu machen. In Abbildung 9 wird der in dieser Studie verwendete k -Faktor in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit dargestellt. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit wird auch der Suchradius größer, da ein größeres Abweichen der Zelle von der übergeordneten Windrichtung zugestanden wird. Es wird deutlich, dass bei geringeren Windgeschwindigkeiten auch eine Suche entgegen der Windrichtung erfolgt.

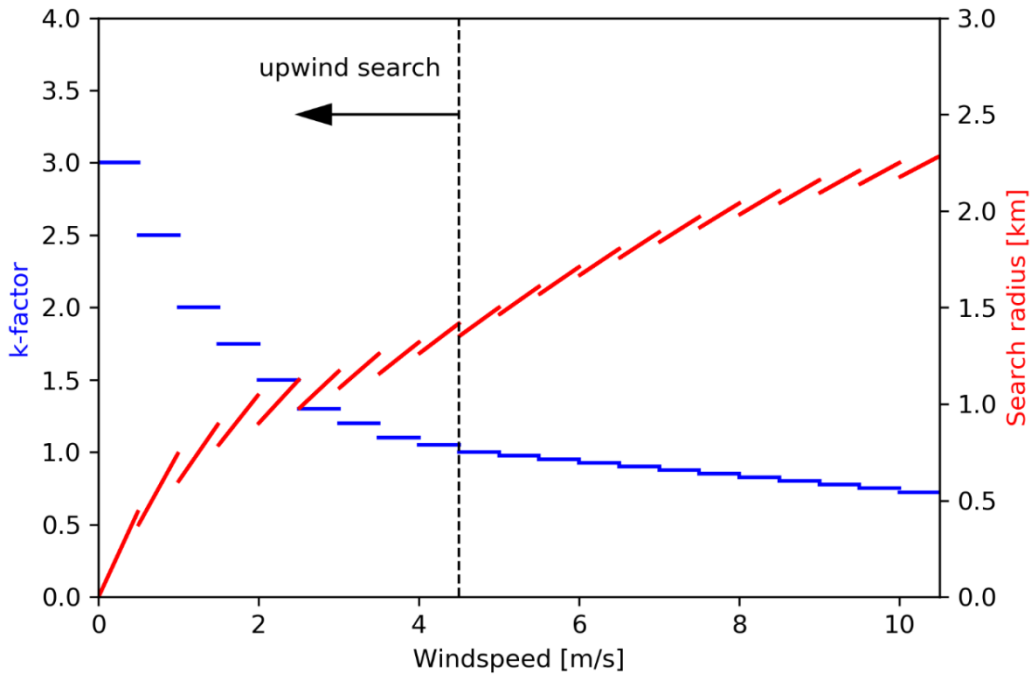


Abbildung 9: k-Faktor und Suchradius in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

Wird innerhalb des vorgegebenen Suchradius (Abbildung 10) in der nächsten Radarszene ein Zellkern gefunden, so werden beide Zellen zu einem Track verbunden. Sind mehrere Zellen im Suchradius vorhanden, wird die Zelle, deren Zellkern der durch den Projektionsvektor vorgegebenen Position am nächsten liegt, dem Track hinzugefügt (Abbildung 11). Haben zwei Zellkerne die gleiche Distanz, entscheidet der Zufall. Findet sich kein Zellkern innerhalb des Suchradius, endet der Track.

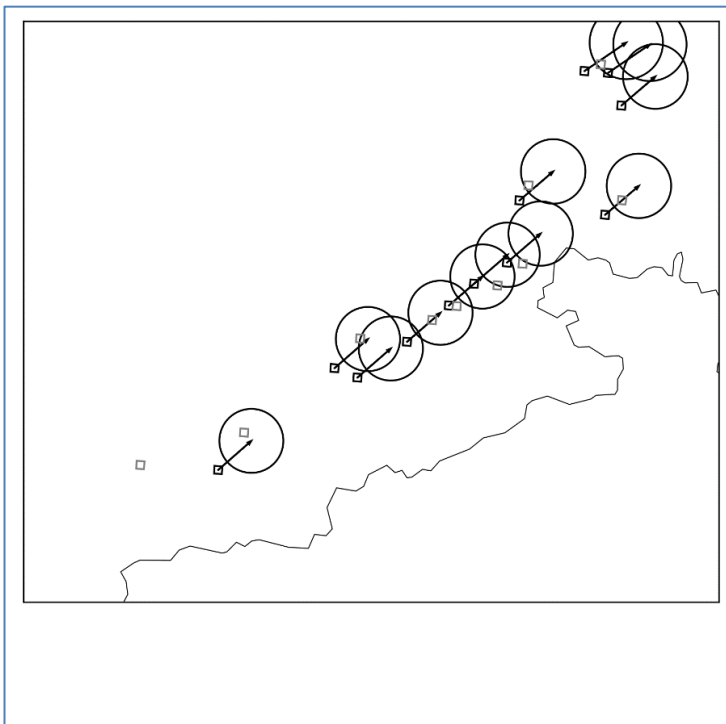


Abbildung 10: Verlagerungsvektoren, Suchradius und identifizierte Zellkerne in der nächsten Radarszene

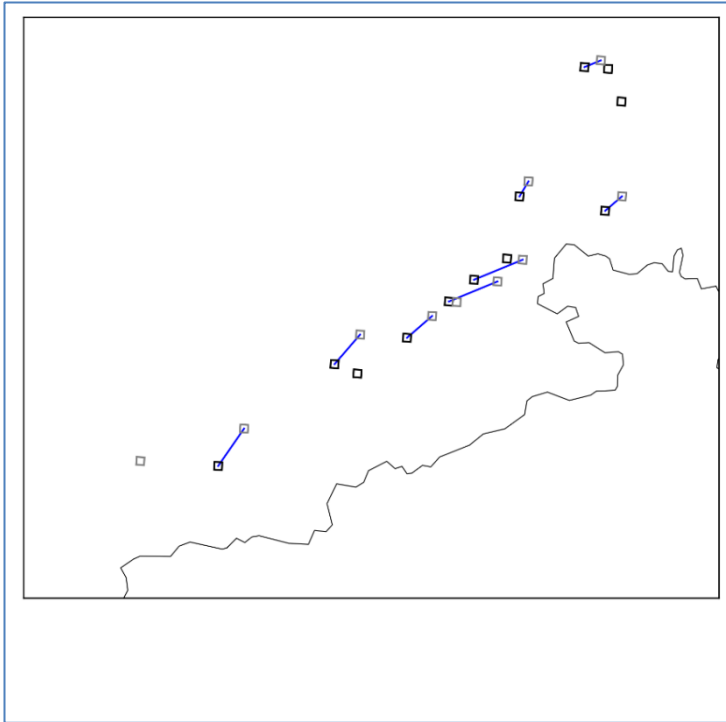


Abbildung 11: Identifizierte Tracks

Insbesondere bei hohen Windgeschwindigkeiten ist es möglich, dass die Stützstellen der Tracks mehrere Pixel voneinander entfernt liegen. Es wird davon ausgegangen, dass auch die dazwischenliegenden Pixel von der darüber ziehenden Zelle beeinflusst wurden. Dies zieht eine Interpolation von Lage und Intensität der Zelle begrenzt durch die beiden Stützstellen nach sich. Hierfür wird erst die Lage und Intensität des Zellkerns interpoliert. Weiterhin werden die Zellen interpoliert, indem sie temporär an den Stützstellen ausgerichtet an den Zellkernen übereinandergelegt werden. Die Interpolation der Zellkerne gibt die Anzahl der notwendigen Zwischenschritte wieder, die äquidistant zwischen den Stützstellen verteilt werden. Entsprechend werden für jede Gitterzelle des temporären Feldes, die an mindestens einer der Stützstellen als Teil der Zelle ausgewiesen war, die Werte für die Zwischenschritte linear interpoliert. Anschließend werden die Zellen der Zwischenschritte entsprechend der interpolierten Position ihres Zellkernes an die finale Stelle im Feld verschoben.

Es ergeben sich entsprechend des Trackingalgorithmus für das Zielgebiet identifizierte Zellen, wobei eine Zelle dem Zielgebiet zugewiesen wird, wenn ihr Zellkern sich zumindest innerhalb eines Teils des Tracks im Zielgebiet befunden hat.

2.7 Gefährdungspotentiale

Zur Abschätzung der Gefährdung durch konvektive Ereignisse und ihre Begleiterscheinungen werden verschiedene Gefährdungspotentiale berechnet. Die Berechnung erfolgt dabei aus den ermittelten Zelltracks. Es handelt sich um folgende Gefährdungspotentiale:

Allgemeines Konvektionspotential:

Das Allgemeine Konvektionspotential beschreibt das Gefährdungspotential durch das Auftreten konvektiver Zellen mit einer definierten Mindestintensität (z.B. 20 mm/h). Wird beispielsweise, das Allgemeine Konvektionspotential für ein Gitter mit 10 km Auflösung bestimmt, so werden alle Zellen zum Allgemeinen Konvektionspotential der jeweiligen Gitterzelle zusammengefasst, bei denen Zellkern und/oder andere Teile der Zelle mit einer Niederschlagsintensität größer dem Schwellwert diese Gitterzelle passiert haben.

Starkniederschlagspotential:

Das Starkniederschlagspotential SP geht nicht nur auf die Anzahl der Zellen N ein, sondern auch auf die Niederschlagsintensität I oberhalb eines definierten Schwellwerts. Dabei wird die mittlere Niederschlagsintensität als

$$SP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n$$

berechnet. Hierbei werden beispielsweise für die Berechnung in einem Gitter mit 10 km Auflösung alle Pixel der Zelle mit einer Niederschlagsintensität oberhalb des definierten Schwellwertes einbezogen.

Sturzflutpotential:

Das Sturzflutpotential SFP kombiniert Niederschlagsintensität I und Geschwindigkeit der Zelle V als:

$$SFP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{V_n}$$

Bei der Berechnung werden wieder alle die Niederschlagszelle umfassenden Radarpixel der Zelle oberhalb des definierten Schwellwertes, die innerhalb einer Gitterzelle liegen, berücksichtigt. Nicht berücksichtigt werden Zellen, die nur zu einem Zeitpunkt aufgetreten sind oder sich nicht verlagert haben. Das Sturzflutpotential geht auf den Umstand ein, dass langsam ziehende Zellen mit hoher Niederschlagsintensität lokal einen größeren Schaden verursachen können, während schnell ziehende Zellen ihre Wirkung auf eine größere Fläche verteilen.

Blitzpotential:

Das Blitzpotential setzt sich aus der Anzahl der Blitze pro Tage zusammen. Dabei werden nur Wolke-Boden-Blitze betrachtet.

Hagelpotential:

Das Hagelpotential beschreibt die Anzahl der Tage mit Hagel im Bezugszeitraum.

2.8 Objektive Wetterlagenklassifikation

Zur Analyse der mesoskaligen Bedingungen hinsichtlich der Konvektion wird eine objektive Wetterlagenklassifikation nach Bissolli und Dittmann (2001) durchgeführt. „Objektiv“ bedeutet hierbei, dass es keiner subjektiven Einschätzung eines Bearbeiters bedarf, sondern die notwendigen numerischen Größen direkt aus den Daten von Atmosphärenmodellen berechnet werden können. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Größen die Größen sind, die von globalen Modellen wie Reanalysen und globalen Klimamodellen (GCMs) zuverlässig wiedergegeben bzw. projiziert werden. Die ausschließliche Verwendung

von numerischen Größen zur Ableitung der Wetterlagenklassifikation soll einen direkten Vergleich unterschiedlicher Modelle erlauben. Der Vergleich der Auftretenswahrscheinlichkeit der mit Konvektion verbundenen Wetterlagenklassen in Reanalysen und GCMs gibt dabei implizit einen Hinweis auf das Konvektionspotential für einzelne Szenarien in der Zukunft.

Die zur Klassifizierung verwendeten Größen sind die Advektionsrichtung im 700 hPa-Niveau, die Zyklonalität im 950 hPa und 500 hPa-Niveau sowie die Feuchte als Integral über die Atmosphärensäule. Zur Berechnung der Größen werden Windrichtung und -geschwindigkeit in 700 hPa, das Geopotential in 950 und 500 hPa sowie die Feuchte in unterschiedlichen Atmosphärenniveaus benötigt.

Die Größen werden für das Klassifikationsgebiet ermittelt und entsprechend eines vorgegebenen Schemas gewichtet. Das Klassifikationsgebiet für diese Studie ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Rahmen kennzeichnen hierbei die Bereiche unterschiedlicher Gewichte, die in die Klassifikation eingehen (Gitterpunkte im inneren Bereich gewichtet mit $w=3$; Gitterpunkte im mittleren Bereich gewichtet mit $w=2$; Gitterpunkte im äußeren Bereich gewichtet mit $w=1$).

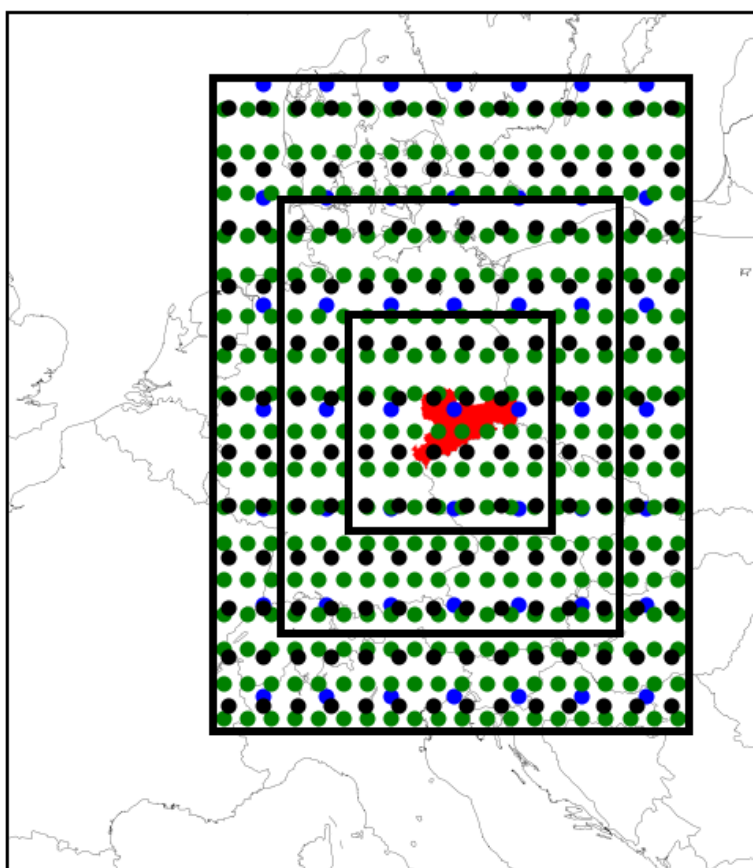


Abbildung 12: Klassifikationsgebiet für die objektive Wetterlagenklassifikation. Die Umrandungen geben jeweils die Bereiche unterschiedlicher Gewichte bei der Berechnung des finalen Ergebnisses wieder (innerer Bereich: Gewicht=3, mittlerer Bereich: Gewicht=2, Äußerer Bereich: Gewicht=1). Blaue Punkte: ECHAM6-Gitterpunkte, Grüne Punkte: ERA-Interim-Gitterpunkte, Schwarze Punkte: Interpolationsgitter zur Berechnung der Klassifikation

Im Prinzip wäre es möglich, die Modelle (hier ERA-Interim und ECHAM6), wie in Abbildung 12 dargestellt, in ihrer Originalauflösung zu verwenden. Jedoch wurde in Kapsch (2011) empfohlen (und auch im persönlichen Austausch noch einmal bestätigt), die Modelle zur Vergleichbarkeit auf ein gemeinsames Gitter (schwarze Punkte in Abbildung 12) zu interpolieren, um ungewünschte Effekte zu vermeiden.

2.8.1 Objektive Wetterlagenklassifikation für ERA-Interim

Ein Problem hat sich dabei mit den Modellwerten der Feuchte im ERA-Interim-Datensatz (Dee et al., 2011) ergeben. Abbildung 13 zeigt für eine Auswahl an ERA-Interim-Datensätzen Werte für die relative Feuchte, als direkt vom Server erhältliche relative Feuchte und als aus der spezifischen Feuchte und der Temperatur berechnete relative Feuchte. Es ist zu erkennen, dass eine nicht unerhebliche Anzahl an Werten > 100 % auftreten. Trotz einer Gittergröße von 0.75 x 0.75 Grad, handelt es sich hierbei wohl Übersättigung hinsichtlich Eis wie auf Nachfrage vom EZMWF mitgeteilt wurde. Entsprechend wurden die relativen Feuchten bei weiteren Berechnungen (mit Bezug zur flüssigen Wasserphase) auf 100% gesetzt.

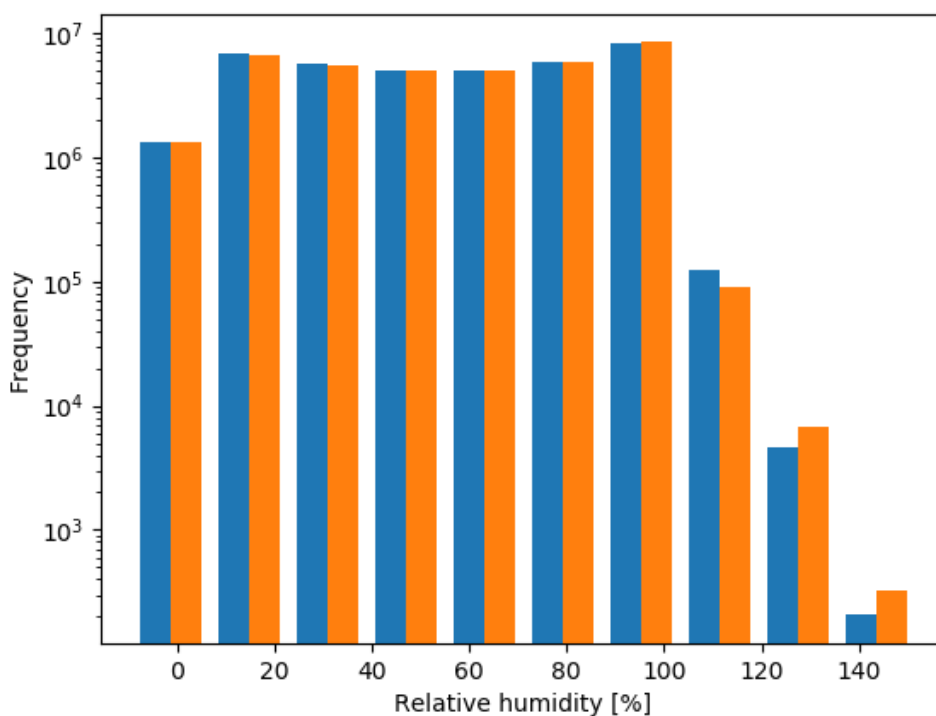


Abbildung 13: Relative Feuchten für eine Auswahl an ERA-Interim-Datensätzen.

In blau sind die direkt erhältlichen Daten zur relativen Feuchte dargestellt, in orange die aus spezifischer Feuchte und Temperatur berechneten Daten

Ergebnis der Klassifikation ist eine tageweise Zuweisung von Wetterlagenklassen, die sich aus der Anströmrichtung im 700 hPa (codiert in den ersten zwei Buchstaben der Klasse, z.B. NO für Nordost, XX für keine bevorzugte Richtung), der Zyklonalität im 950 und 500 hPa-Niveau (Buchstabe 3 für 950 hPa-Niveau, A für antizyklonal, Z für zyklonal, Buchstabe 4 für 500 hPa-Niveau, A für antizyklonal, Z für zyklonal) und der vertikal integrierten Feuchte (Buchstabe 5: F für feucht, T für trocken) ergibt.

Die Klasse für die Feuchte ermittelt sich dabei im Vergleich zum langjährigen Mittel (Juli 1979 bis Dezember 1996) der Feuchte des Tages des Jahres (DOY). Die entsprechende Feuchteklimatologie ist in Abbildung 14 dargestellt.

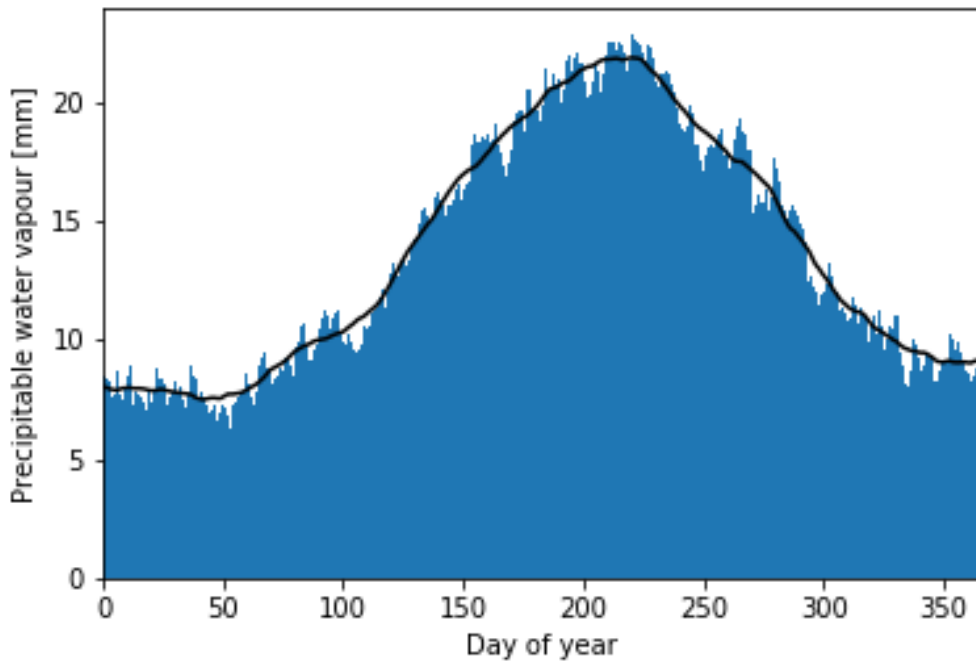


Abbildung 14: Feuchteklimatologie für ERA-Interim (Juli 1979 bis Dezember 1996).
 Die schwarze Linie stellt den gleitenden Mittelwert über ein 31 Tage-Fenster dar.

Da die Werte der Feuchteklimatologie von Tag zu Tag doch noch stark schwanken, könnte es dazu kommen, dass ein Feuchtwert an einem Tag als trocken und am nächsten Tag als feucht klassifiziert würde. Um diesen Effekt zu vermeiden, werden die Feuchtwerte gegen die Daten einer gleitenden Mittelung mit einem 31 Tage-Fenster verglichen (Abbildung 14).

Es ergeben sich die in Abbildung 15 dargestellten Anteile an den einzelnen Wetterlagenklassen für ERA-Interim-Daten für den Zeitraum 1979 bis 2017.

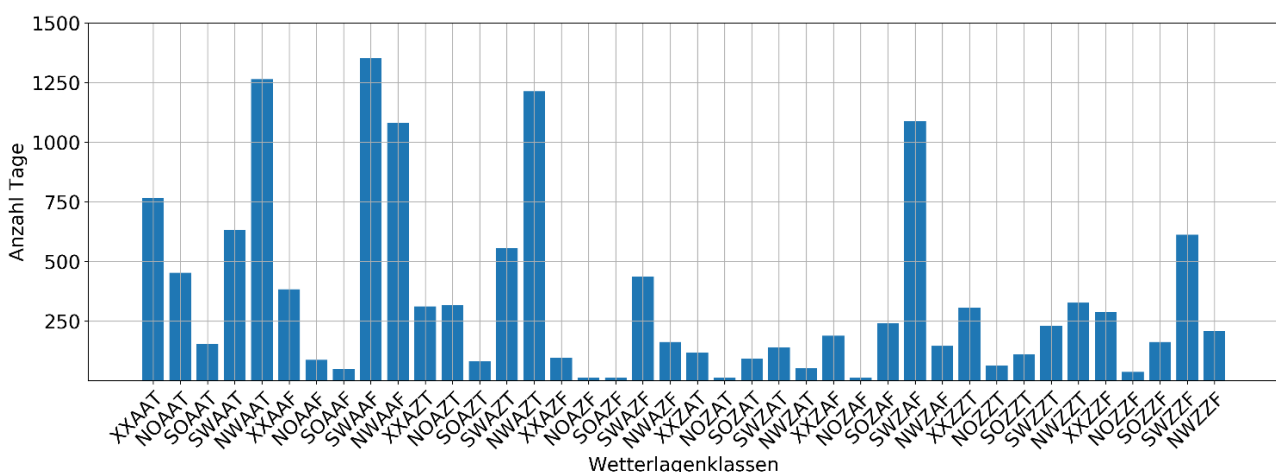


Abbildung 15: Anteil der einzelnen Wetterlagen aus ERA-Interim-Daten für den Zeitraum 1979 bis 2016

2.8.2 Objektive Wetterlagenklassifikation für ECHAM6

Die Modelldaten für ECHAM6 liegen in der benötigten 6stündigen Auflösung nur in geländefolgenden Koordinaten vor. Diese haben den Vorteil, dass die Auflösung im unteren Bereich der Troposphäre hoch ist und so einige Parameter – wie der vertikal integrierte Wasserdampf oder adiabatisch durchmischte Schichten – wie sie zur Berechnung von Konvektionsindizes in einem anderen Teil der Studie verwendet werden, genauer berechnet werden können. Zudem sind diese Daten über die CERA-Datenbank des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg leicht zugänglich. Die Feuchteklimatologie (Abbildung 16) zeigt gegenüber der Feuchteklimatologie aus ERA-Interim-Daten keine signifikante Abweichung.

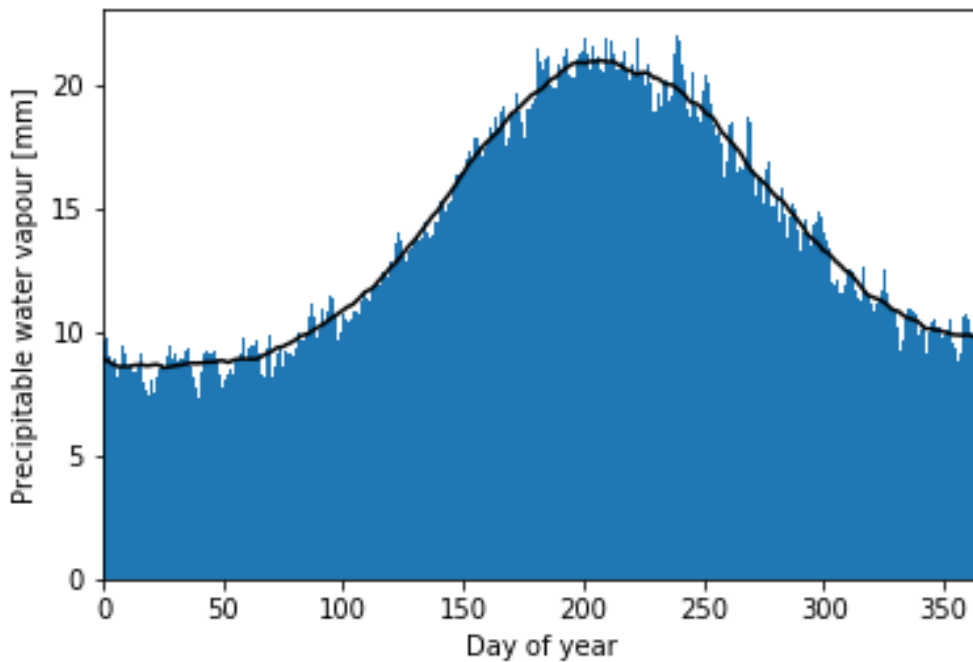


Abbildung 16: Feuchteklimatologie für ECHAM6 (historischer Lauf, 1979 bis 1996). Die schwarze Linie stellt den gleitenden Mittelwert über ein 31 Tage-Fenster dar.

Die geländefolgenden Koordinaten machen jedoch bei der Berechnung des Geopotentials und der Zyklonalität in 950 hPa in bestimmten meteorologischen Situationen und Geländehöhen eine Extrapolation notwendig.

Eine Möglichkeit bestände darin, wie z.B. Riediger und Gratzki (2014) Tagesdaten für die Wetterlagenklassifikation zu nutzen, da diese Daten auf den benötigten Druckniveaus vorliegen.

In dieser Arbeit wurden die 6h-Daten von ECHAM6 entsprechend Trenberth et al. (1993) auf die benötigten Druckniveaus inter- und gegebenenfalls auch extrapoliert.

Die Wetterlagenverteilung für ECHAM6 zwischen 1979 und 2016 zeigt Abbildung 17.

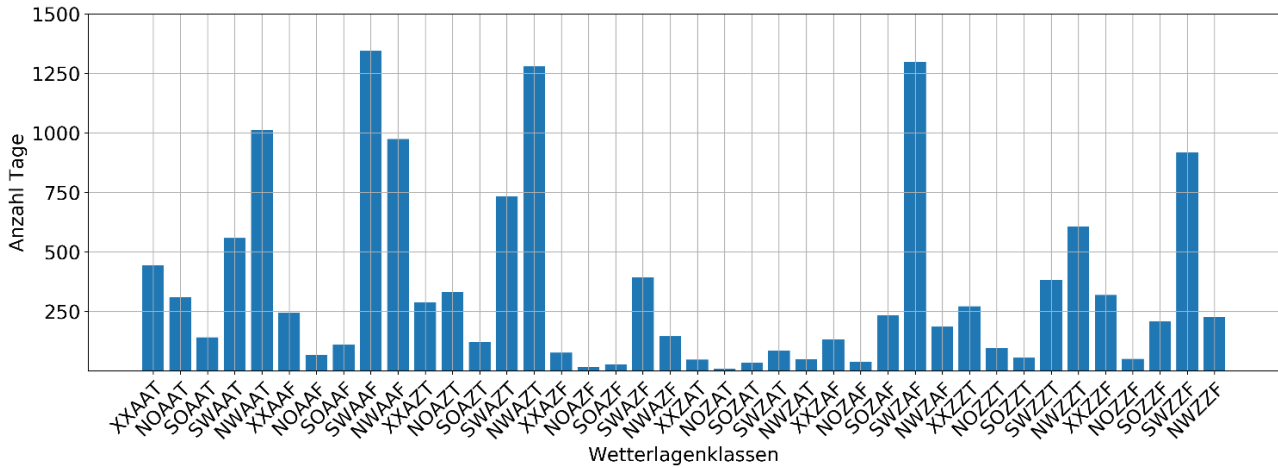


Abbildung 17: Wetterlagen für ECHAM6 für den Zeitraum 1979 bis 2016

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Daten bis einschließlich 2005 aus dem historischen Lauf stammen, während die Daten für die Jahre 2006 bis 2016 aus dem Lauf für das RCP8.5-Szenario entnommen sind. Die Verteilung stimmt generell mit der Verteilung von ERA-Interim überein. Allerdings zeigt Abbildung 18 eine Überschätzung des Auftretens der für die hochreichende Konvektion besonders wichtigen Südwest-Lagen von ECHAM6.

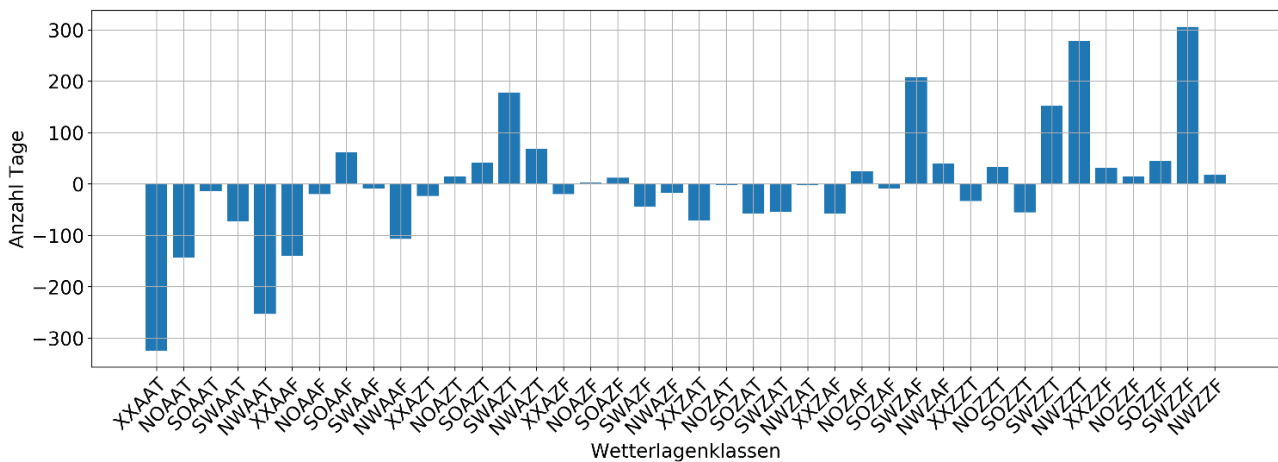


Abbildung 18: Unterschiede der Wetterlagen zwischen ECHAM6 und ERA-Interim

2.9 Auswahl der Konvektiven Tage

Aus dem konvektiven Hauptzeitraum (April bis September) wurden für den Radarzeitraum (2001 bis 2016) die 150 extremsten konvektiven Tage ausgewählt. Es handelt sich hierbei um A1 und B1 in Abbildung 19.

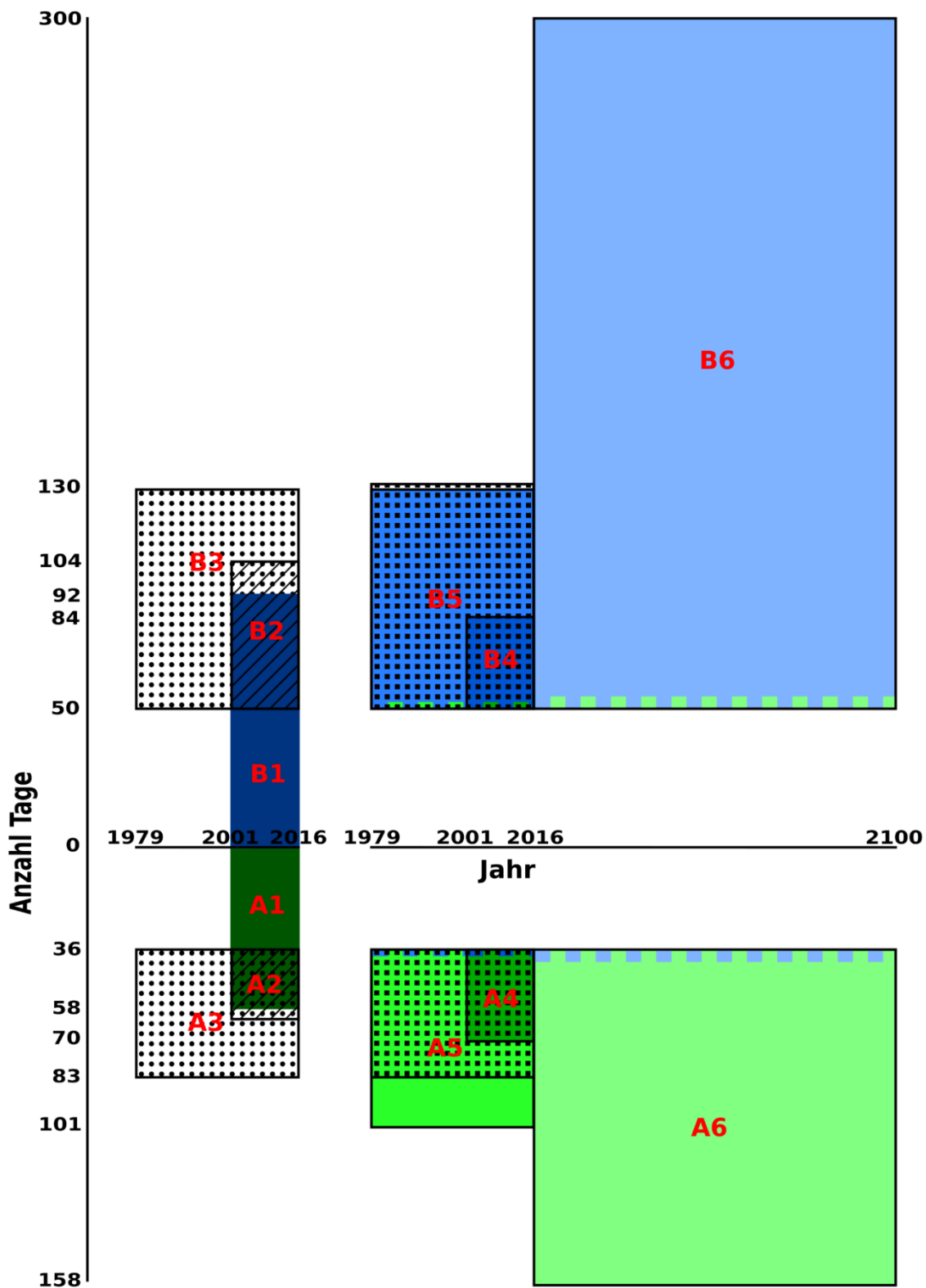


Abbildung 19: Extreme konvektive Tage in den einzelnen Datensätzen

Die Auswahl folgt dabei der Methodik aus Brendel et al. (2014). Dazu wurden alle Tage ausgewählt, an denen 100 oder mehr konvektive Zellen im Testgebiet detektiert wurden. Eine Zelle wird hierbei charakterisiert durch den entsprechenden Track und kann sich somit über mehrere Zeitschritte erstrecken.

Für die ermittelten Tage wurden entsprechend Brendel et al. (2014) vier Parameter berechnet. Dies sind:

- Median der Niederschlagsintensität³ x Anzahl konvektiver Zellen (Parameter 1),
- 90stes Perzentil der Niederschlagsintensität konvektiver Zellen (Parameter 2),
- Mittlere Zugbahnlänge konvektiver Zellen (Parameter 3),
- Mittlere Zuggeschwindigkeit konvektiver Zellen (Parameter 4).

Zusätzlich wurden zwei Parameter berechnet, die auf die ermittelten Zellgrößen eingehen. Dies sind:

- Median der räumlich aggregierten Niederschläge der Zelle (Parameter 5),
- Mittlere Zellgröße (Parameter 6).

Parameter 1 geht dabei auf die Intensität des Ereignisses sowohl durch die Intensität der Zellen als auch durch ihre Anzahl ein. Hierbei entspricht die Grundgesamtheit zur Berechnung des Medians der Niederschlagsintensität den Intensitäten der Zellkerne zu den jeweiligen Zeitpunkten. Parameter 2 nimmt besonderen Bezug auf die intensivsten Zellen. Parameter 3 beschreibt über die Zugbahnlänge, auf welchen räumlichen Bereich die einzelnen Zellen einen Einfluss haben. Eng verbunden damit ist Parameter 4, der auf die Zuggeschwindigkeit der Zellen eingeht. Haben die Zellen beispielsweise eine lange Zugbahn gekoppelt mit einer hohen Zuggeschwindigkeit, ist das Schadenspotential eher niedriger. Parameter 5 und 6 ergeben sich aus der Identifizierung der Zellen (um den Zellkern) und gehen auf die Intensität und die Größe der Zellen ein.

Die Bedingung, dass mindestens 100 konvektive Zellen am Tag im Testgebiet vorhanden sein müssen, führt für den Zeitraum 2001 bis 2016 (April bis September) zur Auswahl von 1.648 Tagen.

Interessanterweise ist dabei der Tag mit den meisten Zellen der 12. August 2002 (Hochwasser in Sachsen) mit 31404 Zellen. Es zeigt sich also, dass der Zellidentifikationsalgorithmus auch auf konvektiv verstärkte Bereiche im ansonsten stratiform geprägten Niederschlagsgebiet anspricht. In der letztendlichen Auswahl der 150 extremen Tage, kommt der 12. August 2002 jedoch nicht vor.

Die 150 extremen Tage wurden als Kombination 5 aus 6 Parameter ausgewählt. Dazu werden die Tage einzeln hinsichtlich der 6 Parameter sortiert (Abbildung 20).

Rang	Parameter 1↓	Parameter 2↓	Parameter 3↓	Parameter 4↑	Parameter 5↓	Parameter 6↓
1	2013-06-20	2013-08-03	2015-05-12	2007-08-07	2011-08-23	2013-08-07
2	2012-07-05	2015-07-03	2007-05-11	2014-04-29	2013-08-07	2006-06-22
3	2005-07-29	2012-08-20	2006-05-20	2014-04-23	2003-05-08	2013-08-06
7	2003-06-05	2014-06-11	2012-07-19	2008-06-01	2013-06-20	2005-07-29
8	2007-05-22	2013-06-20	2008-06-23	2002-08-29	2002-06-20	2007-05-14
10	2006-07-06	2006-06-15	2009-09-03	2001-09-26	2012-07-05	2013-06-20
15	2016-06-25	2012-09-10	2006-09-04	2002-07-31	2013-08-06	2012-07-02
17	2013-08-06	2010-06-10	2016-07-08	2007-05-23	2003-07-22	2015-07-07
22	2002-06-20	2012-07-05	2010-08-26	2006-07-27	2006-06-21	2011-08-23
28	2015-08-16	2006-07-26	2014-04-14	2012-06-10	2015-07-03	2016-06-26
51	2002-08-10	2011-08-23	2001-09-28	2014-07-27	2006-06-22	2009-08-17
55	2008-07-03	2013-08-06	2011-08-08	2015-08-12	2003-06-05	2003-06-12
68	2007-08-08	2003-06-05	2004-06-28	2015-07-03	2005-07-22	2004-06-09
89	2007-08-07	2007-08-07	2014-05-09	2008-07-30	2005-05-29	2016-07-27
108	2004-07-23	2008-07-31	2011-05-26	2002-05-23	2006-07-21	2015-07-03
122	2011-08-23	2009-07-02	2002-06-15	2008-04-30	2014-05-23	2001-08-04
169	2015-07-25	2009-07-17	2015-06-01	2016-07-13	2007-08-07	2006-05-20
180	2014-04-27	2007-08-10	2015-07-20	2016-06-04	2015-08-15	2015-05-12
228	2013-06-02	2015-05-12	2004-07-16	2005-09-12	2002-07-16	2007-06-12
254	2013-08-10	2003-08-14	2009-07-24	2011-05-31	2015-05-12	2007-08-09
271	2012-06-18	2011-08-14	2003-06-12	2001-08-18	2007-08-13	2007-08-07
318	2004-08-13	2010-07-15	2006-08-07	2013-06-20	2002-08-04	2008-07-31
351	2001-06-16	2014-08-29	2001-06-15	2013-08-06	2009-04-08	2011-05-22
353	2015-05-12	2015-04-26	2005-06-18	2003-07-16	2010-08-27	2012-07-26
390	2015-07-03	2007-07-01	2005-09-29	2007-08-11	2001-06-30	2012-04-11
396	2003-07-28	2011-08-25	2011-08-23	2007-06-03	2002-05-10	2014-04-27
463	2005-07-25	2011-06-07	2002-09-27	2005-08-20	2011-05-12	2011-08-08
464	2012-06-19	2003-07-17	2003-07-05	2004-04-19	2015-08-04	2011-05-19
465	2008-09-03	2015-09-11	2011-07-09	2013-07-29	2010-05-12	2015-04-28
466	2015-09-03	2003-07-03	2001-09-09	2010-06-25	2008-08-07	2011-05-20
467	2007-05-08	2002-08-31	2015-07-06	2007-08-19	2004-05-12	2010-07-14
468	2012-07-03	2001-06-14	2012-08-06	2014-09-16	2014-07-08	2005-07-14

150 Tage

Abbildung 20: Ranking der konvektiven Tage hinsichtlich der 6 Parameter

Die Sortierung erfolgt dabei absteigend für die Parameter 1, 2, 3, 5 und 6 sowie aufsteigend für den Parameter 4. Anschließend werden die 150 Tage bestimmt, die bei 5 der 6 Parameter in der Sortierung auf den oberen Rängen liegen. Dazu wird die Liste der Tage iterativ von oben abgearbeitet, bis ein Tag bei 5 Parametern gefunden wurde. Dieser Tag wird dann der Liste der extremen Tage hinzugefügt. Für den 20.6.2013 in Abbildung 20 ist dies beispielsweise bei Rang 318 der Fall, für den 7.8.2007 beispielsweise schon bei Rang 169. Die vorgegebenen 150 extremen Tage sind mit Erreichen von Rang 469 gefunden.

Wie bei Brendel et al. (2014) zeigen sich zwei Cluster, auf die sich alle extremen Tage verteilen. Die Cluster setzen sich aus der Kombination von Extremwerten bei den folgenden Parametern zusammen:

- Cluster 1: Parameter 1, Parameter 2, Parameter 3, Parameter 5 und Parameter 6: 58 Tage
- Cluster 2: Parameter 1, Parameter 2, Parameter 4, Parameter 5 und Parameter 6: 92 Tage

Die Kombinationen unterscheiden sich folglich durch Extremwerte bei den Parametern 3 (Zugbahnlänge) und 4 (Zuggeschwindigkeit) (Abbildung 21). Eine niedrige Zuggeschwindigkeit mit entsprechend langer Wirkungszeit der Zelle schließt eine lange Zugbahnlänge mit entsprechend beeinflusster Raumgröße aus.

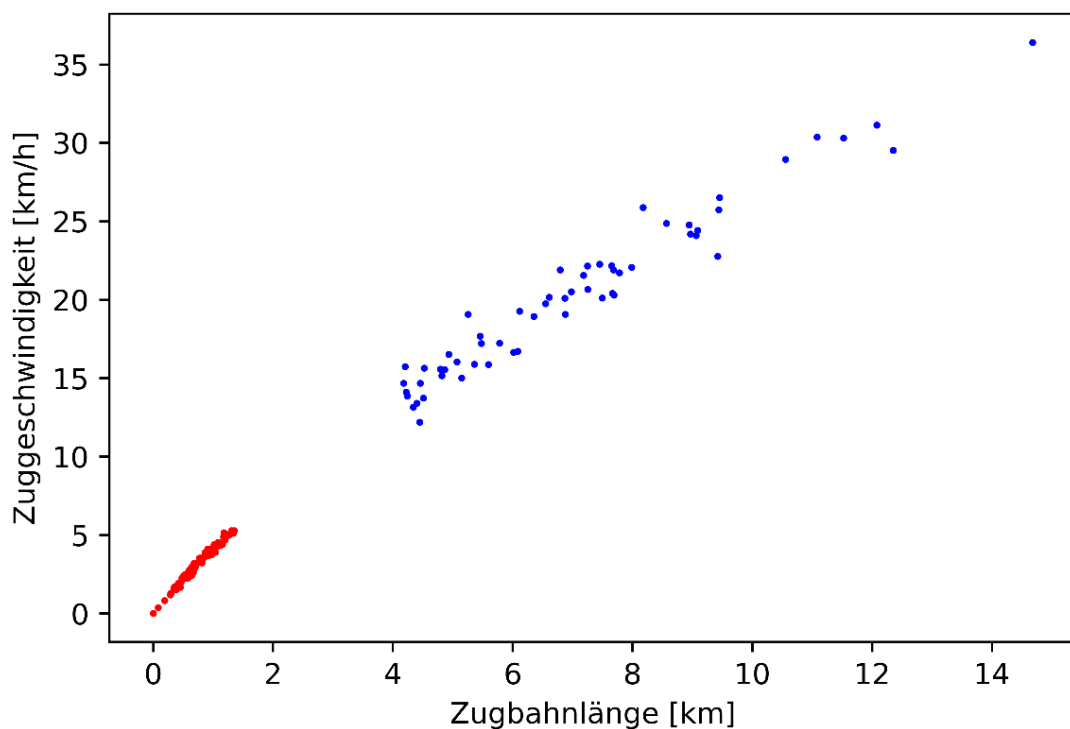


Abbildung 21: Mittlere Zugbahnlänge und mittlere Zuggeschwindigkeiten der Zellen der extrem konvektiven Tage (blau: Cluster 1, rot: Cluster 2)

2.10 Berechnung der Prädiktoren

Um später im Rahmen eines Regressionsmodelles die Neigung einzelner Tage zur Bildung von Konvektion zu bestimmen, wurden sowohl für das rezente Klima als auch für Projektionen des zukünftigen Klimas Indizes berechnet, die Atmosphärenzustände beschreiben, welche der Ausbildung von Konvektion zuträglich sind. Dabei handelt es sich neben Temperatur-, Feuchte- und Windinformationen einzelner Schichten um Indizes, welche die Schichtung der Atmosphäre beschreiben aber auch Größen, die auf dynamische Eigenschaften der Atmosphäre eingehen, welche die Konvektion positiv beeinflussen. Beispiele für aus

Profilen z.B. von Temperatur und Feuchte ermittelten Indizes sind die Convective Available Potential Energy (CAPE) oder der Showalter Index. Beispiele für aus Feldern in einem Druckniveau ermittelten Größen sind Q-Vektoren oder die Zyklonalität. Insgesamt handelt es sich um 321 Größen, die im Anhang 1 aufgelistet sind. Die Größen wurden sowohl für die ERA-Interim-Reanalyse als auch für die ECHAM6-Modelldaten ermittelt. Die Berechnung erfolgte für ein Vertikalprofil im Zentrum des Untersuchungsgebietes für Daten um 12 Uhr (UTC). Die maximalen Gradienten der Indizes ergeben sich dabei aus den Gradienten, die zu umliegenden Punkten berechnet wurden.

2.11 Anpassung der logistischen Regressionsmodelle

Um das Auftreten extrem konvektiver Tage vom Auftreten konvektiver Tage (mit mehr als 100 Zellen) basierend auf den atmosphärischen Bedingungen, wie sie z.B. von einem Atmosphärenmodell simuliert werden, zu unterscheiden, wurden logistische Regressionsmodelle angepasst. Bei einem solchen Modell werden durch eine Regressionsbeziehung aus den Prädiktoren (wie oben beschrieben) die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines extrem konvektiven Tags („1“) sowie eines konvektiven Tags („0“) vorhergesagt. Die logistischen Regressionsmodelle werden später im Sinne eines statistisch-dynamischen Downscalings zur Auswahl der Situationen zum Downscaling verwendet.

Die potentiellen Prädiktoren wurden zunächst auf Multikollinearität geprüft, um Prädiktoren auszuschließen, die keinen zusätzlichen Informationsgehalt haben, da eine starke Korrelation zu anderen Prädiktoren vorliegt. Dazu wurde ein Variance Inflation Factor von 7 angenommen und bei Prädiktorenpaaren, die im Test diesen Wert überschritten, ein Prädiktor ausgeschlossen. Entsprechend konnte die ursprüngliche Anzahl an Prädiktoren reduziert werden. Weiterhin wurden Fehlwerte für Indizes, die nicht berechnet werden konnten (beispielsweise die Höhe des Kondensationsniveaus bei ausbleibender Kondensation) durch sinnvolle Werte (z.B. Mittelwert der restlichen Datensätze) ersetzt.

Die übrigen Prädiktoren wurden nun im Rahmen einer schrittweisen multiplen logistischen Regression auf ihren Erklärungsgehalt untersucht und entsprechende Regressionsmodelle angepasst. Eine Anpassung erfolgt dabei durch entweder a.) das schrittweise Hinzufügen oder b.) das schrittweise Entfernen von Prädiktoren mit einem anschließenden Test, ob sich die Testgröße verbessert hat. Ist dies der Fall, so wird der getestete Prädiktor in der finalen Auswahl belassen bzw. der finalen Auswahl entnommen.

Als Testgröße wird hierbei gewöhnlich das Akaike-Informations-Kriterium (AIC) verwendet, welches neben der Güte des Modells auch die Anzahl der verwendeten Prädiktoren berücksichtigt und so Modelle mit weniger Prädiktoren begünstigt. In unserem Fall haben Tests ergeben, dass das AIC eher ungünstig ist, da eine hohe Güte des Modells wichtiger erscheint als ein zusätzlicher Blick auf die Anzahl an verwendeten Prädiktoren. Entsprechend wurde als Testgröße die Größe „Proportion correct“ oder auch „accuracy“ verwendet, die sich aus der Summe der Anzahl der vorhergesagten und beobachteten Treffer („1“) und der nicht vorhergesagten und nicht beobachteten Treffer („0“) dividiert durch die Anzahl aller Fälle ergibt.

Da der Einfluss der Reihenfolge der möglichen Prädiktoren beim Hinzufügen/Entnehmen einen großen Einfluss auf das Endergebnis hat, wurden in einem Lauf 10000 schrittweise Regressionen mit zufällig ausgewählten Reihenfolgen durchgeführt. Jeder Lauf wurde mit schrittweisen Hinzufügen durchgeführt; zudem wurden 8 Realisierungen für jeden Lauf gemacht.

Das beste Modell für Cluster 1 ergab als Prädiktoren:

u_500hPa_center, LI_50, ws_700hPa, grad_Adedokun2, grad_lr_3_4km, grad_rh_500hPa, grad_RI, grad_mu_p_LFC_300hPa, grad_ml100_km3_CAPE, grad_td_300hPa, lr_4_5km, grad_CIN50, grad_mod_TT, rh_500hPa, grad_rh_950hPa

Die Güte der Modellanpassung wird in Tabelle 1 deutlich. Die erzielte „Proportion correct“ lag bei 0,973.

Tabelle 1: Kontingenztabelle für die Modellanpassung von Cluster 1

		Beobachtung	
		Ja	Nein
Modell	Ja	22	4
	Nein	36	1438

Das beste Modell für Cluster 2 ergab als Prädiktoren:

LI_50, ws_850hPa, cyclonic_700hPa, KO, grad_p_LFC100, grad_YON, grad_HI, RI, lr_2_3km, grad_t_700hPa, ws_500hPa, SI, TEI_925, u_500hPa_center, grad_lr_6_7km

Die Güte der Modellanpassung wird in Tabelle 2 deutlich. Die erzielte „Proportion correct“ lag bei 0,96.

Tabelle 2: Kontingenztabelle für die Modellanpassung von Cluster 2

		Beobachtung	
		Ja	Nein
Modell	Ja	42	12
	Nein	50	1396

Die jeweils per Modell bestimmten extremen konvektiven Tage für Cluster 1 und Cluster 2 sind in Abbildung 19 jeweils als A2 und B2 dargestellt.

Mit Pseudo-Bestimmtheitsmaßen nach McFadden für Cluster 1 von 0,396 und für Cluster 2 von 0,497 liegen Modellanpassungen mit sehr guter Verbesserung gegenüber dem Nullmodell vor. Weitere Gütemaße der Modellanpassung wie den Heidke Skill Score (HSS), die Probability of Detection (POD) und das False Alarm Ratio (FAR) zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Gütemaße der Modellanpassung

	Cluster 1	Cluster 2
HSS	0,51	0,55
POD	0,38	0,46
FAR	0,15	0,22

Ein Vergleich mit den von Brendel et al. (2014) ermittelten Prädiktoren zeigt eine deutlich schlechtere Modellanpassung bei denen für beide Cluster kein extremer konvektiver Tag vom Modell gefunden wird. Hierdurch wird deutlich, dass sich konvektive Situationen in Sachsen deutlich von denen in Thüringen unterscheiden.

2.12 Anwendung des logistischen Regressionsmodelles

Die angepassten Regressionsmodelle wurden nun sowohl auf Daten der Reanalyse ERA-Interim als auch auf den historischen und den RCP8.5 Lauf von ECHAM6 angewendet um potentiell extreme konvektive Tage zu ermitteln.

Um ein statistisch besser abgesichertes Ergebnis zu erzielen, wurde davon ausgegangen, dass das Klima im Zeitraum 1979 bis 2016 dem Klima im Radarzeitraum 2001 bis 2016 entspricht. Folglich wurden die Regressionen für Cluster 1 und 2 auf ERA-Interim-Daten des ausgeweiteten Zeitraums angewendet. Dabei wurden für Cluster 1 in dem Zeitraum 47 potentiell extreme konvektive Tage (A3 in Abbildung 19) und für Cluster 2 80 Tage (B3 in Abbildung 19) gefunden. Um die gleichen Zeiträume für ECHAM6 zu analysieren, wurden der historische Lauf und der Lauf für das RCP8.5-Szenario zusammengeführt und die Daten für entsprechende Zeiträume extrahiert. Für Cluster 1 ergab die Anwendung der logistischen Regression auf die ECHAM6-Daten für den Zeitraum 2001 bis 2016 34 potentielle extreme konvektive Tage (A4 in Abbildung 19) und für den Zeitraum 1979 bis 2016 65 Tage (A5 in Abbildung 19). Für Cluster 2 ermittelte die Regression für 2001 bis 2016 ebenso 34 Tage (B4 in Abbildung 19) und für 1979 bis 2016 80 Tage (B5 in Abbildung 19). Hierbei ist zu erwähnen das 2 Tage im Zeitraum 2001 bis 2016 für beide Cluster ermittelt wurde (siehe Abbildung 19).

Die Unterschiede in der Anzahl der ermittelten Tage zwischen ERA-Interim und ECHAM6 (A3 vs. A5 bzw. B3 vs. B5 in Abbildung 19) werden als Bias des Klimamodells gewertet. Im verwendeten Regressionsmodell wurde die Grenzwahrscheinlichkeit p bei 0,5 angesetzt: simulierte Werte $\leq p$ werden als Nichteintreten des Ereignisses, also als nicht potentiell extremer konvektiver Tage gewertet, simulierte Werte $> p$ als Eintreten des Ereignisses, also als potentiell extremer konvektiver Tag. Um nun den Bias des Klimamodells zu korrigieren, wurde p unter Berücksichtigung der doppelt auftretenden Tage für beide Modelle dahingehend angepasst, dass die Anzahl der für ECHAM simulierten Fälle (in Abbildung 19 der gepunktete Bereich von A5 bzw. B5) den aus ERA-Interim ermittelten Fällen (A3 bzw. B3 in Abbildung 19) entspricht. Für Cluster 1 bedeutet dies eine Erhöhung von p auf 0.588, für Cluster 2 eine Erniedrigung von p auf 0.49.

Für den Zeitraum 2017 bis 2100 wurden für Cluster 1 122 Tage (A6 in Abbildung 19) und für Cluster 2 250 Tage (B6 in Abbildung 19) in den ECHAM6-Daten ermittelt. Dabei wurden 4 Tage für beide Cluster ermittelt. Die für ECHAM6 ermittelten potentiellen extremen konvektiven Tage zeigt Abbildung 22.

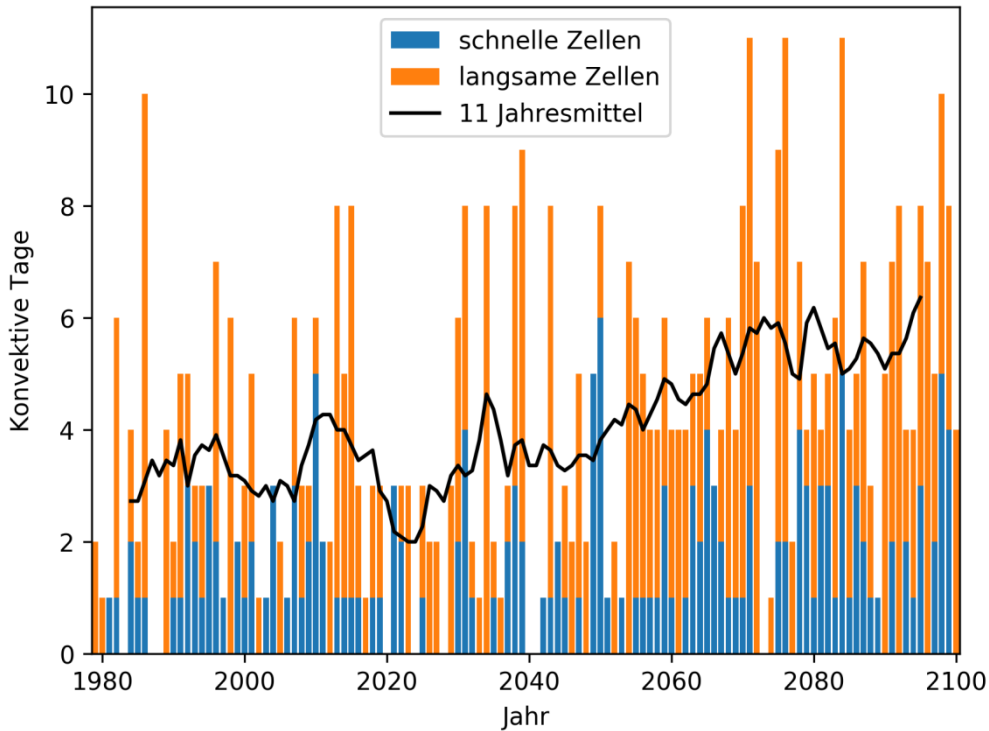


Abbildung 22: Potentielle extreme konvektive Tage aus historischem Lauf und RCP8.5-Szenario von ECHAM6

Neben der hohen interannuellen Variabilität wird insbesondere am 11 Jahresmittel ein signifikanter Anstieg der Tage ab 2040 deutlich.

2.13 Regionale Klimamodellierung

Zur Abschätzung der Gefährdung durch hochreichende Konvektion wurden Zukunftsszenarien mit einem regionalen Klimamodell downgescaled. Zum Einsatz kam hierbei das Weather Research and Forecast Modell (WRF) (Skamarock et al. 2008) in der Version 3.8.1. Es handelt sich hierbei um ein nicht-hydrostatisches Modell mit einer Vielzahl implementierter Parametrisierungen. Dieses Modell wurde in parallelisierter Version auf dem Großrechner Taurus des Zentrums für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen der Technischen Universität betrieben.

Mit dem Modell wurden die per Logistischer Regression aus dem Modell ECHAM6 ausgewählten potentiell konvektiven Tage simuliert. Hierbei handelt es sich um 93 Tage aus dem historischen Lauf (1979-2005) und 418 Tage aus dem RCP8.5-Lauf (2006-2100). Das Downscaling fand dabei mit einem 4fachen Nesting statt (Abbildung 23). Die Informationsweitergabe findet dabei nur in Richtung der höheren Auflösung statt.

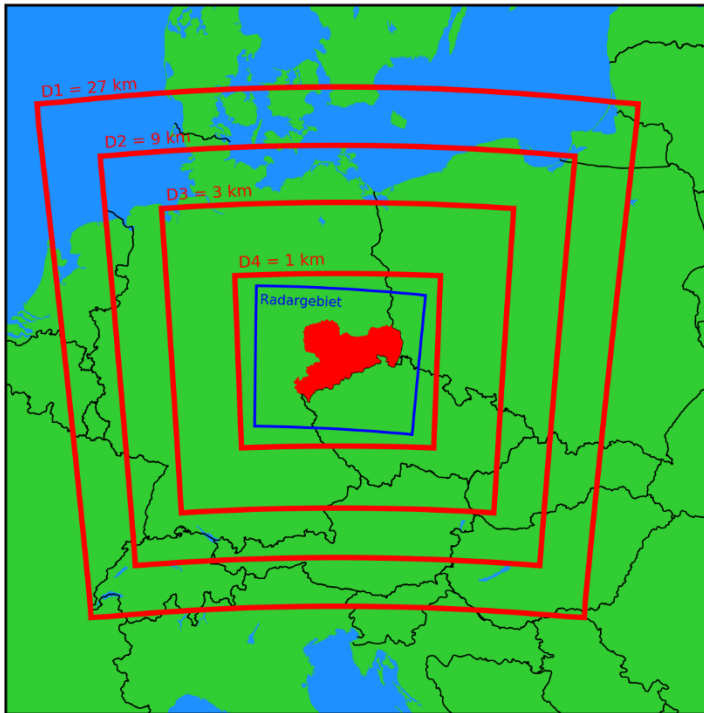


Abbildung 23: Nestingsschritte für WRF-Simulationen

Für die Nestinggebiete D1 bis D3 wurde die Konvektion parametrisiert. In der mit 1 km sehr hochauflösten Nestingregion D4 wurde keine Konvektionsparametrisierung verwendet. Bei diesen „konvektionsauflösenden“ Simulationen (Brisson et al., 2017; Prein et al., 2015) wird davon ausgegangen, dass hochreichende Konvektion, die Niederschlag und potentielle Begleiterscheinungen erzeugt, durch entsprechende Prozesse auf dem Rechengitter der Modelle beschrieben wird. Bei der Auflösung von 1 km lässt sich vorstellen, dass der Aufwindbereich einer Gewitterzelle den Bereich der Gitterzelle einnimmt. Durch die Verwendung derart hoher Auflösungen wird davon ausgegangen, dass neben der besseren Prozessbeschreibung auch die bessere Beschreibung der Oberfläche zu einer insgesamt besseren Simulationsergebnisse beiträgt. Dies sollte neben der besseren Beschreibung von Größe und Intensität der Niederschlagsereignisse/-gebiete auch zu einer besseren zeitlichen und räumlichen Verortung führen. Die höhere räumliche Auflösung geht häufig, wie auch in dieser Studie, mit einer höheren zeitlichen Auflösung der Simulationsergebnisse einher. Simulationen mit derart hohen Auflösungen sind auf der anderen Seite durch einen erhöhten Rechen- und Speicherplatzbedarf gekennzeichnet.

Trotz des Verzichts auf die Konvektionsparametrisierung in der höchsten Auflösung sind weiterhin Parametrisierungen zur Beschreibung des Einflusses von im Rechengitter nicht aufgelösten Prozessen auf das modellierte System nötig. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der Mikrophysik-Parametrisierung zu. Sie beschreibt die unterschiedlichen Hydrometeorotypen (z.B. Regen, Eis, Graupel) hinsichtlich Größenverteilungen, Interaktion, Niederschlagsbildung sowie ihren Einflüssen auf die vom Modell aufgelösten Variablen (z.B. Temperatur und Feuchte). Die Beschreibung der Mikrophysik im Modell kann unterschiedlich komplex ausfallen, wobei komplexere Beschreibungen mit einer deutlich erhöhten Rechenzeit einhergehen.

Da aus der Literatur keine eindeutigen Empfehlungen für Mikrophysik-Parametrisierungen bei konvektionsauflösenden Simulationen hervorgehen (Prein et al, 2015) wurden im Rahmen dieser Studie Tests mit unterschiedlichen Parametrisierungen durchgeführt. Dabei wurde insbesondere auf die enthaltenen Hydrometeorklassen Rücksicht genommen, um später den in der Parametrisierung enthaltenen Graupel als Proxy für den Hagel auswerten zu können (Kain et al., 2010). Weiterhin stellt die Mikrophysik-Parametrisierung das Bindeglied zur Simulationen von Blitzen dar. Da komplexere Parametrisierungen (2-Momenten-Schemata) in den Tests deutlich längere Rechenzeiten verursachten, nicht jedoch durch bessere Ergebnisse gekennzeichnet waren, wurde in dieser Arbeit auf die Lin-Purdue-Parametrisierung (Lin et al., 1983) als ein 1-Moment-Schema mit 5 Hydrometeorklassen (inklusive Graupel) zurückgegriffen.

Die weitere Beschreibung der WRF-Simulationen ist in Tabelle 4 zusammengefasst:

Tabelle 4: WRF-Konfiguration

Modellkonfiguration	
Modell Zeitschritt (sec)	30, 10, 3, 1
Spin-Up (h)	12
Vertikale Schichten Atmosphäre	48
Vertikale Schichten Boden	5
Mikrophysik	Lin-Purdue-Schema
Langwellige Strahlung	RRTM-Schema
Kurzwellige Strahlung	Dudhia-Schema
Turbulenz	Monin-Obukhov (Janjic Eta)-Ähnlichkeitstheorie
Grenzschicht	Mellor-Yamada-Janjic (ETA) TKE-Schema
Konvektion	Kain-Fritsch-Schema (außer innerstes Nesting)

2.13.1 Parametrisierung von Hagel

Zusätzlich zur Auswertung des Graupels als Proxy für Hagel wurde die Radarreflektivität für die simulierten Hydrometeore unter Annahme einer Exponentialverteilung mit variablen Skalenparameter berechnet (Stoelinga, 2005). Bei Auftreten einer Reflektivität größer 55 dBz in der zu einer Gitterzelle zugehörigen Säule wurde Hagel angenommen (Kunz und Puskeiler, 2010).

2.13.2 Parametrisierung von Blitzen

Um Aussagen über das Auftreten von Blitzen in der Zukunft machen zu können, wurde eine Parametrisierung für Blitze in konvektionsauflösenden Modellsimulationen (McCaul et al., 2009) auf die mit ECHAM6 simulierten konvektiven Tage des RCP8.5-Szenario angewendet. Die Parametrisierung basiert dabei auf zwei einzelnen Parametrisierungen.

Die erste Parametrisierung bezieht sich dabei auf den konvektiven Kern und stellt einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Blitzen sowie dem aufwärts gerichteten Fluss großer, gefrorener Niederschlagspartikel (Graupel) dar. Der Fluss [m/s] wird berechnet als $w * q_g$, wobei w hier die Vertikalwindgeschwindigkeit [m/s] und q_g das Mischungsverhältnis für Graupel [kg/kg] im -15°C-Niveau ist. Als unterer Schwellwert, unterhalb dessen kein Auftreten von Blitzen angenommen wird, werden 0.01 Blitze pro 5 Minuten angenommen. Zur

Berechnung der Blitzdichte wird der Fluss mit einem empirischen Koeffizienten (0.042) skaliert. Dieser Koeffizient wurde zwar von McCaul et al. (2009) für Fälle in Alabama (USA) ermittelt, jedoch haben Tests der Parametrisierung für Europa gute Ergebnisse gezeigt (Field et al., 2018).

Die zweite Parametrisierung ermittelt die Blitzrate aus dem vertikal integrierten Gehalt gefrorener Hydrometeore (Schnee, Eis und Graupel) und geht damit auf die Blitztätigkeit im Amboss der Gewitterwolke ein. Auch hier wird mit einem von McCaul et al. (2009) ermittelten Faktor (0.20) skaliert und die minimale Blitzrate auf 0.4 Blitze pro 5 Minuten festgesetzt.

Die Kombination beider Parametrisierungen erfolgt über eine gewichtete Addition der Blitzraten aus der ersten und der zweiten Parametrisierung, wobei das Gewicht für die erste Parametrisierung mit 0.95 (Gewicht für die zweite Parametrisierung: 0.05) den Einfluss der Blitze innerhalb des konvektiven Kerns hervorhebt. Auch bei der Zusammenführung der Parametrisierungen wird ein unterer Schwellwert (0.02) für die Blitzrate angesetzt.

Generell wird bei dieser Parametrisierung die Blitzaktivität überschätzt. Ebenso muss hinzugefügt werden, dass die Parametrisierung extrem sensitiv auf die berechneten Hydrometeore und damit auf die verwendete Mikrophysikparametrisierung ist (McCaul et al., 2020). Die hier verwendete Parametrisierung (Lin et al., 1983) sollte jedoch geeignet sein, da sie alle benötigten Hydrometeorklassen simuliert. Dennoch sollte die Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich relativer Eigenheiten und Veränderungen und nicht hinsichtlich absoluter Werte erfolgen.

2.13.3 Bias-Korrektur

Obwohl davon ausgegangen wird, dass durch eine erhöhte Auflösung der Modelle sowie den Verzicht auf Konvektionsparametrisierungen die Qualität der Simulation des Niederschlags verbessert wird (Prein et al., 2015; Meredith et al., 2020), sind die Simulationen immer noch mit einem Niederschlagsbias behaftet. Zur Analyse des Bias werden die Tage herangezogen, die über die nicht-angepasste logistische Regression (Grenzwahrscheinlichkeit von 0.5) in den Radar- und Klimamodelldaten als extreme Tage erkannt wurden. In der Abbildung „Extreme Tage“ handelt es sich dabei um die Schnittmenge aus A1 und A3 bzw. B1 und B3 als dem Beobachtungsdatensatz sowie den Datensätzen A4 und B4 (Abbildung 19), welche das Verhalten des Modells beschreiben.

Entsprechend stehen für die Biaskorrektur 64 Tage aus dem Radardatensatz sowie 66 Tage aus dem ECHAM6-Datensatz zur Verfügung. Zur Analyse werden unter Beachtung der unterschiedlichen Projektionen von Radar- und Klimamodelldaten jedem Gitterpunkt des Regionalmodells das nächste Radarpixel zugeordnet und so die entsprechenden Vergleichsdatensätze erzeugt.

Ein Vergleich der Datensätze zeigt, dass im Modelldatensatz im Gegensatz zum Radardatensatz deutlich mehr Gitterzellen über Raum und Zeit ohne Niederschläge auftreten (99,65% beim Modell, 94,42% beim Radar). Die generell hohen Werte sind den konvektiven Situationen mit nur lokal auftretendem Niederschlag geschuldet. Das Auftreten des Niederschlags hat dabei eine stark zufällige Komponente, die bei der geringen Anzahl an betrachteten Tagen besonders zum Tragen kommt. Zudem können die Unterschiede durch die Kombination aus verwendeten Globalmodell und Regionalmodell inklusive des entsprechenden Modell Set-Ups (Nesting, Zeitschritte, etc.) und der verwendeten Parametrisierungen bedingt sein.

In der Abbildung 24 wird der Bias für alle Gitterzellen mit Niederschlag gezeigt. Für diese Daten zeigt sich der typische in Global- und Regionalmodellen (z.B. Dai, 2006) gefundene Niederschlagsbias: Das Modell produziert zu viele Gitterzellen mit geringen Niederschlägen, jedoch zu wenig extreme Niederschläge.

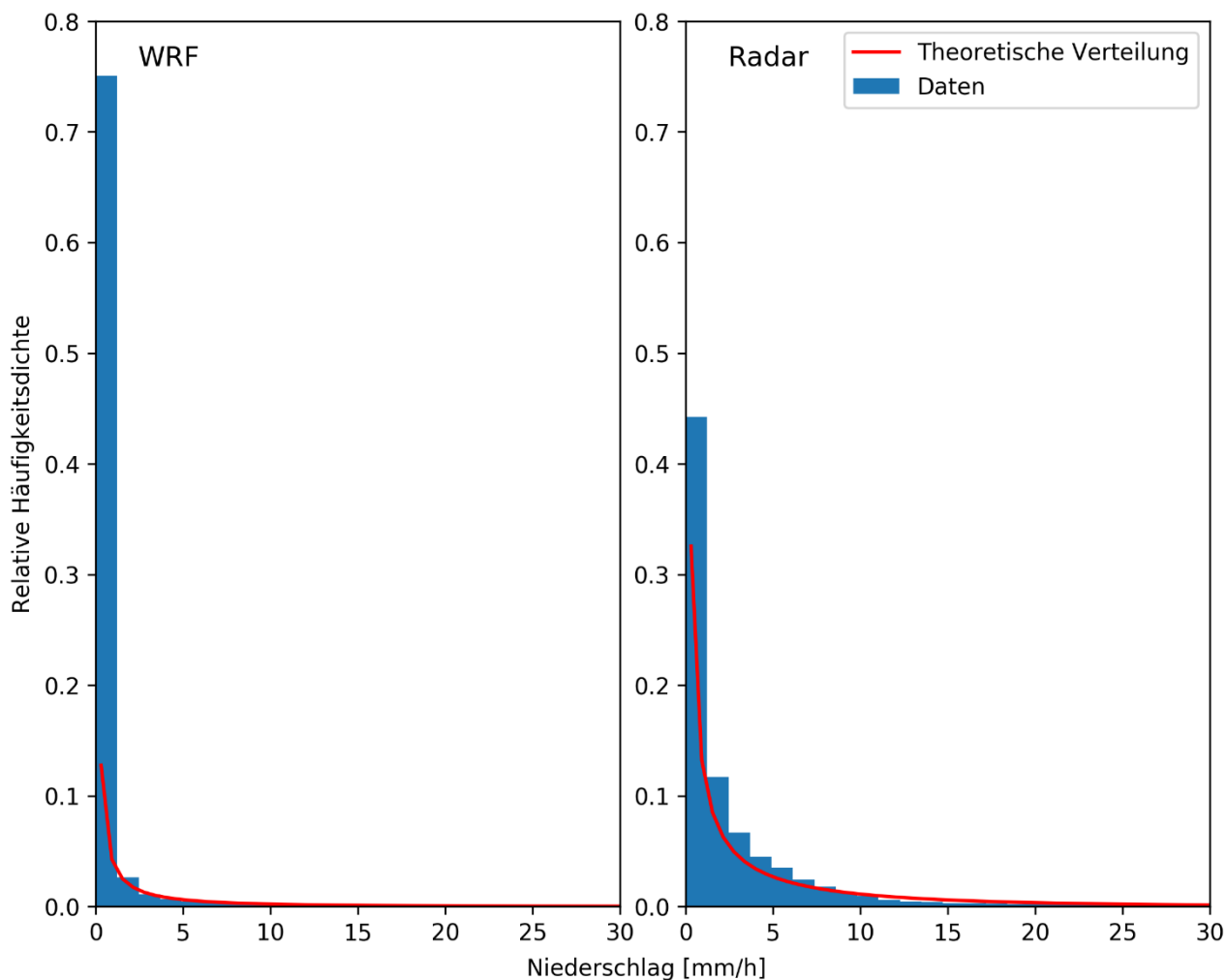


Abbildung 24: Bias der Gitterzellen mit Niederschlag und angepasster Gamma-Verteilung

Es muss hinzugefügt werden, dass existierende Bias-Korrekturen des Niederschlags auf Tagesdaten angewendet werden. Neben Brendel et al. (2014) sind dem Autor keine weiteren Arbeiten bekannt, wo Bias-Korrekturen auf zeitlich höher aufgelöste Daten angewendet wurden.

Brendel et al. (2014) verwenden, wie viele andere Autoren auch, zur Korrektur ein Verfahren, welches eine Gamma-Verteilung an beobachtete und modellierte Daten mit Niederschlag anpasst und basierend auf den Verteilungen eine Korrektur der Niederschlagsintensität durchführt (Piani et al., 2010). Zusätzlich wird bei diesem Verfahren eine Korrektur hinsichtlich der relativen Häufigkeit des Auftretens von Niederschlag durchgeführt.

In der Abbildung 24 ist zusätzlich die Anpassung von Gamma-Verteilungen per Momenten-Methode dargestellt. Es zeigt sich, dass die angepasste Verteilung es nicht schafft, die sehr hohe Anzahl geringer Niederschläge wiederzugeben. Entsprechend wurde in dieser Arbeit als nicht-parametrische Biaskorrektur das Quantile-Mapping nach Gudmundsson et al. (2012) in der Umsetzung nach Ivanov und Kotlarski (2017) verwendet.

Dabei werden die einzelnen empirisch ermittelten Quantile per additiven Term korrigiert. Zwischen den Quantilen wird linear interpoliert um den Korrekturterm zu bestimmen. Im Bereich der niederschlagsfreien Werte im Modell wird per zufälligen Sampling im entsprechenden Bereich der kumulierten Verteilungsfunktion bestimmt, ob der Korrekturterm zur Niederschlag führt und wie hoch dieser entsprechend ist. Kommt es zu Niederschlagswerten im Modell, die durch die kumulierte Verteilung im Referenzzeitraum nicht abgedeckt sind, wird der additive Term des größten Quantils zur Korrektur verwendet (Boé et al., 2007).

Brendel et al. (2014) und andere Autoren ermitteln individuelle Korrekturfunktionen für jede Gitterzelle des Modells, um damit auf eventuelle lokale Unterschiede einzugehen. Da konvektive Tage aber durch sehr lokale Niederschlagsereignisse geprägt sind, ergibt sich in Kombination mit der geringen Anzahl an Tagen in den zur Bestimmung der Korrekturfunktionen zugrundeliegenden Datensätzen das Problem, dass die Datenlage an einigen Gitterpunkten nicht ausreicht, um für jeden Gitterpunkt statistisch haltbare Faktoren zu ermitteln. Die Datenlage für jeden Gitterpunkt zeigt Abbildung 25.

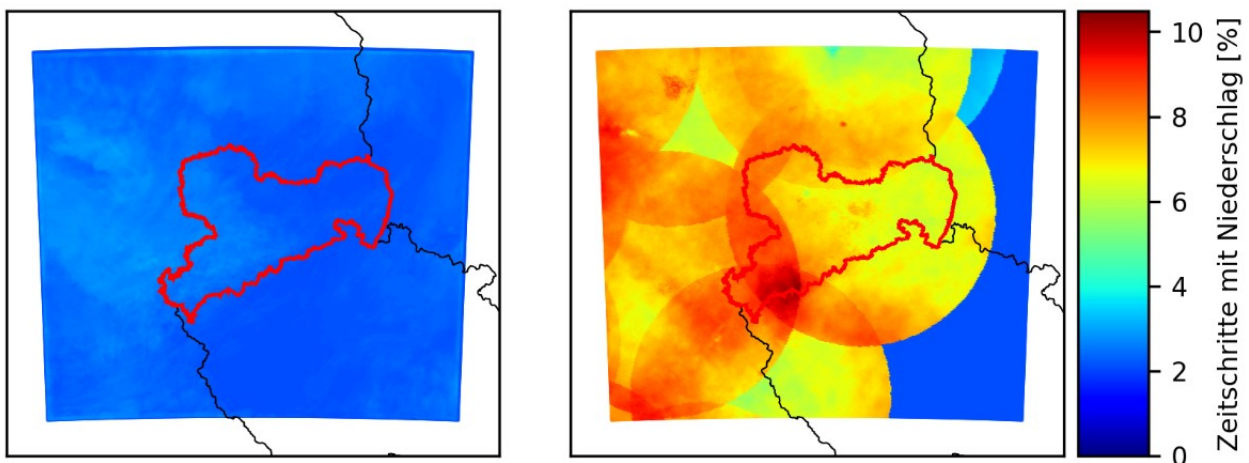


Abbildung 25: Zeitschritte mit Niederschlag in den Datensätzen zur Ermittlung der Biaskorrektur (links: WRF, rechts: Radar).

Die Abbildung 25 zeigt, dass in beiden Datensätzen nur sehr wenige Zeitschritte durch Niederschlag charakterisiert sind. Hierdurch erscheint es nicht sinnvoll die Korrekturgrößen für die Biaskorrektur lokal zu unterscheiden. Zudem stellt sich die Frage, ob eine lokale Unterscheidung bei konvektiven 5 Minuten-Niederschlägen sinnvoll ist, oder ob hier die Darstellung der ortsunabhängigen physikalischen Prozesse den hauptsächlichen Anteil am Niederschlagsbias hat. Entsprechend wurde entschieden eine einheitliche Biaskorrektur im Untersuchungsgebiet durchzuführen.

3 Ergebnisse

3.1 Zellstatistiken

Ein Ergebnis dieser Studie sind Statistiken von Zellen und Zelltracks, die aus den Radardaten abgeleitet wurden. Sie erlauben Abschätzungen über das konvektive Geschehen im Untersuchungsgebiet, können als Referenz für Klimamodelle dienen, ermöglichen aber auch Nutzern beispielsweise die Generierung von synthetischen Niederschlagsfeldern. Es werden hier exemplarisch Ergebnisse dieser Analysen gezeigt.

Abbildung 26 zeigt beispielsweise die Tracklängenverteilung über den Untersuchungszeitraum, inklusive der Monate Oktober bis März. Zellen mit einer Tracklänge von 0 km werden hier nicht dargestellt.

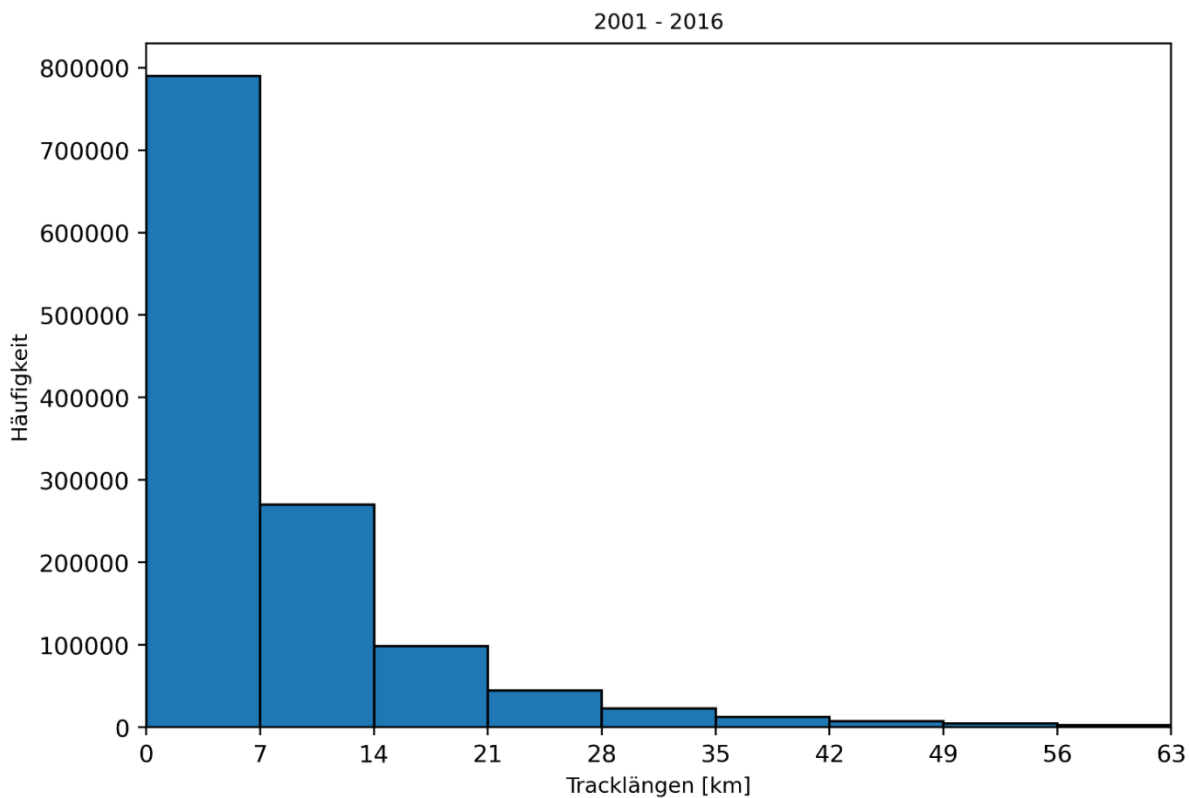


Abbildung 26: Tracklängen aus Radardaten im Untersuchungsgebiet für den Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 (alle Monate)

Es wird die sehr hohe Anzahl sehr kurzer Tracklängen deutlich. Dies sind beispielsweise nur kurz existierende Zellen, wie sie sich an Sommertagen über dem Erzgebirge bilden. Da es sich hierbei um autochthone Wetterlagen handelt, bleiben die Tracklängen eher kurz.

Eine räumliche Analyse der Zellen, die nur einen Zeitschritt (also 5 Minuten) existieren zeigt sich für das Ganze Jahr in Abbildung 27 und für die Sommermonate in Abbildung 28.

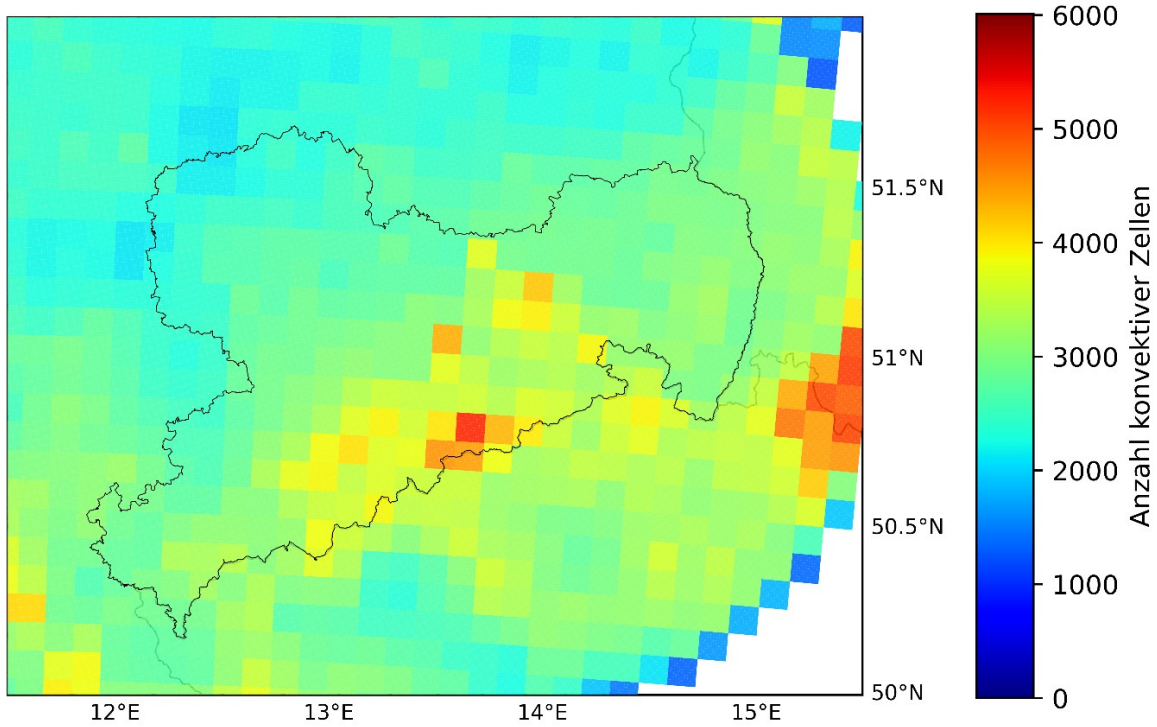


Abbildung 27: Konvektive Zellen mit einer Lebensdauer von 5 Minuten im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 (alle Monate).

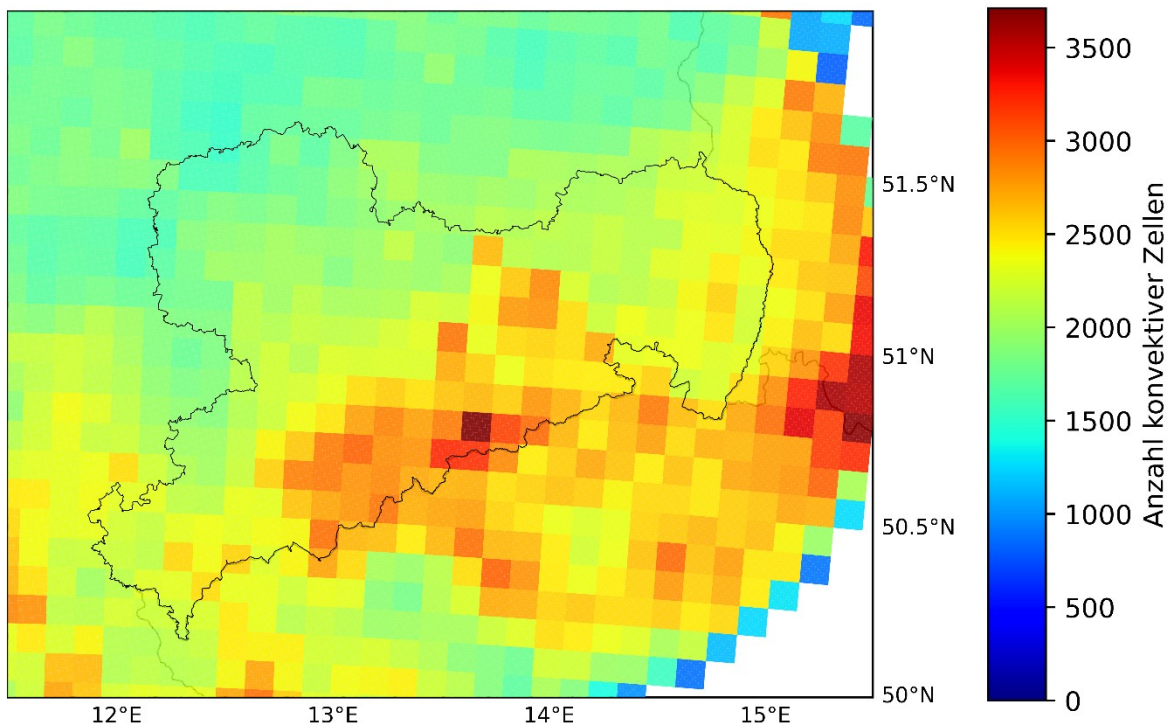


Abbildung 28: Konvektive Zellen mit einer Lebensdauer von 5 Minuten im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 (Sommer).

Es wird in beiden Abbildungen eine Häufung dieser Zellen im Erzgebirge deutlich, da hier durch die topographischen Eigenschaften bevorzugt Zellen entstehen können. Allerdings sind diese Zellen nicht vergleichbar mit den von Brendel et al. (2014) für Thüringen gefundenen Zellen, die bei einer Südwest-Anströmung an den Südflanken des Thüringer Waldes entstehen und mit der Strömung nach Nordosten verfrachtet werden. Hierfür stimmen die Ausrichtung des Erzgebirges und die Anströmrichtung der labilsten Luftmassen nicht überein. Das allerdings der Einfluss des Erzgebirges bei der Entstehung der Zellen einen großen Einfluss hat, wird in Abbildung 28, wo nur die Sommermonate zu sehen sind, deutlich. Hier sind gegenüber der Betrachtung des gesamten Jahres die Unterschiede zwischen dem Mittelgebirge und dem Vorland noch ausgeprägter.

Die tageszeitliche Verteilung dieser Zellen zeigt Abbildung 29.

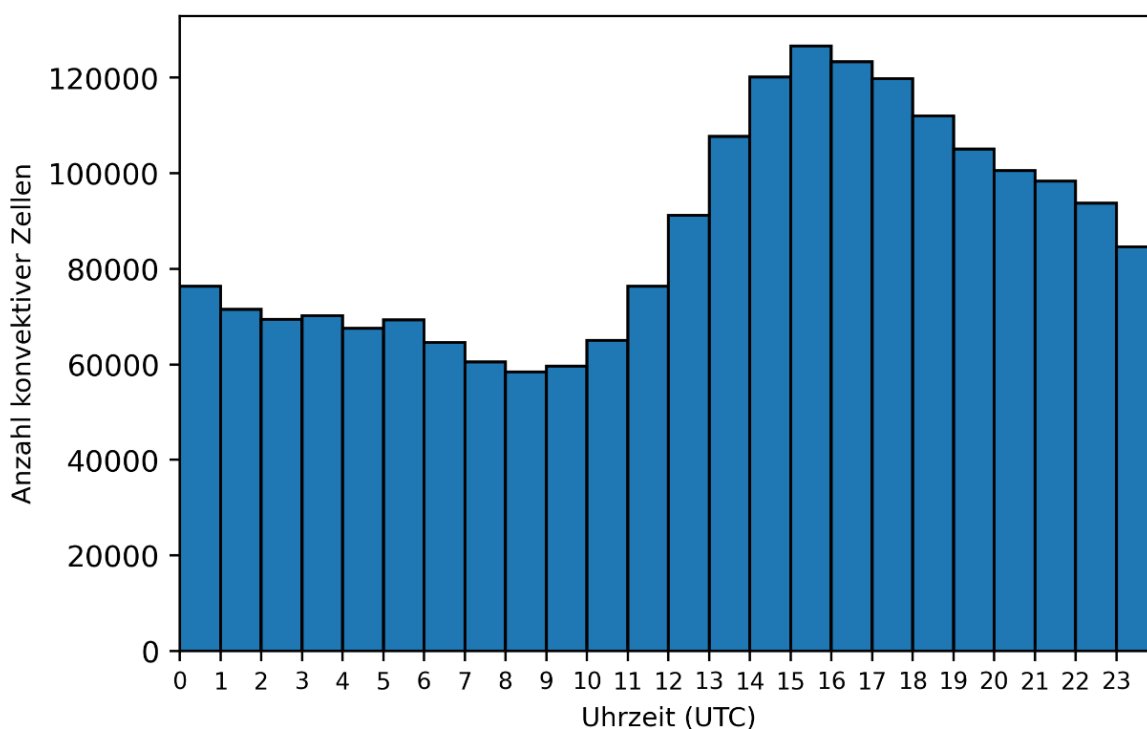


Abbildung 29: Verteilung von Zellen mit Andauer von 5 Minuten über den Tag (alle Monate)

Neben einer recht hohen Anzahl an Zellen, die unabhängig von der Tageszeit auftritt und zum Beispiel durch dynamisch indizierte Konvektion wie bei Kaltfronten bedingt sein kann, zeigt sich ein überlagerter Tagesgang. Dieser Tagesgang folgt zeitverzögert dem Sonnenhöchststand und spiegelt damit die thermisch induzierte Konvektion wieder. Weitere Statistiken sowie Auswerterroutinen sind vorhanden, um entsprechende Informationen auch für Teilgebiete (zum Beispiel auf Basis von Einzugsgebieten) zu generieren. Als Beispiele sind im folgenden Zellstatistiken für das Weißeritzgebiet aufgeführt. Abbildung 30 zeigt beispielsweise die Tracklängen der Zellen, welche entweder im Einzugsgebiet entstehen oder dieses überqueren. Ein hoher Anteil von sehr kurzen Tracks spiegelt die im Sommer auftretenden lokalen Zellen wieder.

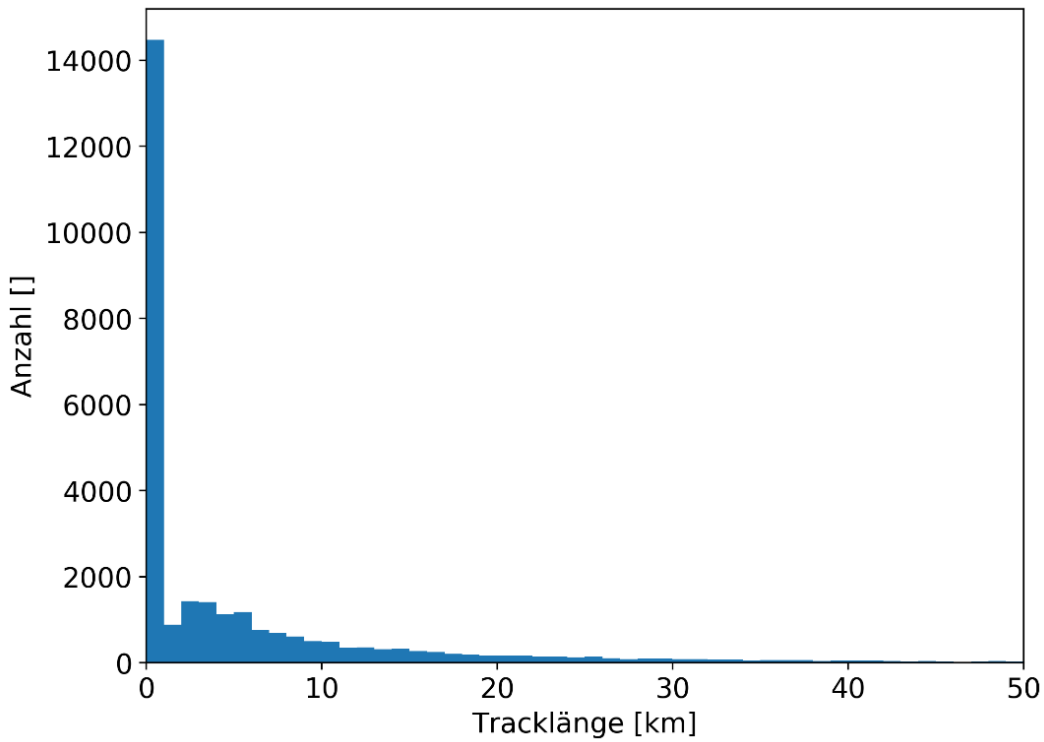


Abbildung 30: Tracklängen (ganze Jahr) für das Weißeritz-Einzugsgebiet

Abbildung 31 zeigt die maximale Größe der Zellen, welche entweder im Einzugsgebiet entstanden sind oder dieses überquert haben. Folglich muss die beobachtete maximale Größe nicht über dem Einzugsgebiet aufgetreten sein.

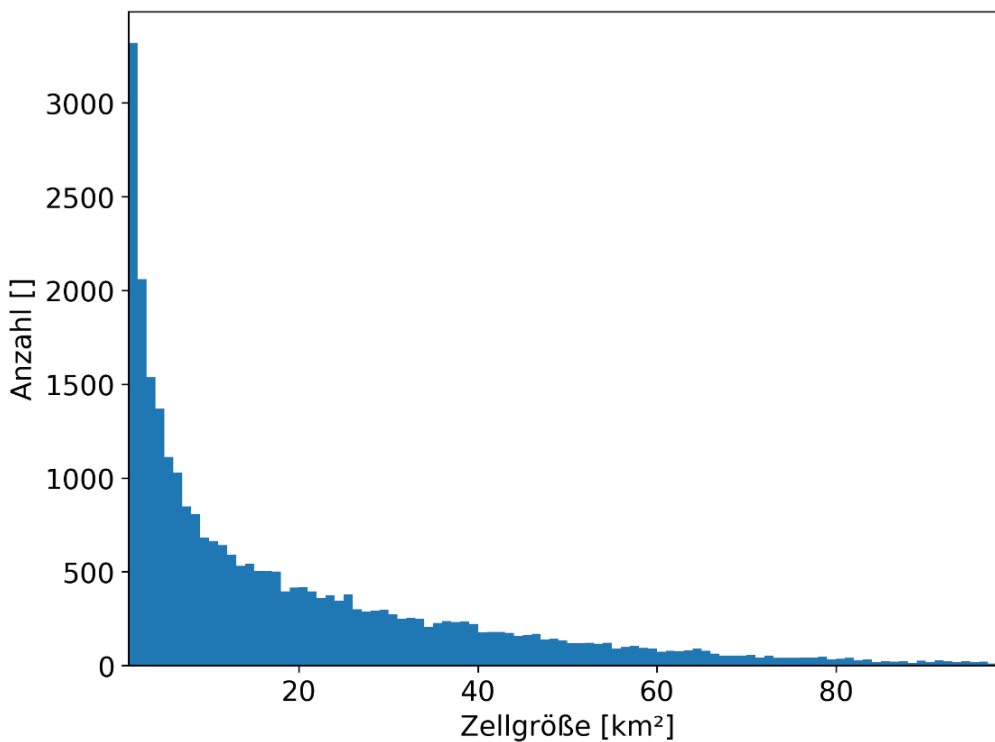


Abbildung 31: Maximale Zellgrößen der für das Weißeritzgebiet relevanten Zellen (ganze Jahr)

Abbildung 32 zeigt die Bewegungsrichtungen der Zellen. Ausgenommen sind hierbei die ortsfesten Zellen. Die Bewegungsrichtung stimmt hierbei mit der Anströmrichtung der labilsten Luftmassen überein.

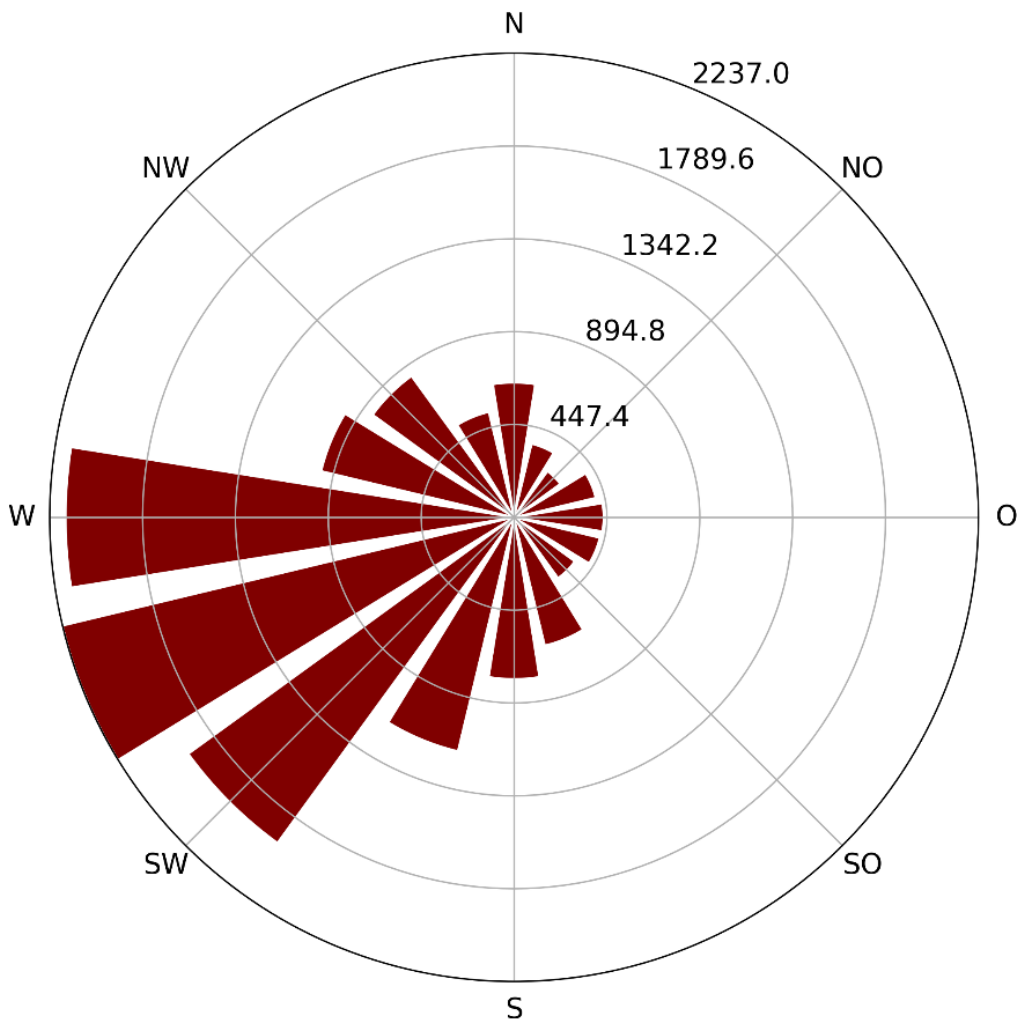


Abbildung 32: Bewegungsrichtung der für das Weißeritzgebiet relevanten Zellen (ganze Jahr)

3.2 Objektive Wetterlagenklassifikation

3.2.1 Rezentes Klima

Die Tage mit konvektiven Zellen im Zeitraum 2001 bis 2016, gegliedert nach den entsprechenden Wetterlagenklassen zeigt Abbildung 33. Entsprechend der Studie für Thüringen (Brendel et al., 2014) treten die meisten Tage mit konvektiven Zellen bei südwestlicher Anströmrichtung mit zyklonaler oder antizykloner Strömung im 950 hPa-Niveau und antizyklonaler Strömung im 500 hPa-Niveau sowie überdurchschnittlicher Feuchte auf (Abbildung 33).

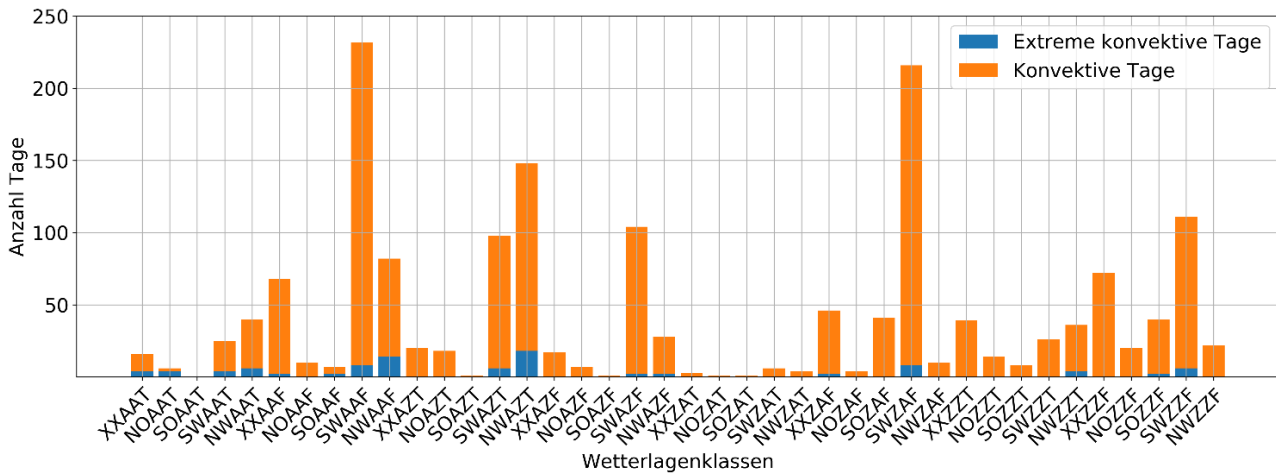


Abbildung 33: Anzahl der konvektiven und extremen konvektiven Tage in den einzelnen Wetterlagenklassen für den Zeitraum 2001 bis 2016 (Sommer)

Es zeigt sich, dass die Verteilung der extremen konvektiven Tage nicht mit der Verteilung der konvektiven Tage skaliert. Hier treten sogar Maxima bei Nordwestlichen Anströmrichtungen auf.

3.2.2 Zukünftiges Klima

Die Veränderung des Auftretens der einzelnen Wetterlagen in den Bezugszeiträumen 2011 bis 2040, 2041 bis 2071 sowie 2071 bis 2100 zeigen die Abbildungen Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36.

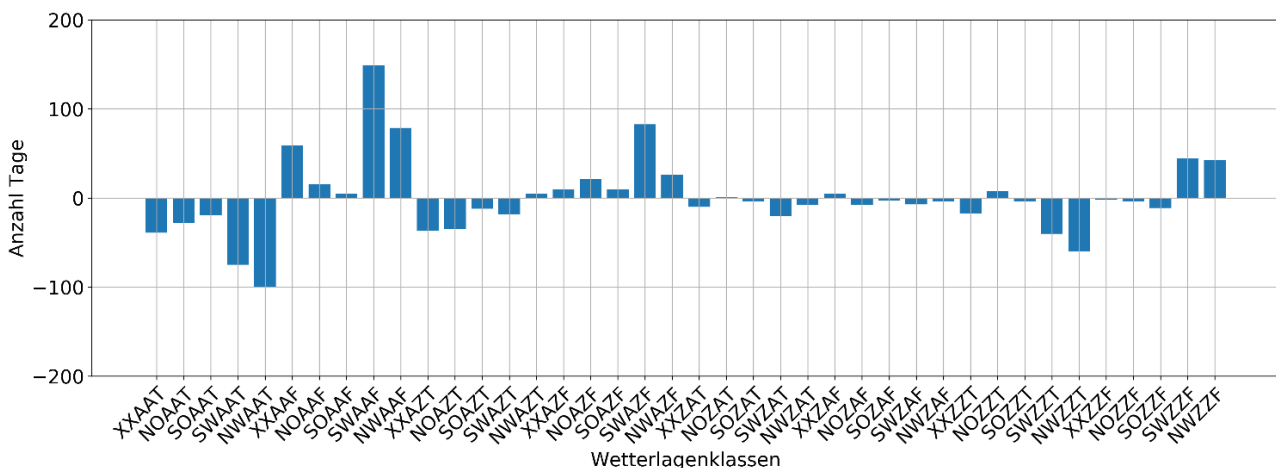


Abbildung 34: Veränderung des Auftretens der Wetterlagen im Zeitraum 2011 bis 2040 (Sommer) bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010

Es ergibt sich dabei kein klares Bild: teilweise nehmen die für konvektive Tage verantwortlichen Wetterlagen zu (z.B. SWAAF: Südwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht, NWAAF: Nordwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht, SWAZF: Südwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa zyklonal, feucht), teilweise nehmen sie aber auch ab (z.B. SWZAF: Südwest-Anströmung, 950 hPa zyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht). Ähnlich verhält es sich mit den für extreme konvektive Tage verantwortlichen Wetterlagen. Diese Analyse betrachtet jedoch nicht die Möglichkeit, dass sich die Relevanz der Wetterlagen für die Konvektion, auch durch die mögliche Veränderung der Ausprägung, ändern könnte.

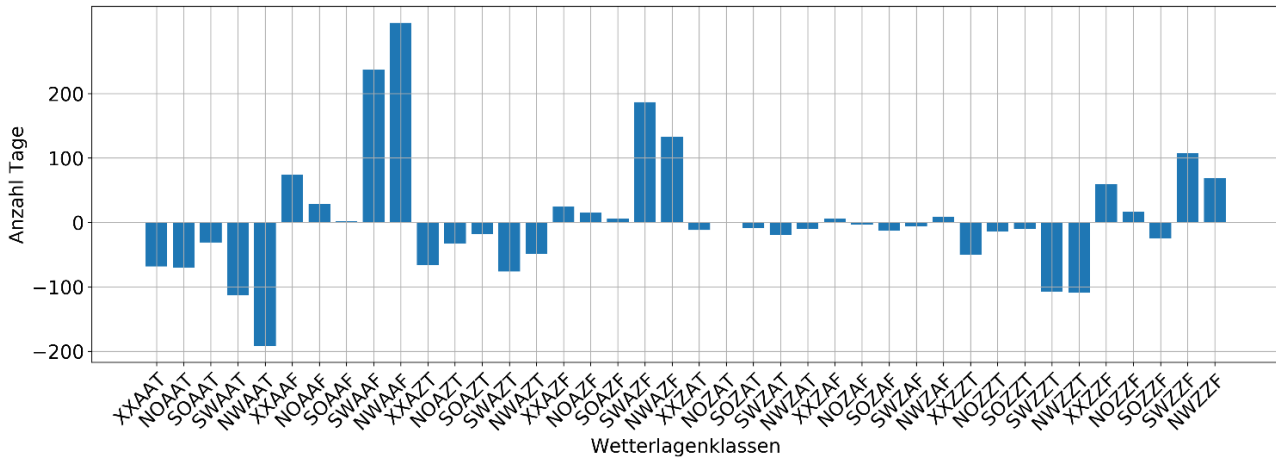


Abbildung 35: Veränderung des Auftretens der Wetterlagen im Zeitraum 2041 bis 2070 (Sommer) bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010

In den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100 kommt es zu einer Intensivierung der für den Zeitraum 2011 bis 2040 festgestellten Veränderung. Auffällig ist dabei, dass ab dem Zeitraum 2041 bis 2070 die Veränderung der Wetterlage NWAAF (Nordwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) gegenüber der Veränderung der Wetterlage SWAAF (Südwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) überwiegt. Die Wetterlage NWAAF (Nordwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) hat sich im rezenten Zeitraum als eine Wetterlage mit sehr hohem Potential für extreme konvektive Tage gezeigt (Abbildung 33).

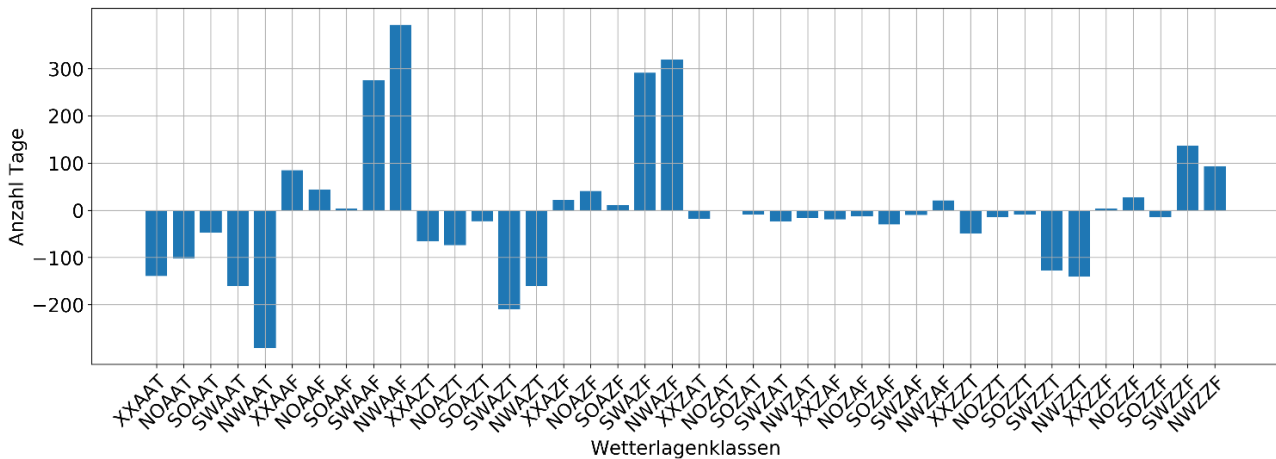


Abbildung 36: Veränderung des Auftretens der Wetterlagen im Zeitraum 2071 bis 2100 (Sommer) bezogen auf den Zeitraum 1981 bis 2010

3.3 Konvektionspotentiale

3.3.1 Rezent es Klima

Das für das rezente Klima ermittelte Allgemeine Konvektionspotential wurde basierend auf einem Niederschlagsschwellwert von 20 mm/h für alle Zellen in den Monaten April bis September 2001 bis 2016 ermittelt. Zur räumlichen Aggregation wurde ein 10 km-Gitter verwendet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 37.

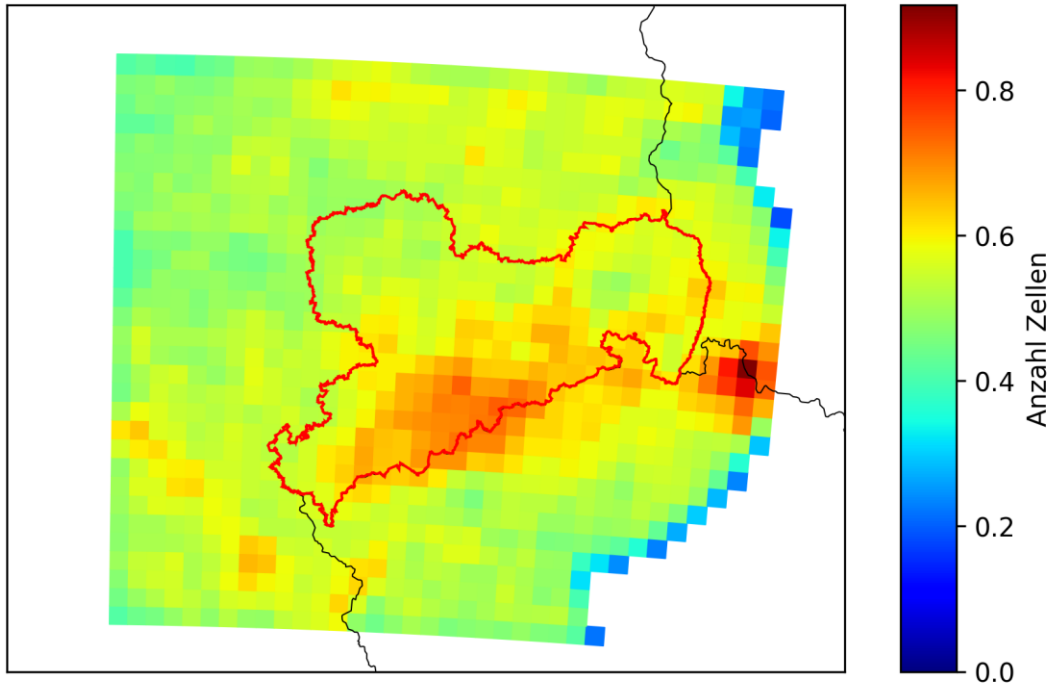


Abbildung 37: Allgemeines Konvektionspotential für Zellen > 20 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 2001 bis 2016

Generell muss angemerkt werden, dass sich ein erhöhtes Allgemeines Konvektionspotential aus ortsfesten Zellen (wie sie z.B. bevorzugt über Mittelgebirgen entstehen) und mit der Grundströmung advehierten Zellen zusammensetzen kann.

Es zeigt sich ein erhöhtes Allgemeines Konvektionspotential im Erzgebirge. Interessant ist das lokale Minimum im Bereich des Zittauer Beckens, welches eventuell durch Windschatteneffekte zustande kommt. Die Bereiche mit sehr wenig Zellen (blau) am östlichen Rand kommen durch die fehlende Radarabdeckung zu Stande und sollten als Samplingeffekte interpretiert werden.

Das mit den gleichen Bedingungen ermittelte Starkniederschlagspotential für das rezente Klima (Abbildung 38) zeigt hingegen keine erhöhten Werte im Bereich des Erzgebirges. Da es sich hierbei um eine gemittelte Niederschlagsintensität handelt, kann daraus gefolgert werden, dass sich die Intensität der Zellen über dem Bergland statistisch nicht von denen des Flachlandes unterscheidet.

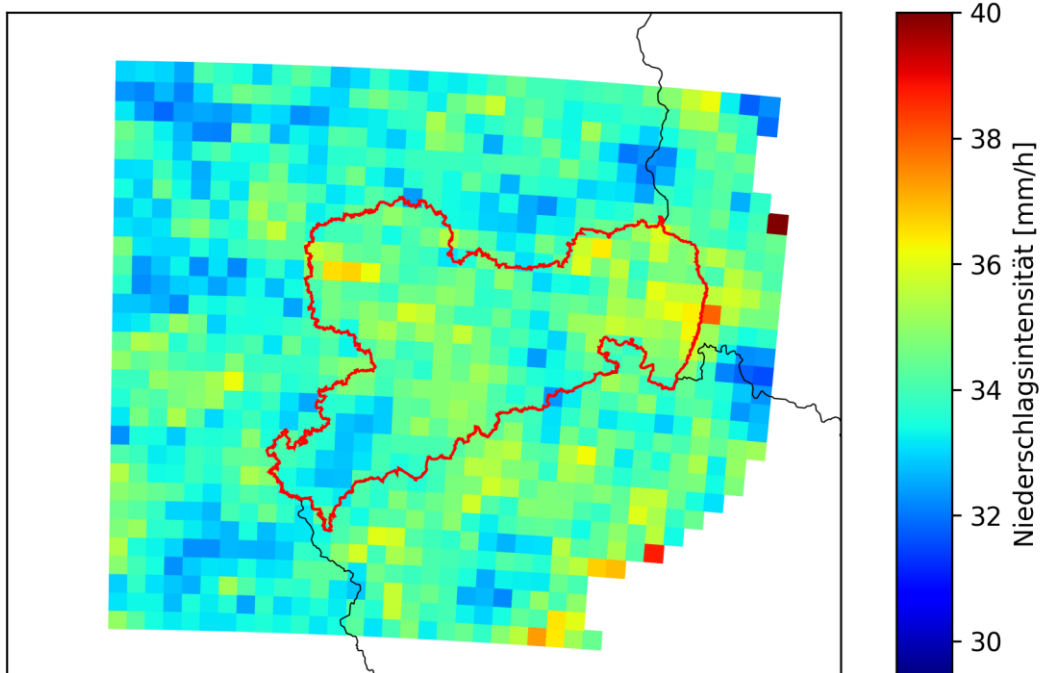


Abbildung 38: Starkniederschlagspotential für Zellen > 20 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 2001 bis 2016

Das Sturzflutpotential (Abbildung 39) zeigt leicht erhöhte Werte für die Erzgebirgsregion. Zusammen mit den Ergebnissen des Starkniederschlagspotentials kann darauf geschlossen werden, dass sich der erhöhte Wert durch langsamer ziehende bis nahezu ortsfeste Zellen ergibt. Es sei erneut darauf hingewiesen, dass ortsfeste Zellen nicht zur Berechnung des Sturzflutpotentials beitragen.

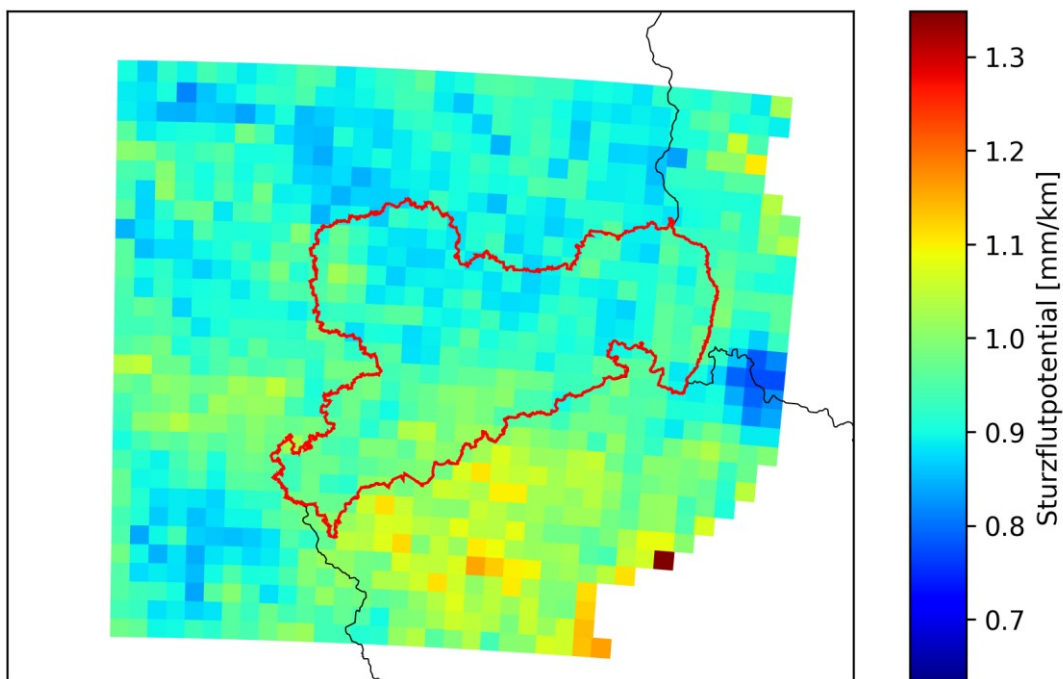


Abbildung 39: Sturzflutpotential für Zellen > 20 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 2001 bis 2016

3.3.2 Zukünftiges Klima

Auf die biaskorrigierten Simulationsergebnisse mit dem Regionalmodell wurde der Zellidentifizierungs- und -tracking-Algorithmus angewendet. Aus den Zelltracks wurden für 4 Zeitscheiben (1981 bis 2010, 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 und 2071 bis 2100) die Gefährdungspotentiale ermittelt. Abbildung 40 zeigt das Allgemeine Konvektionspotential für den Zeitraum 1981 bis 2010.

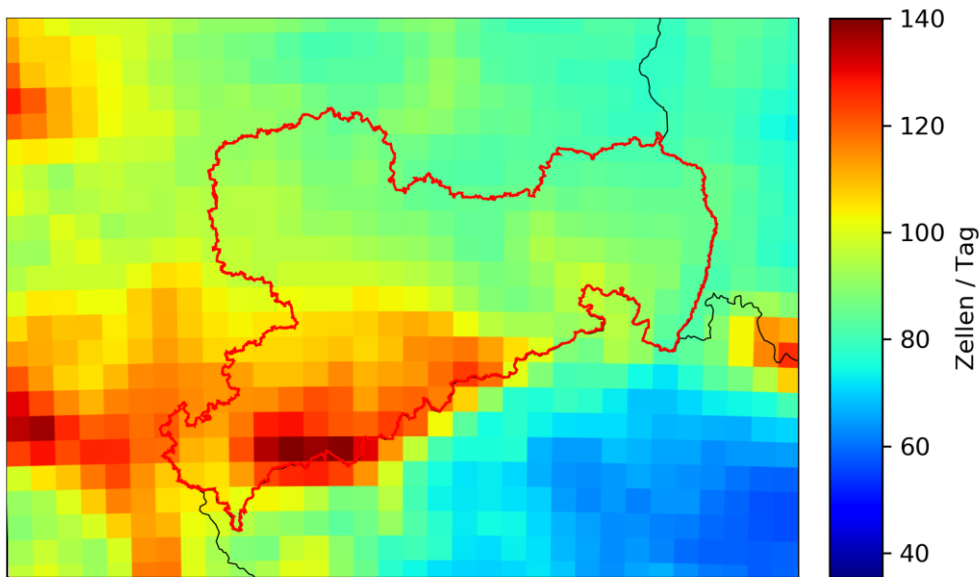


Abbildung 40: Allgemeines Konvektionspotential [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Es zeigen sich die gleichen Gebiete der Maxima wie in den Radardaten insbesondere im westlichen und mittleren Erzgebirge. Abbildung 41 zeigt die Differenzen zwischen den Zeitraum 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010.

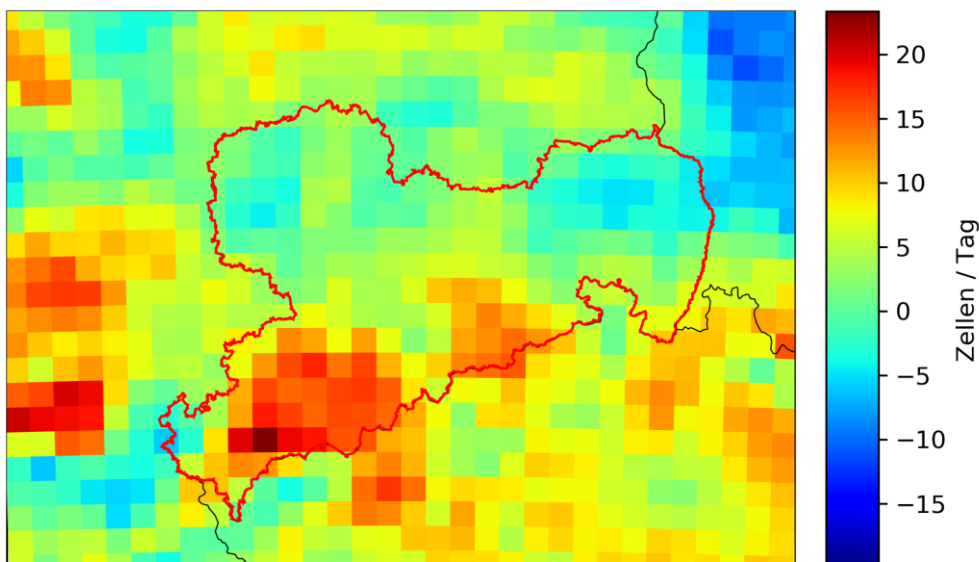


Abbildung 41: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Es sind deutliche Zunahmen im Erzgebirge zu verzeichnen. Es zeigt sich, dass obwohl es in diesem Zeitraum nicht zu einer Zunahme an extremen konvektiven Tagen gegenüber dem Zeitraum 1981 bis 2010 kommt (Abbildung 22), die extremen konvektiven Tage zumindest im Erzgebirge, zum Teil aber auch im Vorland extremer werden. Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die Differenzen des Allgemeinen Konvektionspotentials für die Zeiträume 2041 bis 2070 bzw. 2071 bis 2100 zum Zeitraum 1981 bis 2010.

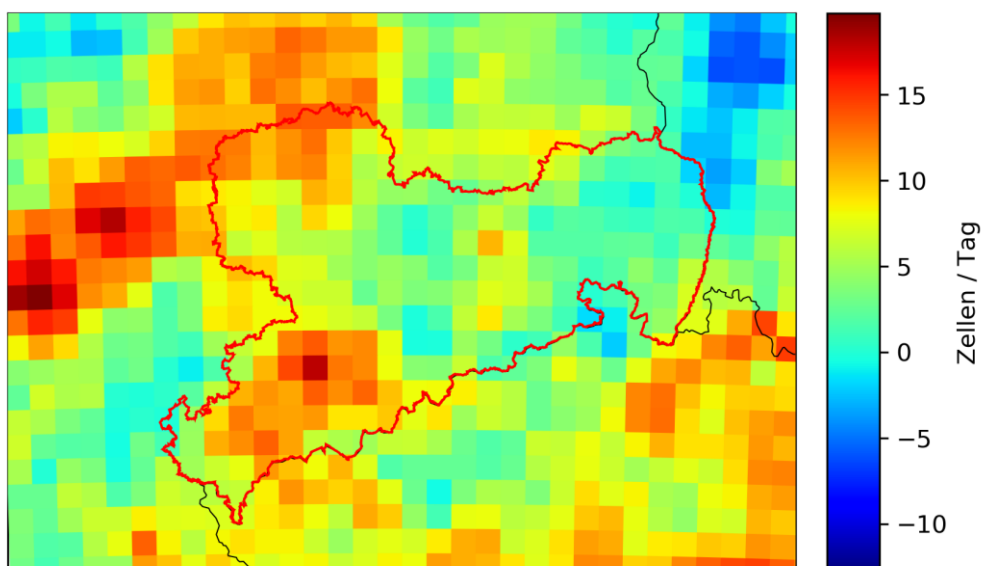


Abbildung 42: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

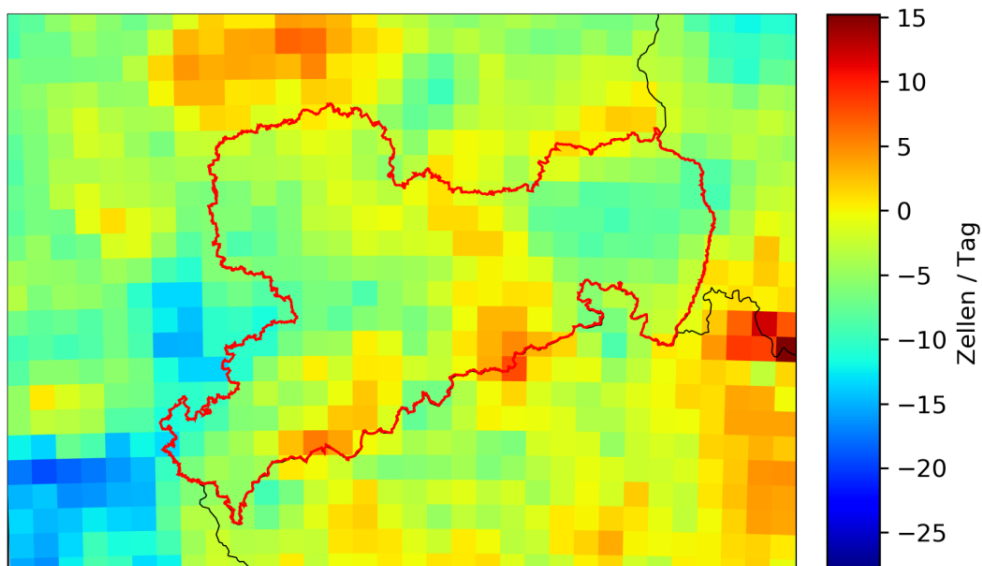


Abbildung 43: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials [Anzahl Zellen / Tag] für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Die Zunahme ist deutlich geringer als für den Zeitraum 2011 bis 2040. Allerdings nimmt die Anzahl der potentiell extremen konvektiven Tage in diesen Zeiträumen deutlich zu (Abbildung 22), so dass auch hier mit einer verstärkten Gefährdung zu rechnen ist.

Das Starkniederschlagspotential für Zellen > 20 mm/h für den Zeitraum 1981 bis 2010 aus den WRF-Simulationen ist in Abbildung 44 dargestellt.

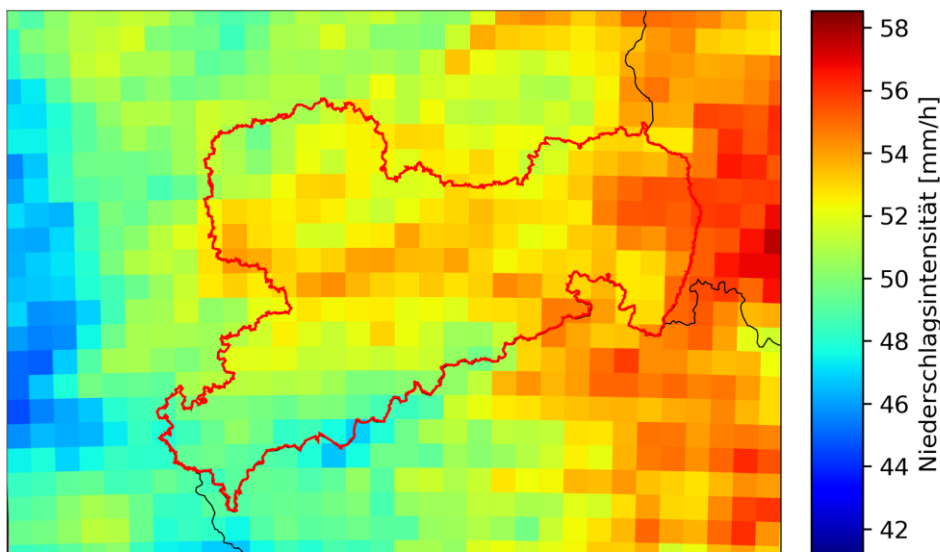


Abbildung 44: Starkniederschlagspotential für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September für den Zeitraum 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Auch hier zeigt sich wie in den Radardaten kein erhöhtes, sondern eher sogar ein reduziertes Starkniederschlagspotential im Erzgebirge.

Die Abbildungen Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die projizierten Veränderungen des Starkniederschlagspotentials für die Zeiträume 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 sowie 2071 bis 2100 gegenüber dem Zeitraum 1981 bis 2010.

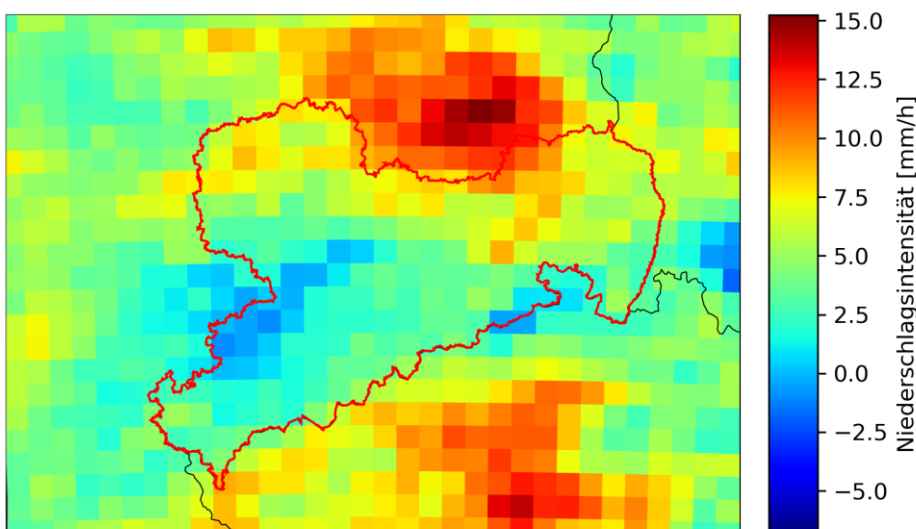


Abbildung 45: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

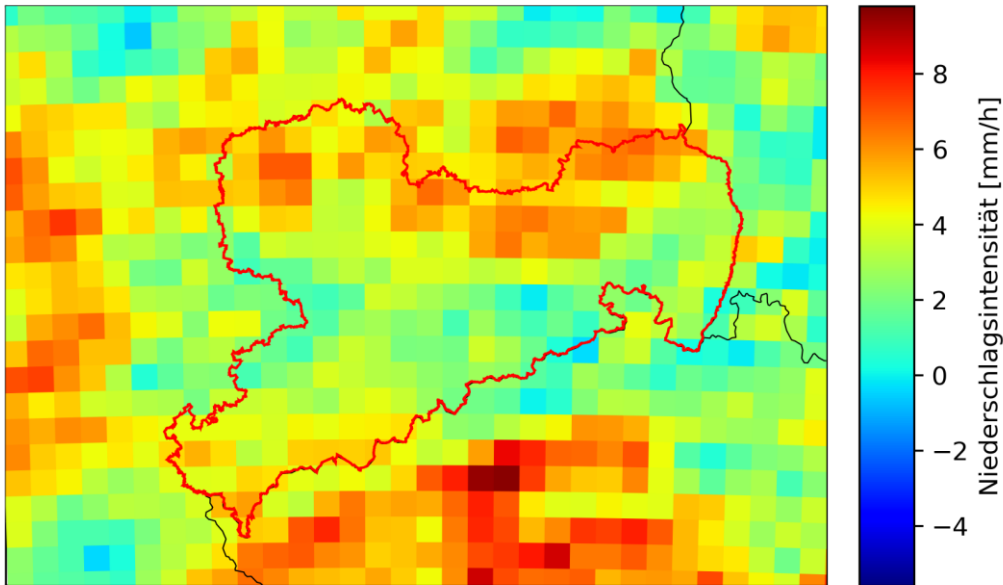


Abbildung 46: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

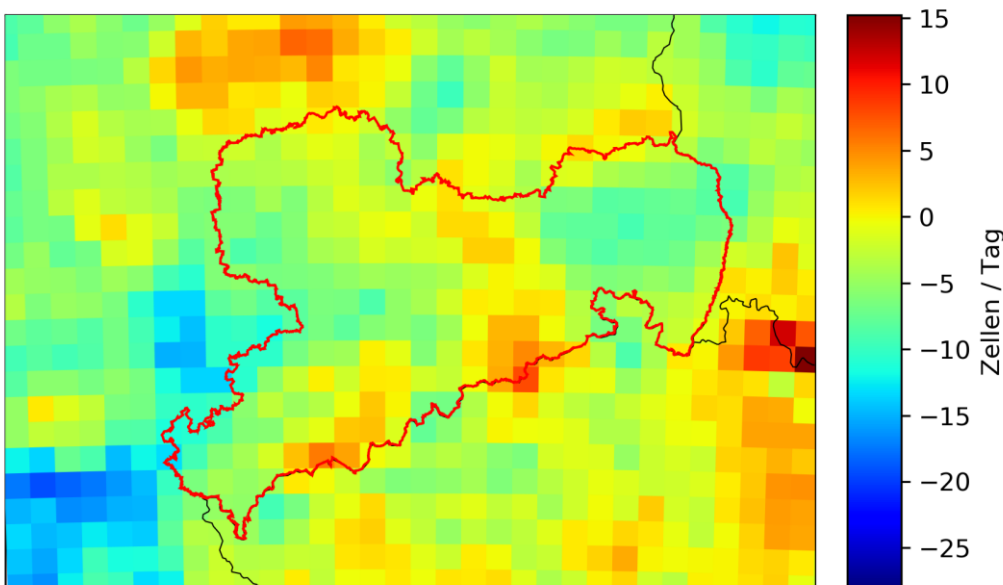


Abbildung 47: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Generell zeigt sich eine Erhöhung des projizierten Starkniederschlagspotentials. Während diese für den Zeitraum 2011 bis 2041 eher gering ausfällt nimmt sie in den späteren Zeiträumen zu. Zudem ist für den Zeitraum 2071 bis 2100 das Maximum der Zunahme im Erzgebirge zu finden. Auch hier gilt zu beachten, dass die Erhöhung des Starkniederschlagspotentials mit einer Zunahme der extremen konvektiven Tage (Abbildung 22) einhergeht.

Das Sturzflutpotential für Zellen > 20 mm/h auf 10 x 10 km aggregiert für den Zeitraum 1981 bis 2010 simuliert mit WRF zeigt Abbildung 48.

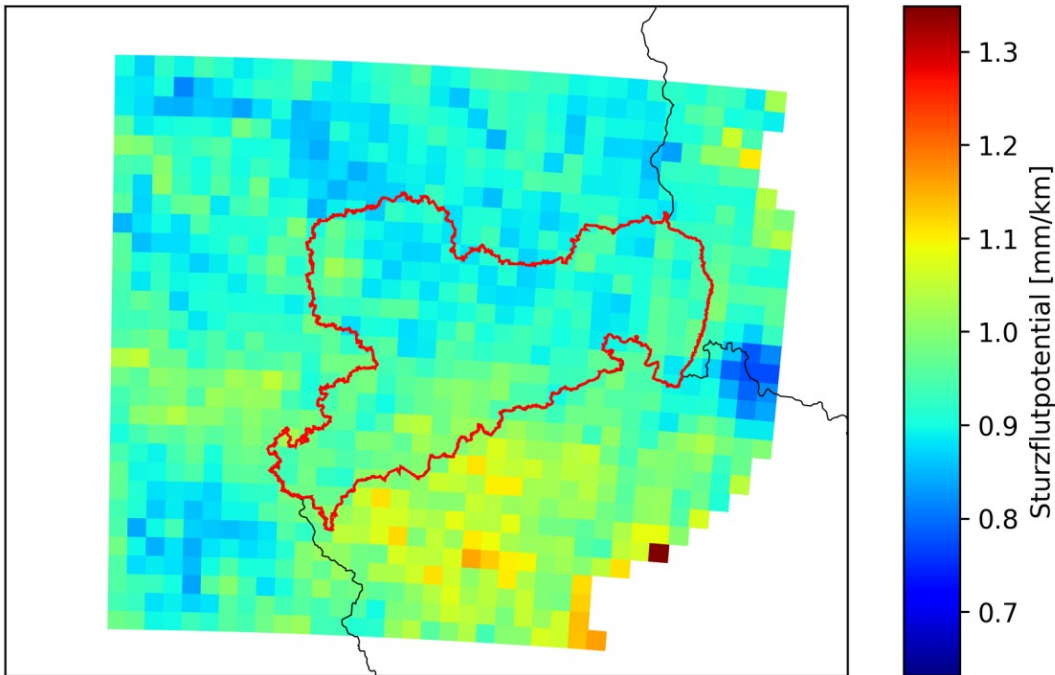


Abbildung 48: Sturzflutpotential für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September für den Zeitraum 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Entsprechend dem Sturzflutpotential aus den Radardaten (Abbildung 39) zeigt sich ein leicht erhöhtes Potential im Erzgebirge. Die Veränderungen in den Zeiträumen 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 sowie 2071 bis 2100 gegenüber 1981 bis 2010 zeigen die Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51.

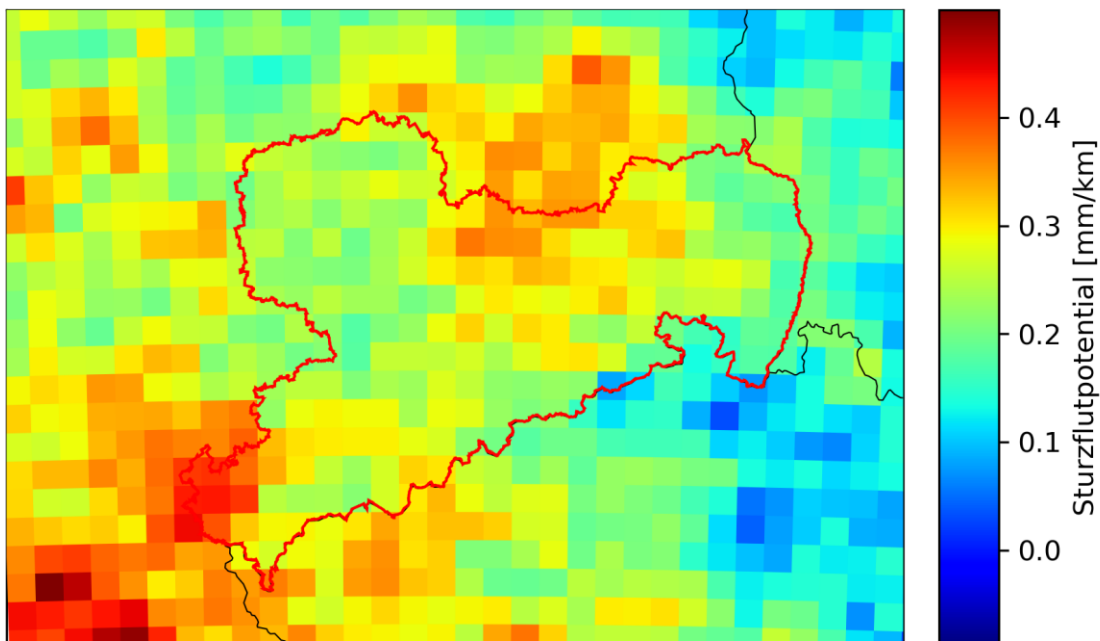


Abbildung 49: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

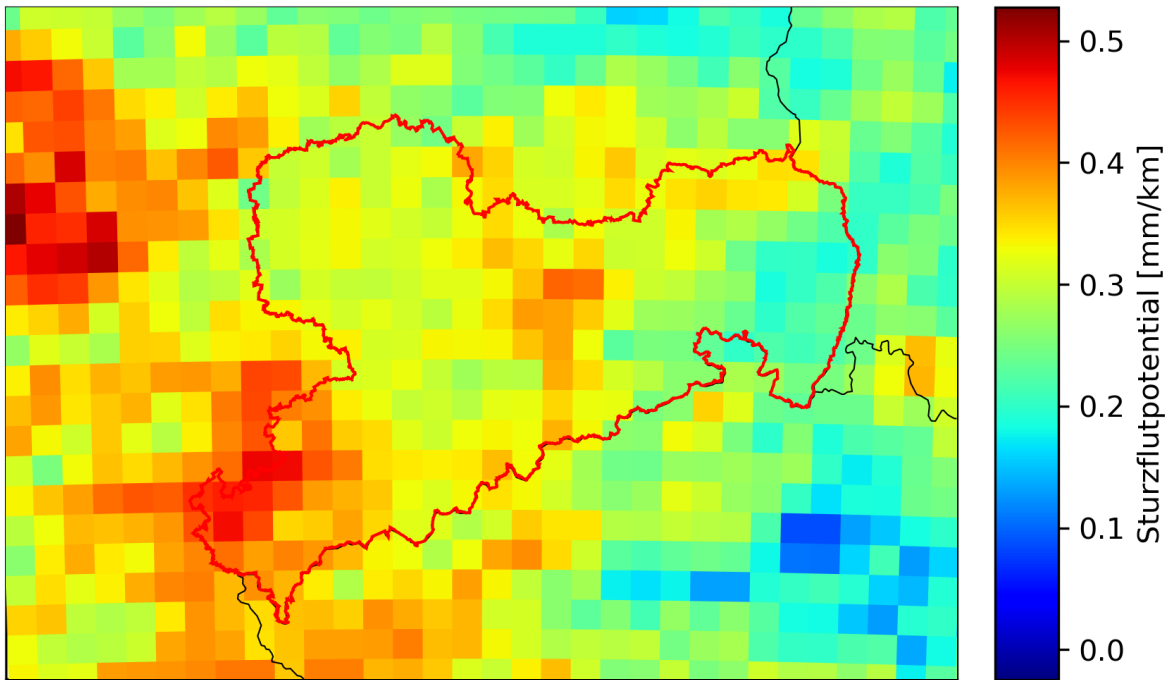


Abbildung 50: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

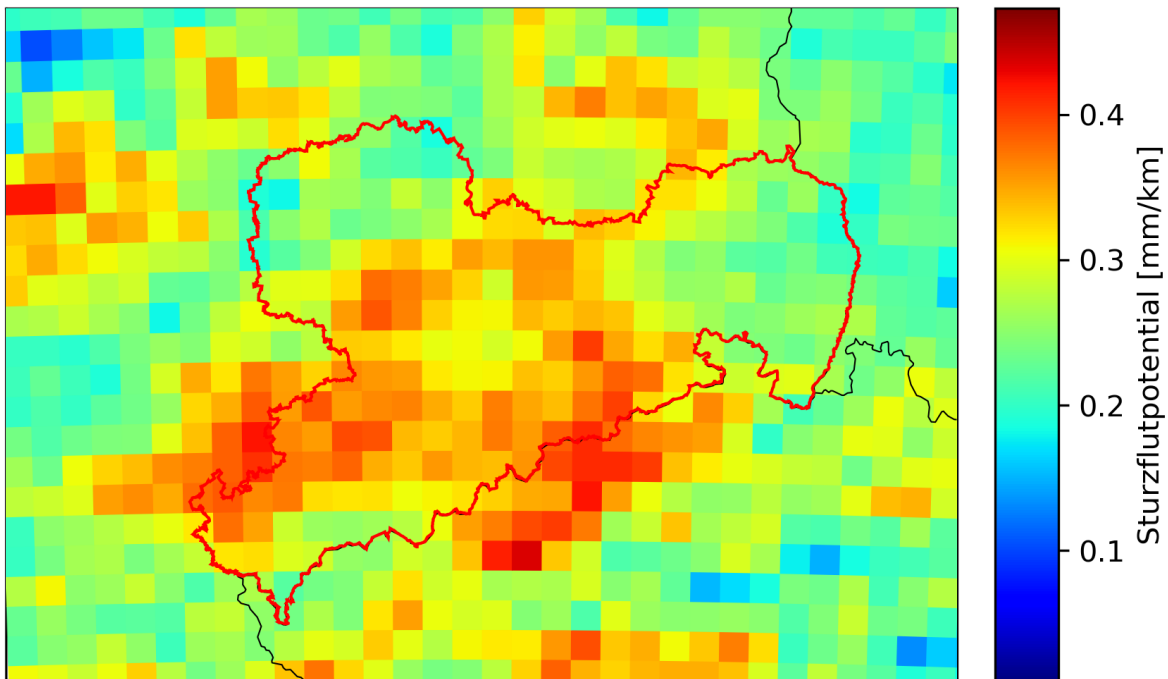


Abbildung 51: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 20 mm/h in den Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

In allen Teilen Sachsens kommt es zu einer Zunahme des Sturzflutpotentials. Dabei variieren die Schwerpunkte der Zunahme von Zeitraum zu Zeitraum. Hierbei kann beispielsweise für das Erzgebirge kein stärkerer Anstieg als für die restlichen Teile Sachsens identifiziert werden. Dennoch muss auch hier das zunehmende Potential im Zusammenhang mit dem vermehrten Auftreten potentiell extremer konvektiver Tage im zweiten Teil des Jahrhunderts betrachtet werden.

In Anhang 3 sind Analysen der Gefährdungspotentiale für Zellen > 10 mm/h sowie Zellen > 15 mm/h zu finden. Die Ergebnisse unterscheiden sich jedoch nicht wesentlich zu denen für Zellen > 20 mm/h.

3.4 Hagelanalysen

3.4.1 Rezentenes Klima

Die Hagelklimatologie des Deutschen Wetterdienstes (Abbildung 52) zeigt für den Zeitraum 2001 bis 2016 für die Monate April bis September Werte zwischen 0.5 und 2 Hageltagen pro Jahr. Eine verstärkte Hagelaktivität findet sich insbesondere im Erzgebirge und hier im Bereich des Fichtelbergs.

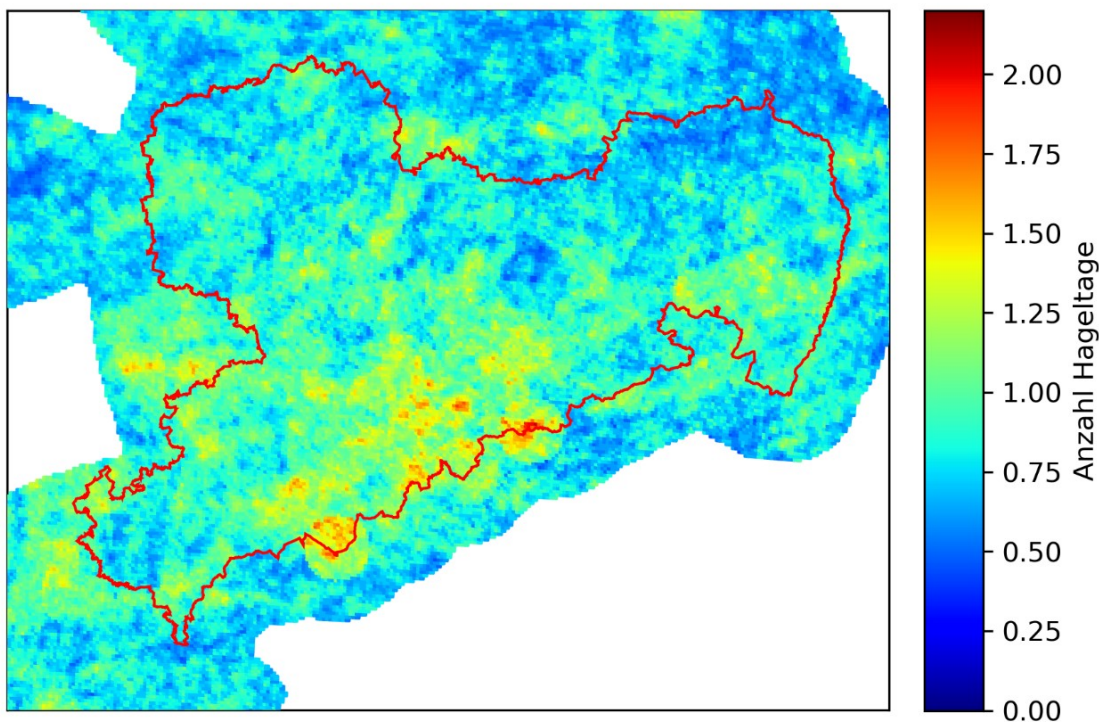


Abbildung 52: Hageltage pro Jahr für den Zeitraum 2001 bis 2016 (Sommer) aus Radardaten

Abbildung 53 zeigt das Auftreten von Hagel im Untersuchungsgebiet, ermittelt aus den Radardaten für die extremen konvektiven Tage. Es zeigt sich, dass an jedem extremen konvektiven Tag im Untersuchungszeitraum 2001 bis 2016 irgendwo im Untersuchungsgebiet Hagel aufgetreten ist. Damit wird deutlich, dass sich die per logistischer Regression ermittelten extremen konvektiven Tage auch zur Ermittlung des Hagelpotentials eignen sollten.

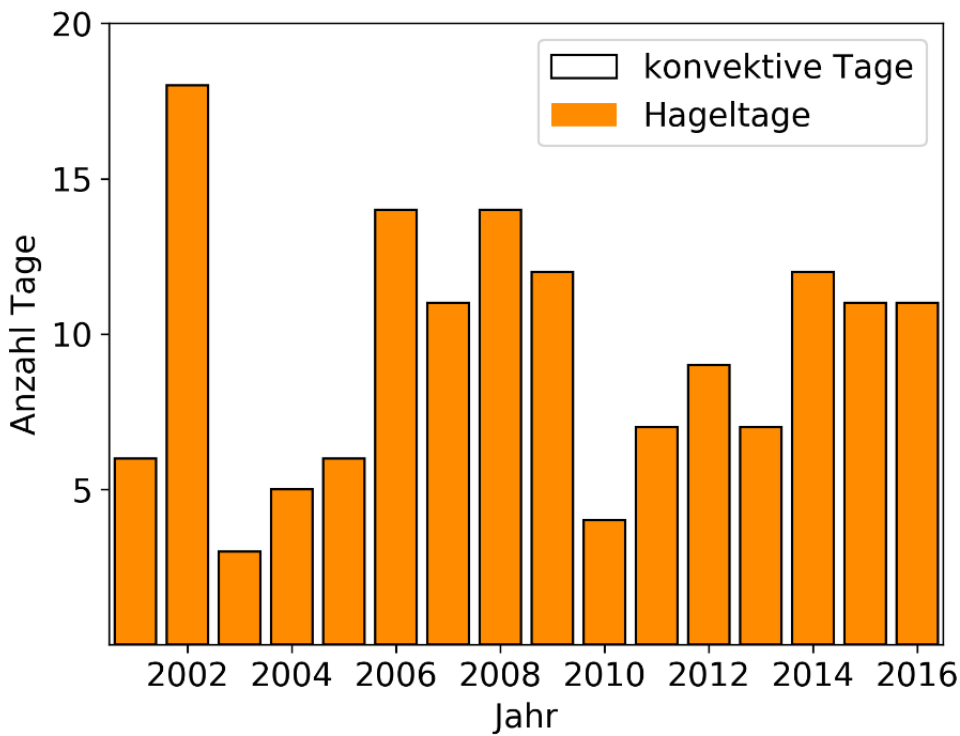


Abbildung 53: Konvektive Tage mit Hagel für den Zeitraum 2001 bis 2016 (Sommer) aus Radardaten

Die Hagelaufzeichnungen des Weinguts Schloss Wackerbarth beinhalten Ereignisse an 7 verschiedenen Tagen, die entsprechend der betroffenen Flurstücke aufgeschlüsselt sind. Von den 42 dokumentierten Hagelfällen werden von der radarbasierten Klimatologie 16 auch als solche erkannt (siehe Anlage 2).

3.4.2 Wetterlagen Hagel

Die Wetterlagenanalyse zeigt ein verstärktes Auftreten von Hagel bei SW-Anströmung mit feuchter Charakteristik (Abbildung 54). Dies deckt sich mit den Wetterlagen, die zu einem vermehrten Auftreten von Zellen hochreichender Konvektion führen.

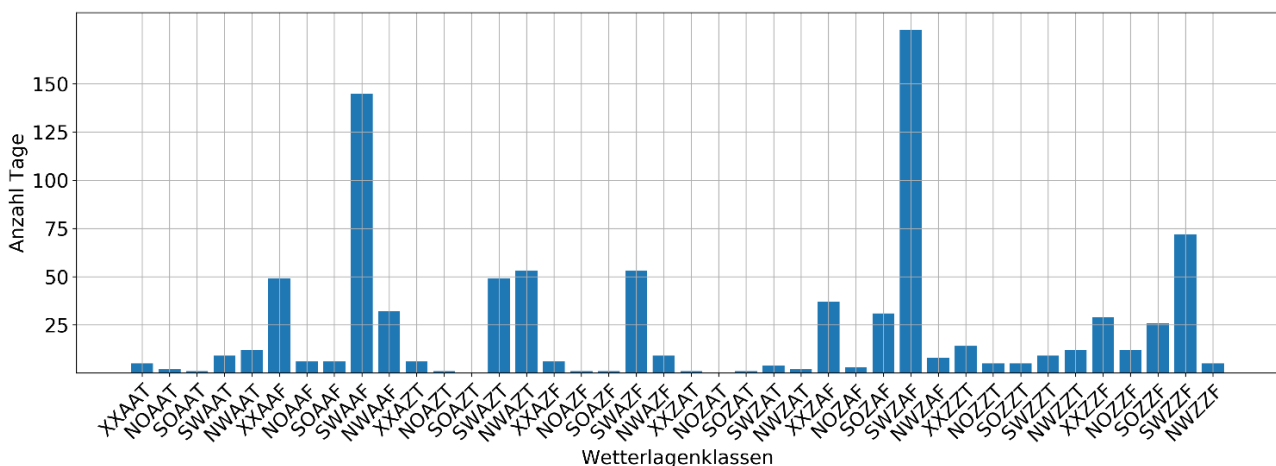


Abbildung 54: Wetterlagen für Hageltage 2001 bis 2016 (Sommer) aus Radardaten

Für die Wetterlage SWZAF (Südwest-Anströmung, 950 hPa zyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) zeigt sich für die ECHAM6-Projektionen eher eine leichte Abnahme der Auftretenswahrscheinlichkeit (Abbildungen Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36). Für die Wetterlage SWAAF (Südwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) zeigt sich allerdings eine sehr deutliche Zunahme in der projizierten Zukunft. Damit ist insgesamt mit einer Verschärfung der Gefährdung durch Hagel in der Zukunft zu rechnen.

3.4.3 Projektionen für die Zukunft

Die projizierte Entwicklung des Hagelpotentials wurde aus den Simulationen für die extremen konvektiven Tage für den Zeitraum 1979 bis 2100 ermittelt. Abbildung 55 zeigt die Anzahl der Tage mit simuliertem Graupel. Es zeigt sich, dass dies nur an wenigen Tagen der Fall ist. Da diese Ergebnisse nicht den Ergebnissen aus Abbildung 53 entsprechen, wurde auf eine weitere Auswertung des simulierten Graupels verzichtet.

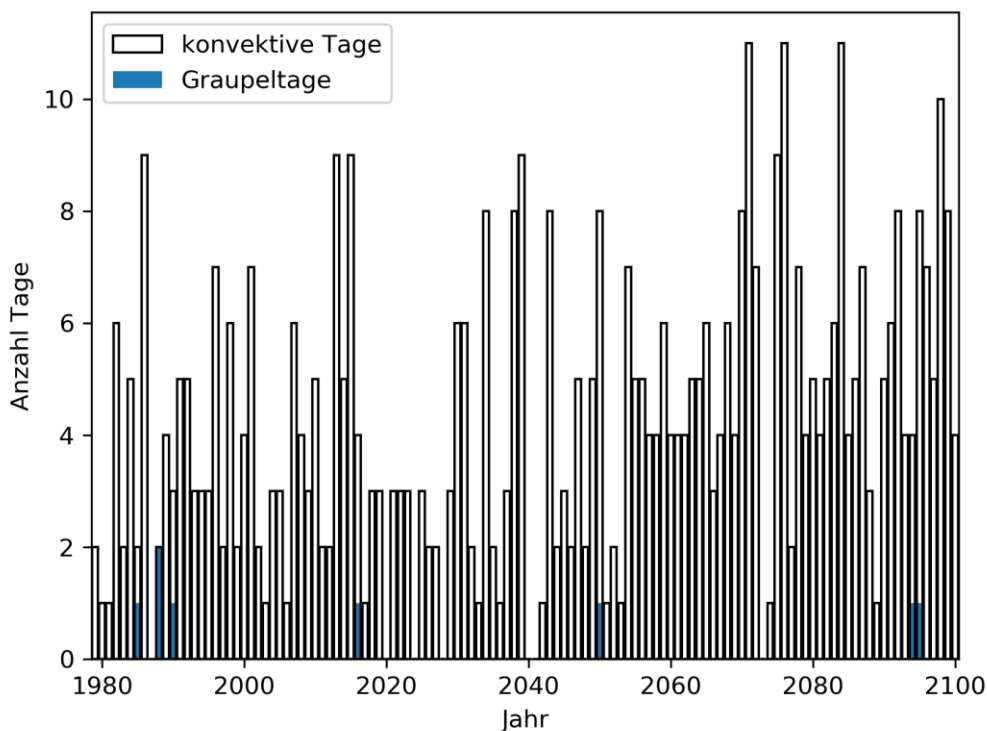


Abbildung 55: Extreme konvektive Tage mit simulierten Graupel 1979 bis 2100 (Sommer)

In der Abbildung 56 sind die extremen konvektiven Tage mit Hagel für den Zeitraum 1979 bis 2100 gezeigt. Dabei wurde der Hagel, wie oben beschrieben aus der simulierten Reflektivität bestimmt.

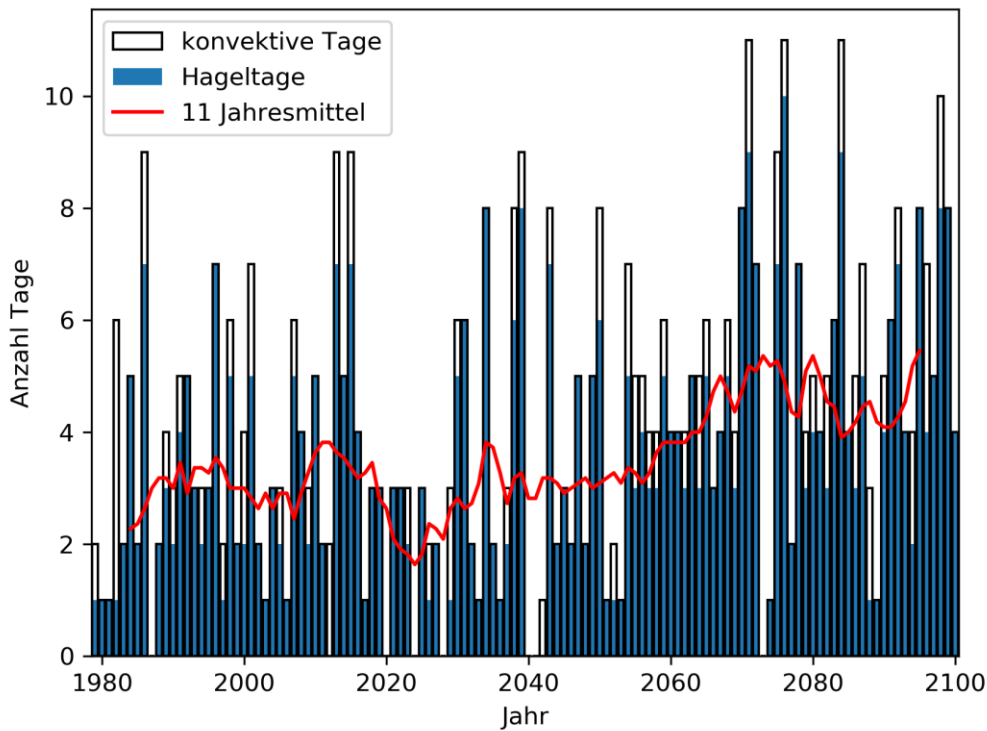


Abbildung 56: Extreme konvektive Tage mit Hagel 1979 bis 2100 (Sommer)

Das hier dargestellte Bild entspricht mehr den aus den Radardaten ermittelten Erkenntnissen, wenngleich auch hier extreme konvektive Tage ohne Hagel auftreten. Zudem zeigt sich ab 2060 ein erhöhtes Niveau hinsichtlich simulierten Hageltage.

Entsprechend zeigen die Abbildungen Abbildung 57, Abbildung 58, Abbildung 59 und Abbildung 60 die simulierten extremen konvektiven Tage mit Hagel für die Zeiträume 1981 bis 2010, 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 sowie 2071 bis 2100. Die Daten sind dabei auf ein 10 x 10 km-Raster aggregiert.

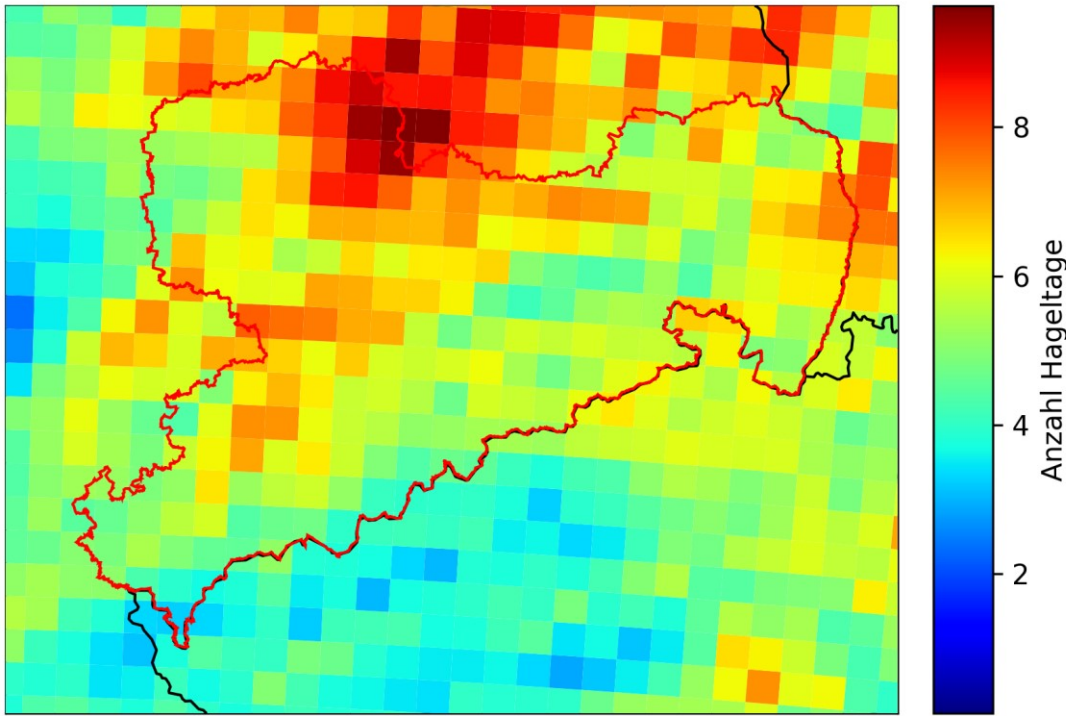


Abbildung 57: Extreme konvektive Tage mit Hagel 1981 bis 2010 (Sommer)

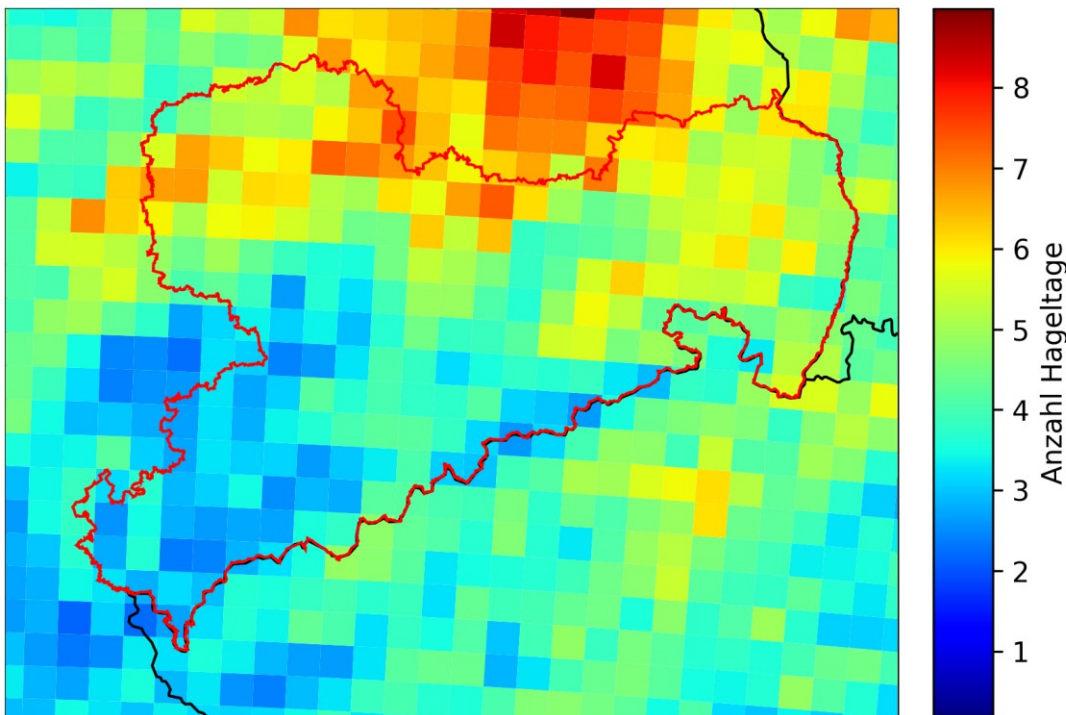


Abbildung 58: Extreme konvektive Tage mit Hagel 2011 bis 2040 (Sommer)

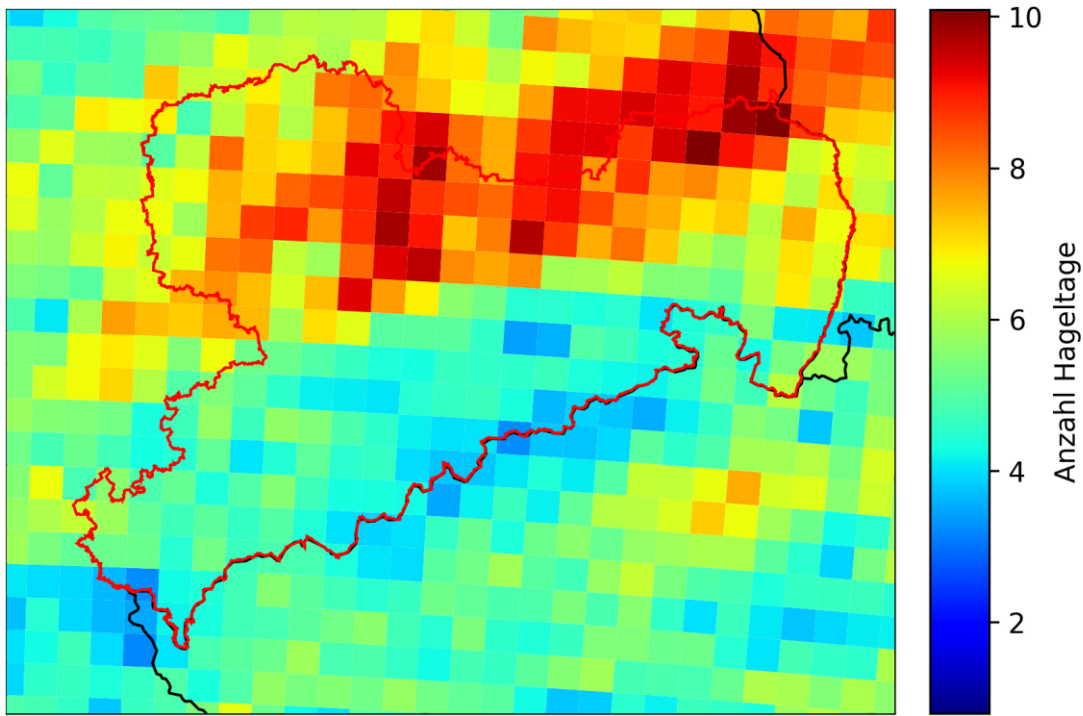


Abbildung 59: Extreme konvektive Tage mit Hagel 2041 bis 2070 (Sommer)

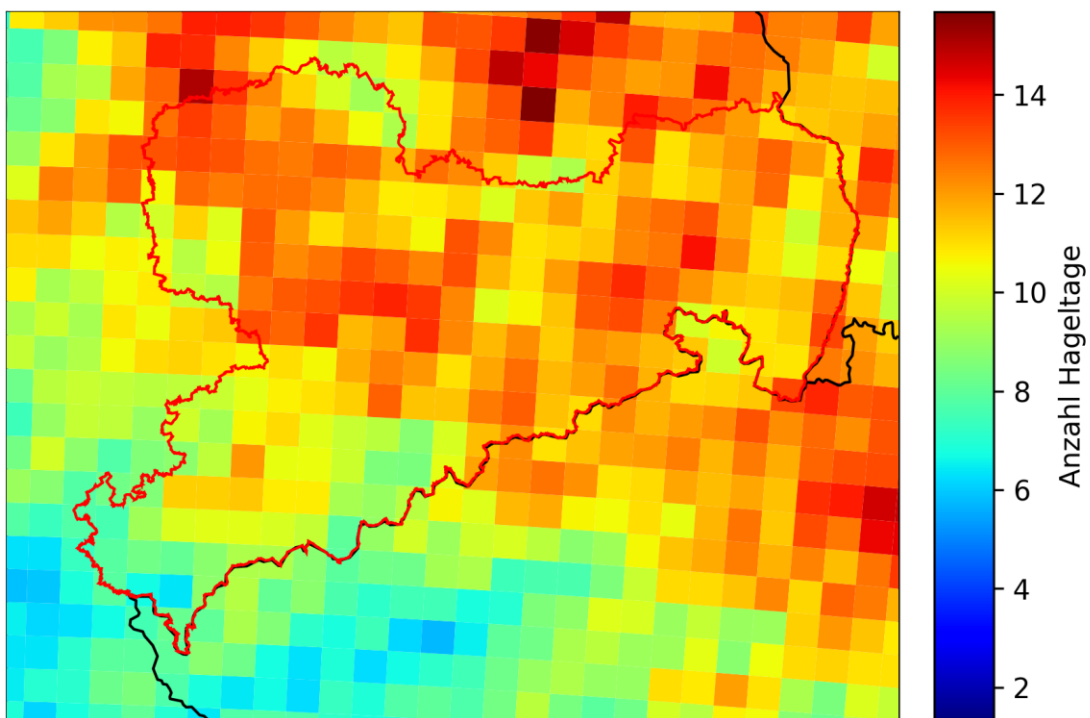


Abbildung 60: Extreme konvektive Tage mit Hagel 2071 bis 2100 (Sommer)

Es wird deutlich, dass für keinen Zeitraum ein vermehrtes Auftreten von Hagel im Erzgebirge, wie es aus den Radardaten ermittelt wurde (Abbildung 52) simuliert wird. Auch zeigt sich keine zeitliche Konsistenz der räumlichen Veränderungen. In den Zeiträumen 1981 bis 2010, 2011 bis 2040 und 2041 bis 2070 zeigen sich deutlich mehr Hageltage in der nördlichen Hälfte des Untersuchungszeitraums, während im Zeitraum 2071 bis 2100 eine solche Zweiteilung nicht zu erkennen ist. Lediglich im Zeitraum 2071 bis 2100 spiegelt sich die erhöhte Anzahl an potentiell extrem konvektiven Tagen auch in der Anzahl der Hageltage wieder.

3.5 Blitzanalysen

3.5.1 Rezentenes Klima

Die Anzahl an Blitzen pro Jahr aus den Siemens-Blitzdaten für den Zeitraum 1999 bis 2012 (Sommer) zeigt Abbildung 61. Die Daten sind auf ein 5 x 5 km Raster aggregiert.

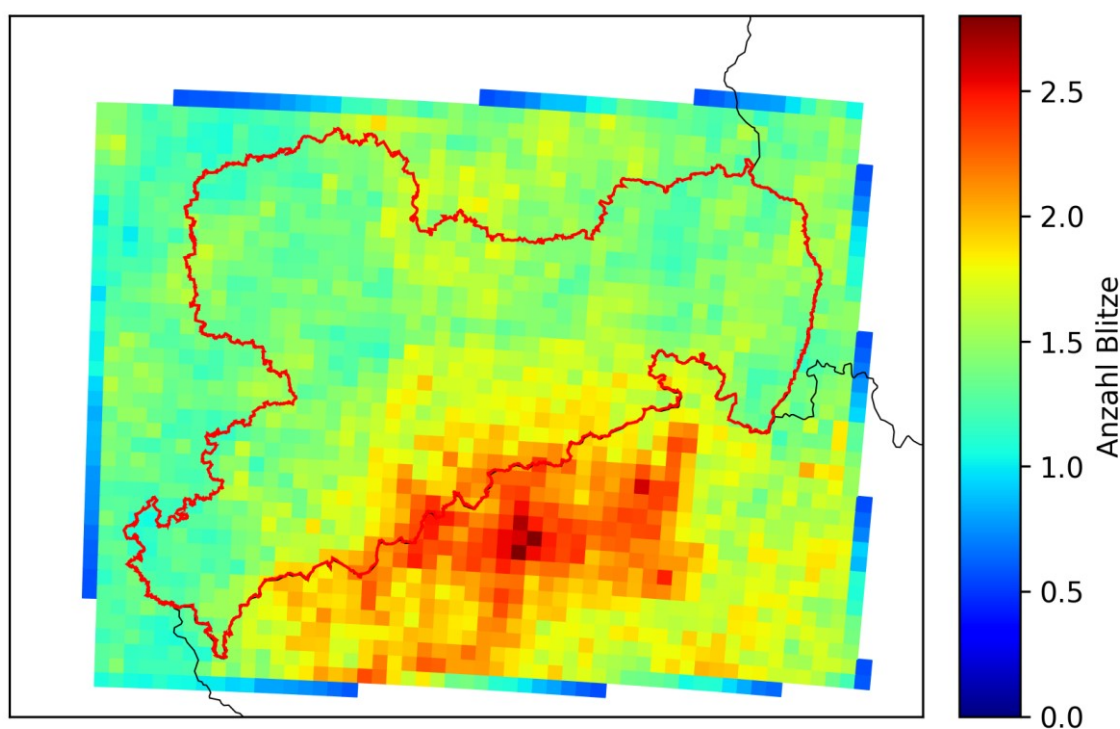


Abbildung 61: Anzahl Blitze pro Jahr 1999 bis 2012 (Sommer)

Es wird ein verstärktes Auftreten von Blitzen im Erzgebirge deutlich. Abbildung 62 verdeutlicht, dass die meisten als extrem konvektiv identifizierten Tage zwischen 2001 und 2012 mit registrierten Blitzen im Untersuchungsgebiet einhergehen.

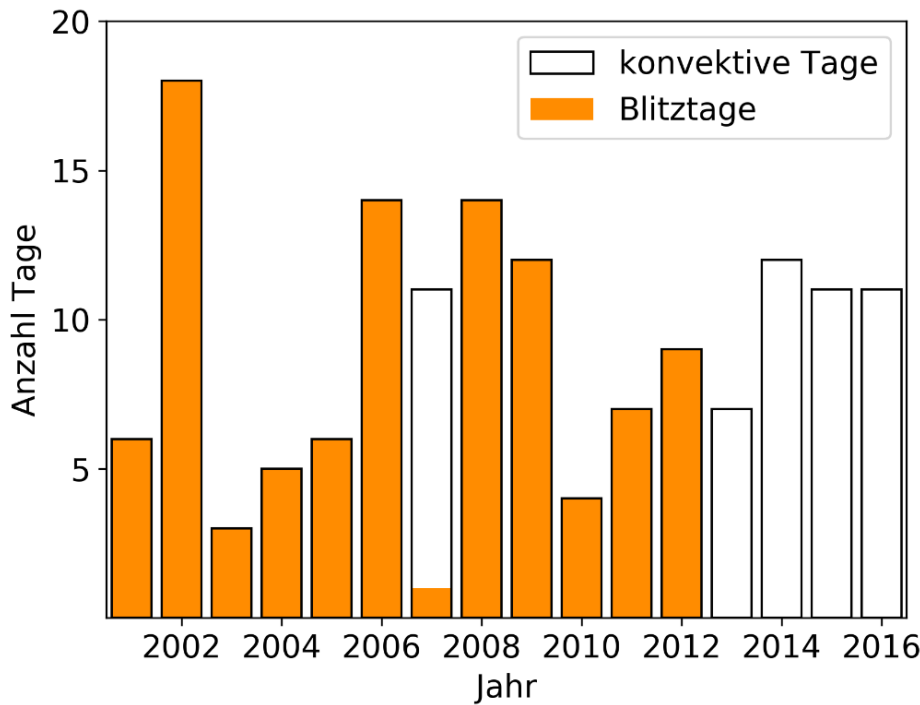


Abbildung 62: Anzahl an konvektiven Tagen mit Blitzen im Untersuchungsgebiet 2001 bis 2012 (Zeitraum der Blitzdaten)

3.5.2 Wetterlagen Blitze

Die Abbildung 63 zeigt die für Blitzaufkommen verantwortlichen Wetterlagen für den Zeitraum 1999 bis 2012 (Sommer).

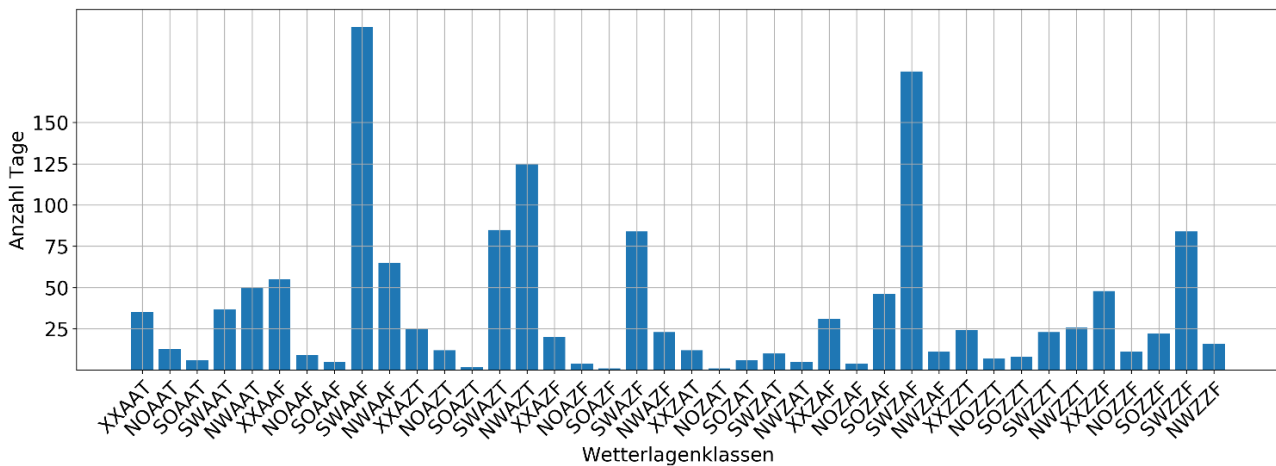


Abbildung 63: Wetterlagen für Tage mit Blitzen 1999 bis 2012 (Sommer)

Wie beim Hagel sind hier insbesondere die Südwestlagen SWAAF (Südwest-Anströmung, 950 hPa antizyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) und SWZAF (Südwest-Anströmung, 950 hPa zyklonal, 500 hPa antizyklonal, feucht) für eine vermehrte Blitzaktivität verantwortlich. Entsprechend kann auf die Ergebnisse für Hagel verwiesen werden, die für die Wetterlage SWZAF eher eine leichte Abnahme der Auftretenswahrscheinlichkeit in den ECHAM6-Projektionen und für die Wetterlage SWAAF eine sehr deutliche Zunahme in der projizierten Zukunft beschrieben. Folglich ist auch hinsichtlich des Blitzpotentials mit einem Anstieg in der Zukunft zu rechnen.

3.5.3 Projektionen für die Zukunft

Abbildung 64 zeigt die potentiell extrem konvektiven Tage für den Zeitraum 1979 bis 2100 sowie die Tage mit Blitzen simuliert mit WRF. Es wird im Vergleich mit Abbildung 62 deutlich, dass für deutlich weniger konvektive Tage im Untersuchungsgebiet Blitze simuliert werden. Auch findet sich kein Anstieg der Blitztage, der mit der Zunahme konvektiver Tage ab 2050 einhergeht.

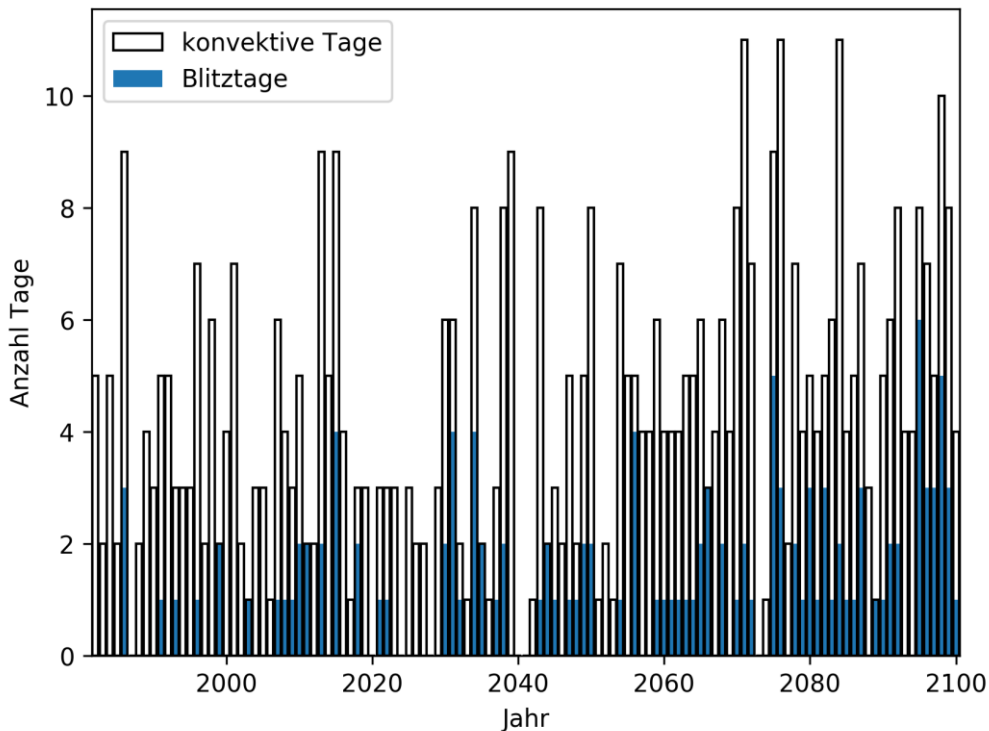


Abbildung 64: Extreme konvektive Tage mit Blitzen simuliert mit WRF für den Zeitraum 1979 bis 2100 (Sommer)

Abbildung 65, Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigen die Anzahl der extremen konvektiven Tage mit Blitzen simuliert mit WRF für die Zeiträume 1981 bis 2010, 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 sowie 2070 bis 2100. Die Daten sind auf ein 10 x 10 km Gitter aggregiert.

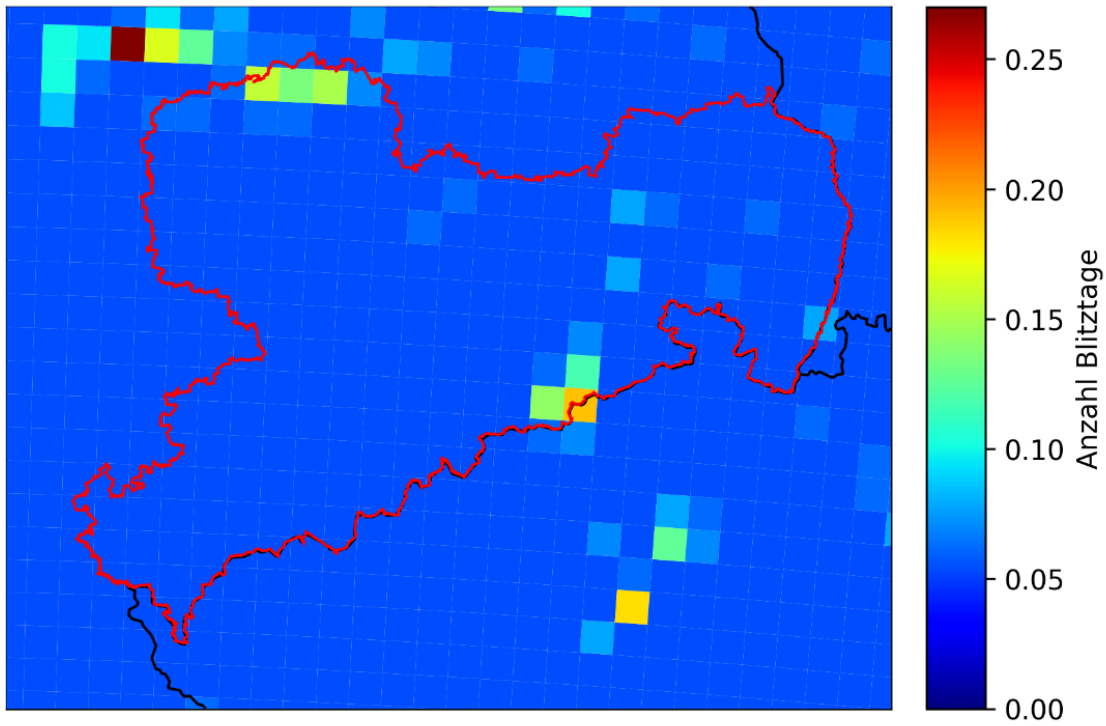


Abbildung 65: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 1981 bis 2010 (Sommer) simuliert mit WRF

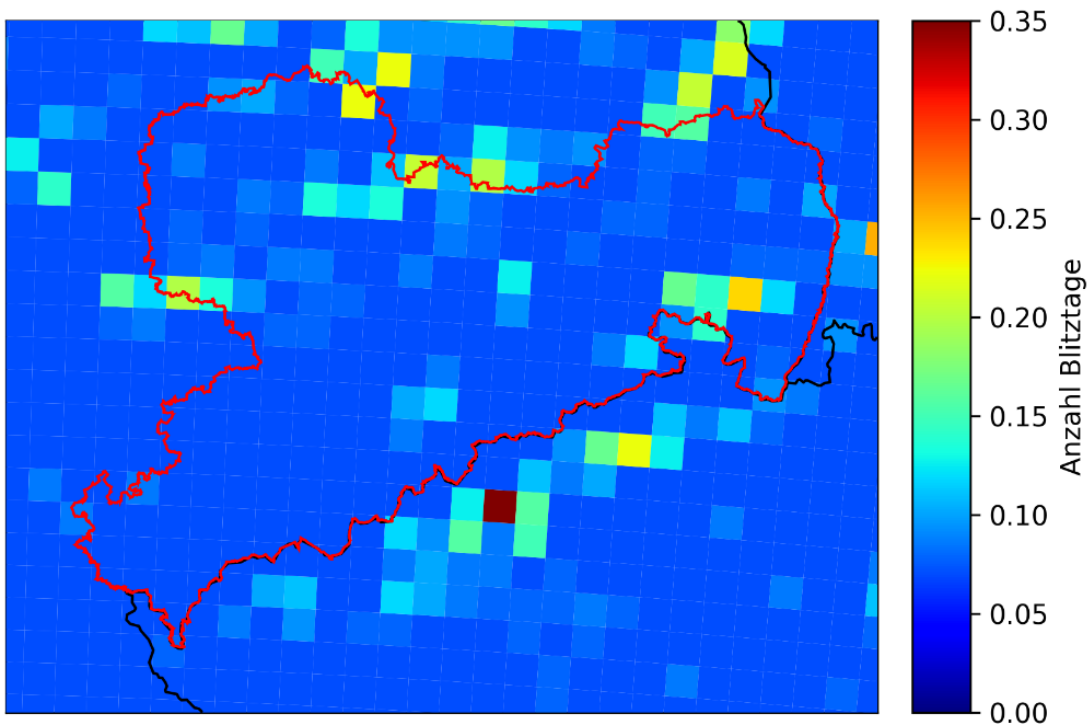


Abbildung 66: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 2011 bis 2040 (Sommer) simuliert mit WRF

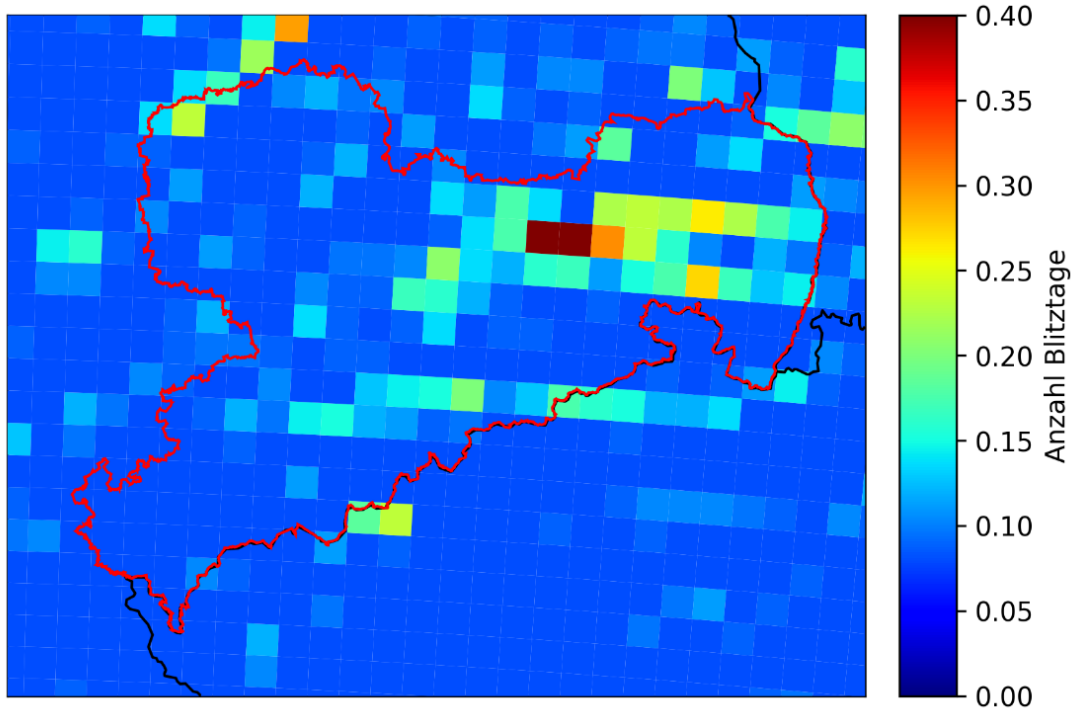


Abbildung 67: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 2041 bis 2070 (Sommer) simuliert mit WRF

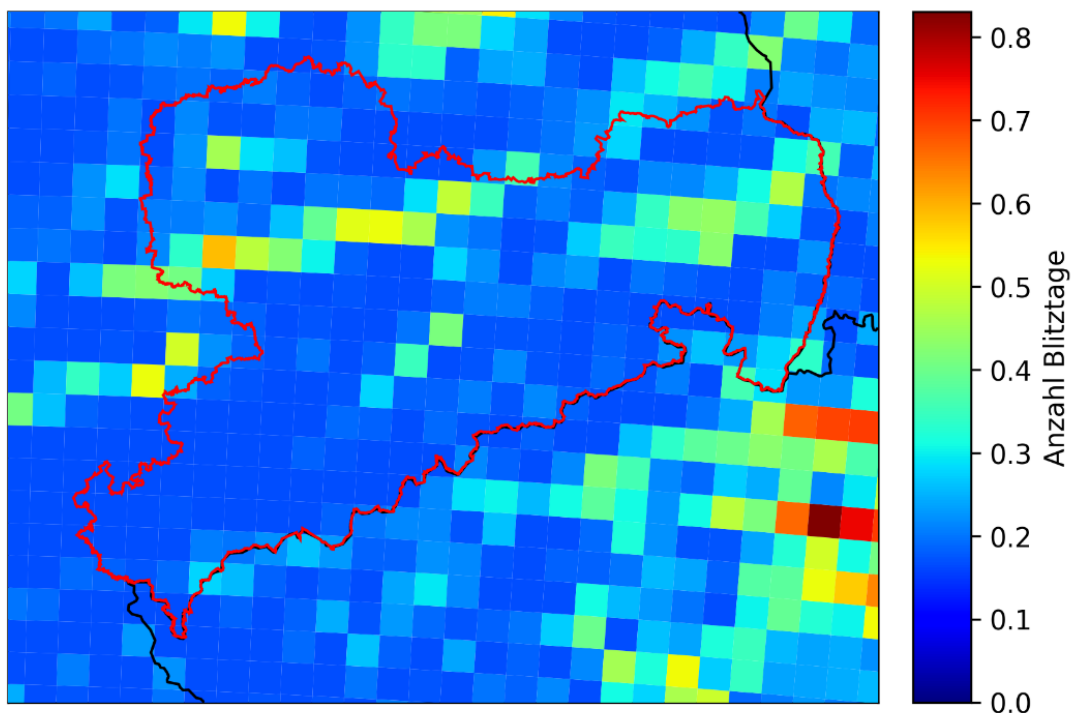


Abbildung 68: Anzahl extreme konvektive Tage mit Blitzen 2071 bis 2100 (Sommer) simuliert mit WRF

Es zeigt sich zwar generell eine Zunahme der Blitzaktivität über den Analysezeitraum, jedoch reicht die simulierte Blitzaktivität nicht aus, um ein räumlich differenziertes Ergebnis zu ermitteln.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Studien wurden umfangreiche Analysen hinsichtlich des aktuellen Potentials hochreichender Konvektion und ihrer Begleiterscheinungen als auch hinsichtlich des projizierten Potentials basierend auf ECHAM6-Simulationen mit dem RCP8.5-Szenario unternommen. Die Analysen beruhten dabei sowohl auf Messdaten als auch auf Modellsimulationen. Als problematisch bei solchen Analysen zeigt sich, dass die zugrundeliegenden Prozesse auf sehr unterschiedlichen Skalen stattfinden, die bis in die Mikrophysik-Ebene reichen. Entsprechend haben die zugrundeliegenden Parametrisierungen einen hohen Einfluss auf das Ergebnis. Dies muss im Zusammenhang mit der begrenzten Anzahl an simulierten Tagen gesehen werden, die eine statistische Analyse erschweren. Hinzu kommt, dass es sich sowohl bei Hagel wie auch bei Blitzen um seltene Ereignisse im Sinne der statistischen Analyse handelt.

Die zur Ermittlung der projizierten Gefährdungspotentiale simulierten Niederschläge machten eine Bias-Korrektur notwendig. Dabei ist die Korrektur von 5-Minuten-Daten Teil der aktuellen Forschung. Die hier angewendete Korrektur geht dabei auf alle statistischen Eigenheiten der simulierten Daten ein, erzeugt aber schlussendlich zu viele Zellen, die sich z.B. im Allgemeinen Konvektionspotential niederschlagen. Folglich können die Gefährdungspotentiale nur im Rahmen eines „Delta-Change“-Ansatzes ausgewertet werden und ein direkter Bezug zum auf Messungen basierenden Potential kann nicht hergestellt werden. Alternative Ansätze zur Bias-Korrektur könnten zu einer Annäherung von simulierten und gemessenen Potentialen führen und sollten daher ausprobiert werden.

Trotz ständiger Erweiterung der Rechenkapazitäten von Hochleistungsrechnern, die im Rahmen dieser Studie umfänglich ausgeschöpft wurden, werden auch in Zukunft umfangreiche Simulationen langer Zeitscheiben, die sich zur Analyse hochreichender Konvektion eignen, eine Seltenheit bleiben (siehe Auflistung der Experimente in Prein et al., 2015). Entsprechend wird weiterhin das statistisch-dynamische Downscaling, wie es in dieser Studie angewandt wurde, seine Berechtigung haben.

Folglich hat sich die Kombination aus einer impliziten Analyse über Wetterlagen sowie einer expliziten Analyse über das statistisch-dynamische Downscaling als zielführend erwiesen. So konnten beispielsweise auch Erkenntnisse für Hagel und Blitze gewonnen werden.

Generell zeigt sich eine Zunahme der Gefährdung durch die hochreichende Konvektion und ihre Begleiterscheinungen wie Hagel und Blitze. Dabei konnten, außer für das Allgemeine Konvektionspotential, keine räumlichen Unterschiede in der Veränderung festgestellt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass auch in Zukunft die meisten Gefährdungspotentiale im Erzgebirge höher sein werden als im Vorland.

5 Danksagung

Wir bedanken uns bei den folgenden Personen, die zum Erfolg dieser Studie beigetragen haben:

- Frank Heyner (TLUG) für die Beantwortung von Fragen zur Konvektionsstudie für Thüringen.
- Morné Gijben vom South African Weather Service für die Hilfe bei der Berechnung des Lightning Threat Index.
- Dr. Sebastian Rast (MPI-Meteorologie Hamburg) und Dr. Karsten Peters-von Gehlen (DKRZ Hamburg) danken wir für die Hilfe bei Fragen zu ECHAM6.
- Dr. Manuela Starke (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf) für die Hilfe bei der Extrapolation der ECHAM6-Daten.
- Dr. Paul Berrisford (ECMWF) für die Hilfe bei der Interpretation der ERA-Interim-Daten.
- Dr. Kersten Schmidt (DLR) für die Beantwortung von Fragen zur Analyse von Blitzdaten.
- Lena-Marie Müller (TU Dresden) für die Hilfe bei Analysen von Zelleigenschaften und –tracks.
- Dr. Matthias Themessl (ZAMG) für die Beantwortung von Fragen zur Biaskorrektur.

Dem Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen danken wir für die Hilfe bei allen technischen Fragestellungen sowie für die Bereitstellung von Rechnerkapazitäten ohne die die Durchführung des Projekts nicht möglich gewesen wäre.

Dem Deutschen Wetterdienst danken wir für die Bereitstellung der Radardaten und der Hagelklimatologie.

Wir danken weiterhin dem Weingut Schloss Wackerbarth für die Bereitstellung der Hagelraten.

Dem ECMWF sei gedankt für die Bereitstellung der ERA-Interim-Reanalyse, dem MPI für Meteorologie und dem Deutschen Klimarechenzentrum (Hamburg) für die Bereitstellung von ECHAM6-Daten.

Literaturverzeichnis

- BAN N, SCHMIDL J UND SCHÄR C (2015) Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophysical Research Letters*, 42, 1165–1172. DOI: 10.1002/2014GL062588
- BERG P, MOSELEY C UND HAERTER JO (2013) Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6, 181–185. DOI: 10.1038/ngeo1731
- BERNHOFER C, FRANKE J, DONIX T, KÖRNER P, FISCHER S, SCHALLER A, KIRSTEN L, PRASSE H UND KOSTROWSKI D (2015) Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des LfULG, Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2015, 195 S.
- BERNHOFER C, SCHALLER A UND PLUNTKE T (2017) Analyse von Starkregenereignissen im Zeitraum 1961 bis 2015 in Sachsen. Schriftenreihe des LfULG, Heft 5/2017, 48 S.
- BISSOLLI P UND DITTMANN E (2001) The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. *Meteorologische Zeitschrift*, 10(4), 253-260. DOI: 10.1127/0941-2948/2001/0010-0253
- BOÉ J, TERRAY L, HABETS F UND MARTIN E (2007) Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1643-1655. DOI: 10.1002/joc.1602
- BRENDEL C, BRISSON E, HEYNER, F, WEIGL E, UND AHRENS B (2014) Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 244, 72 Seiten.
- DAI A (2006) Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *Journal of Climate* 19(18), 4605-4630. DOI: 10.1175/JCLI3884.1
- DEE DP, UPPALA SM, SIMMONS AJ, BERRISFORD P, POLI P, KOBAYASHI S, ANDRAE U, BALMASEDA MA, BALSAMO G, BAUER P, BECHTOLD P, BELJAARS ACM, VAN DE BERG L, BIDLOT J, BORMANN N, DELSOL C, DRAGANI R, FUENTES M, GEER AJ, HAIMBERGER L, HEALY SB, HERSBACH H, HÓLM EV, ISAKSEN L, KÄLLBERG P, KÖHLER M, MATRICARDI M, MCNALLY AP, MONGE-SANZ BM, MORCRETTE J-J, PARK B-K, PEUBEY C, DE ROSNAY P, TAVOLATO C, THÉPAUT J-N UND VITART F (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597. DOI: 10.1002/qj.828
- DRÜE C, HAUF T, FINKE U, KEYN S UND KREYER O (2007) Comparison of a SAFIR lightning detection network in northern Germany to the operational BLIDS network. *Journal of Geophysical Research*, 112, D18114, DOI:10.1029/2006JD007680
- CDO (2015) Climate Data Operators. Available at: <http://www.mpimet.mpg.de/cdo>
- FIELD PR, ROBERTS MJ UND WILKINSON JM (2018) Simulated Lightning in a Convection Permitting Global Model. *Journal of Geophysical Research*, 13, 9370-9377. DOI: 10.1029/2018JD029295
- GDV (2109) <https://www.gdv.de/de/medien/aktuell/schaeden-von-3-2-milliarden-euro-durch-stuerme--hagel-und-starkregen--54750>, abgerufen am 28.3.2021
- GUDMUNDSSON L, BREMNES JB, HAUGEN JE UND ENGEN-SKAUGEN T (2012) Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3383–3390. DOI: 10.5194/hess-16-3383-2012, 2012.
- IVANOV MA UND KOTLARSKI S (2017) Assessing distribution-based climate model bias correction methods over an alpine domain: added value and limitations. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2633-2653. DOI: 10.1002/joc.4870
- KAIN JS, DEMBEK SR, WEISS SJ, CASE JL, LEVIT JJ UND SOBASH RA (2010) Extracting Unique Information from High-Resolution Forecast Models: Monitoring Selected Fields and Phenomena Every Time Step. *Weather and Forecasting*, 25(5), 1536-1542. DOI: 10.1175/2010WAF2222430.1

- KAPSCH ML (2011) Longterm variability of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, 129 S.
- KUNZ M UND PUSKEILER M (2010) High-resolution assessment of the hail hazard over complex terrain from radar and insurance data. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(5), 427-439. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0452>
- LENDERINK G, BARBERO R, LORIAUX JM UND FOWLER HJ (2017) Super-Clausius–Clapeyron Scaling of Extreme Hourly Convective Precipitation and Its Relation to Large-Scale Atmospheric Conditions. *Journal of Climate*, 30(15), 6037-6052. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0808.1
- LENDERINK G UND VAN MEIJGAARD E (2008) Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1, 511–514. DOI: 10.1038/ngeo262
- LIN Y, FARLEY RD UND ORVILLE HD (1983) Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22(6), 1065-1092. DOI: 10.1175/1520-0450(1983)022%3C1065:BPOTSF%3E2.0.CO;2
- LOCHBIHLER K, LENDERINK G UND SIEBESMA AP (2019) Response of extreme precipitating cell structures to atmospheric warming. *Journal of Geophysical Research*, 124, 6904– 6918. DOI:10.1029/2018JD029954.
- MCCAUL JR EW, GOODMAN SJ, LACASSE KM UND CECIL DJ (2009) Forecasting Lightning Threat Using Cloud-Resolving Model Simulations. *Weather and Forecasting*, 24, 709-729. DOI: 10.1175/2008WAF2222152.1
- MCCAUL JR EW, PRIFTIS G, CASE JL, CHRONIS T, GATLIN PN, GOODMAN SJ UND KONG F (2020) Sensitivities of the WRF Lightning Forecasting Algorithm to Parameterized Microphysics and Boundary Layer Schemes. *Weather and Forecasting*, 35(4), 1545-1560. DOI: 10.1175/WAF-D-19-0101.1
- MEREDITH EP, ULBRICH U UND RUST HW (2020) Subhourly rainfall in a convection-permitting model. *Environmental Research Letters*, 15(3), 034031, DOI: 10.1088/1748-9326/ab6787
- MOSELEY C, BERG P UND HAERTER JO (2013) Probing the precipitation life cycle by iterative rain cell tracking. *Journal of Geophysical Research*, 118, 13361–13370. DOI: 10.1002/2013JD020868
- MOSS RH, EDMONDS JA, HIBBARD KA, MANNING MR, ROSE SK, VAN VUUREN DP, CARTER TR, EMORI S, KAINUMA M, KRAM T, MEEHL GA, MITCHELL JFB, NAKICENOVIC N, RIAHI K, SMITH SJ, STOUFFER RJ, THOMSON AM, WEYANT JP UND WILBANKS TJ (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. DOI: 10.1038/nature08823
- NCEP (2014) <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/training/deep/sld003.htm>, abgerufen am 28.3.2021
- PELEG N, MARRA F, FATICHI S, MOLNAR P, MORIN E, SHARMA A UND BURLANDO P (2018) Intensification of convective rain cells at warmer temperatures observed from high-resolution weather radar data. *Journal of Hydrometeorology*, 19(4), 715–726. DOI:10.1175/JHM-D-17-0158.1.
- PIANI C, HAERTER JO UND COPPOLA E (2010) Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1-2), 187-192. DOI: 10.1007/s00704-009-0134-9
- POUJOI B, PREIN A UND NEWMAN A (2002) Kilometer-scale modeling projects a tripling of Alaskan convective storms in future climate. *Climate Dynamics*. DOI:10.1007/s00382-020-05466-1
- PREIN AF, LANGHANS W, FOSSER G., FERRONE, A., BAN, N., GOERGEN, K., KELLER, M., TÖLLE, M., GUTJAHR, O., FESER, F., BRISSON, E., KOLLET, S., SCHMIDLI, J., VAN LIPZIG, N.P.M UND LEUNG, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323-361. DOI:1002/2014RG000475

- PREIN AF, LIU C, IKEDA K, TRIER SB, RASMUSSEN RM, HOLLAND GJ UND CLARK MP (2017) Increased rainfall volume from future convective storms in the US. *Nature Climate Change*. DOI:10.1038/s41558-017-0007-7
- RIEDIGER U UND GRATZKI A (2014) Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. *Meteorologische Zeitschrift*, 23(3), 231-251. DOI: 10.1127/0941-2948/2014/0519
- RIEMANN-CAMPE K, FRAEDRICH K UND LUNKEIT F (2009) Global climatology of Convective Available Potential Energy (CAPE) and Convective Inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis. *Atmospheric Research*, 93(1-3), 534-545. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.09.037.
- SKAMAROCK, W.C., KLEMP, J.B., DUDHIA, J., GILL, D.O., BARKER, D.M., WANG, W. UND POWERS, J.G. (2008). A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR.
- STEINACKER R, DORNINGER M, WÖLFELMAIER F UND KRENNERT T (2000) Automatic Tracking of Convective Cells and Cell Complexes from Lightning and Radar data. *Meteorol Atmos Phys*, 72, 101-110.
- STEVENS B, GIORGETTA M, ESCH M, MAURITSEN T, CRUEGER T, RAST S, SALZMANN M, SCHMIDT H, BADER J, BLOCK K, BROKOPF R, FAST I, KINNE S, KORNBLUEH L, LOHMANN U, PINCUS R, REICHLER T UND ROECKNER E (2013) Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), 1942-2466. DOI: 10.1002/jame.20015
- STOELINGA M (2005) Simulated equivalent reflectivity factor as currently formulated in RIP: Description and possible improvements. Unveröffentlichtes Manuscript.
- TRENBERTH KE, BERRY JC UND BUJA LE (1993) Vertical Interpolation and Truncation of Model-coordinate Data. NCAR Technical Note NCAR/TN-396+STR. DOI:10.5065/D6HX19NH.
- VDE ABB (Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik – Ausschuss Blitzschutz und Blitzforschung), <https://www.vde.com/de/blitzschutz/infos/bitzunfaelle-blitzschaeden#statistik>, abgerufen: 1.3.2021
- WINTERRATH T, BRENDL C, HAFFER M, JUNGHÄNEL T, KLAMETH A, LENGFELD K, WALAWENDER E, WEIGL E UND BECKER A (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprozessierte, mit Stationsdaten angeeichte Radarmessungen (RADOLAN), 5-Minuten-Niederschlagsraten (YW) DOI: 10.5676/DWD/RADKLIM_YW_V2017.002
- YESSAD K (2019) FULL-POS in the cycle 46t1r1 of ARPEGE/IFS. www.umr-cnrm.fr/gmapdoc/IMG/pdf/ykfpos46t1r1.pdf

Anhang

Anhang 1 Konvektionsindizes

[1-6] Spezifische Feuchte in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[7-12] Maximaler Gradient der spezifischen Feuchte in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[13-18] Temperatur in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[19-24] Maximaler Gradient der Temperatur in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[25-30] Windgeschwindigkeit in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[31-36] Maximaler Gradient der Windgeschwindigkeit in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[37-42] Taupunkttemperatur in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[43-48] Maximaler Gradient der Taupunkttemperatur in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[49-54] Relative Feuchte in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[55-60] Maximaler Gradient der Relativen Feuchte in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[61-66] Theta-E in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[67-72] Maximaler Gradient von Theta-E in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[73-78] Theta-A in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[79-84] Maximaler Gradient von Theta-A in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

[85] Adedokun-Index 1

[86] Maximaler Gradient des Adedokun-Index 1

[87] Adedokun-Index 2

[88] Maximaler Gradient des Adedokun-Index 2

[89] Boyden-Index

[88] Maximaler Gradient des Boyden-Index

[90] Bradbury-Index

[91] Maximaler Gradient des Bradbury-Index

[92] CAPE surface

[93] Maximaler Gradient CAPE surface

[94] CIN surface

[95] Maximaler Gradient CIN surface

- [96] Luftdruck am Cumulus Condensation Level surface
- [97] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level surface
- [98] Luftdruck am Level of Free Convection surface
- [99] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection surface
- [100] CAPE surface mit virtueller Temperaturkorrektur
- [101] Maximaler Gradient CAPE surface mit virtueller Temperaturkorrektur
- [102] CIN surface mit virtueller Temperaturkorrektur
- [103] Maximaler Gradient CIN surface mit virtueller Temperaturkorrektur
- [104] Luftdruck am Cumulus Condensation Level surface mit virtueller Temperaturkorrektur
- [105] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level surface
mit virtueller Temperaturkorrektur
- [106] Luftdruck am Level of Free Convection surface mit virtueller Temperaturkorrektur
- [107] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection surface
mit virtueller Temperaturkorrektur
- [108] CAPE mixed layer 50 hPa
- [109] Maximaler Gradient CAPE mixed layer 50 hPa
- [110] CIN mixed layer 50 hPa
- [111] Maximaler Gradient CIN mixed layer 50 hPa
- [112] Luftdruck am Cumulus Condensation Level mixed layer 50 hPa
- [113] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level mixed layer 50 hPa
- [114] Luftdruck am Level of Free Convection mixed layer 50 hPa
- [115] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection mixed layer 50 hPa
- [116] CAPE mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [117] Maximaler Gradient CAPE mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [118] CIN mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [119] Maximaler Gradient CIN mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [120] Luftdruck am Cumulus Condensation Level mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [121] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level mixed layer 50 hPa
mit virtueller Temperaturkorrektur

- [122] Luftdruck am Level of Free Convection mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [123] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection mixed layer 50 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [124] CAPE mixed layer 100 hPa
- [125] Maximaler Gradient CAPE mixed layer 100 hPa
- [126] CIN mixed layer 100 hPa
- [127] Maximaler Gradient CIN mixed layer 100 hPa
- [128] Luftdruck am Cumulus Condensation Level mixed layer 100 hPa
- [129] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level mixed layer 100 hPa
- [130] Luftdruck am Level of Free Convection mixed layer 100 hPa
- [131] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection mixed layer 100 hPa
- [132] CAPE mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [133] Maximaler Gradient CAPE mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [134] CIN mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [135] Maximaler Gradient CIN mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [136] Luftdruck am Cumulus Condensation Level mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [137] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [138] Luftdruck am Level of Free Convection mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [139] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [140] most unstable CAPE nach Haklander und van Delden
- [141] Maximaler Gradient most unstable CAPE nach Haklander und van Delden
- [142] most unstable CAPE bis 300 hPa
- [143] Maximaler Gradient most unstable CAPE bis 300 hPa
- [144] most unstable CIN bis 300 hPa
- [145] Maximaler Gradient most unstable CIN bis 300 hPa
- [146] Luftdruck am Cumulus Condensation Level most unstable CAPE bis 300 hPa
- [147] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level most unstable CAPE bis 300 hPa
- [148] Luftdruck am Level of Free Convection most unstable CAPE bis 300 hPa

- [149] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection most unstable CAPE bis 300 hPa
- [150] most unstable CAPE bis 300 hPa
- [151] Maximaler Gradient most unstable CAPE bis 300 hPa
- [152] most unstable CIN bis 300 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [153] Maximaler Gradient most unstable CIN bis 300 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [154] Luftdruck am Cumulus Condensation Level most unstable CAPE bis 300 hPa
mit virtueller Temperaturkorrektur
- [155] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Cumulus Condensation Level most unstable CAPE bis 300 hPa
mit virtueller Temperaturkorrektur
- [156] Luftdruck am Level of Free Convection most unstable CAPE bis 300 hPa mit virtueller Temperatur-
korrektur
- [157] Maximaler Gradient des Luftdrucks am Level of Free Convection most unstable CAPE bis 300 hPa
mit virtueller Temperaturkorrektur
- [158] CAPE unterste 3 km
- [159] Maximaler Gradient CAPE unterste 3 km
- [160] CAPE unterste 3 km mit virtueller Temperaturkorrektur
- [161] Maximaler Gradient CAPE unterste 3 km mit virtueller Temperaturkorrektur
- [162] CAPE unterste 3 km mixed layer 100 hPa
- [163] Maximaler Gradient CAPE unterste 3 km mixed layer 100 hPa
- [164] CAPE unterste 3 km mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [165] Maximaler Gradient CAPE unterste 3 km mixed layer 100 hPa mit virtueller Temperaturkorrektur
- [166] Cross Totals Index
- [167] Maximaler Gradient des Cross Totals Index
- [168] Deep Convective Index
- [169] Maximaler Gradient des Deep Convective Index
- [170] Jefferson Index
- [171] Maximaler Gradient des Jefferson Index
- [172] Modifizierter Jefferson Index
- [173] Maximaler Gradient des Modifizierten Jefferson Index
- [174] K-Index

- [175] Maximaler Gradient des K-Index
- [176] Modifizierter K-Index
- [177] Maximaler Gradient des Modifizierten K-Index
- [178] KO-Index
- [179] Maximaler Gradient des KO-Index
- [180] Lifted Index surface
- [181] Maximaler Gradient des Lifted Index surface
- [182] Lifted Index unterste 50 hPa
- [183] Maximaler Gradient des Lifted Index unterste 50 hPa
- [184] Lifted Index unterste 100 hPa
- [185] Maximaler Gradient des Lifted Index unterste 100 hPa
- [186] most unstable Lifted Index
- [187] Maximaler Gradient des most unstable Lifted Index
- [188] Potential Instability Index
- [189] Maximaler Gradient des Potential Instability Index
- [190] Rackliff-Index
- [191] Maximaler Gradient des Rackliff-Index
- [192] Showalter-Index
- [193] Maximaler Gradient des Showalter-Index
- [194] S-Index
- [195] Maximaler Gradient des S-Index
- [196] SWEAT
- [197] Maximaler Gradient des SWEAT
- [198] SWISS00-Index
- [199] Maximaler Gradient des SWISS00-Index
- [200] SWISS12-Index
- [201] Maximaler Gradient des SWISS12-Index
- [202] Thompson-Index

[203] Maximaler Gradient des Thompson-Index

[204] Total Energy Index 925 hPa

[205] Maximaler Gradient des Total Energy Index 925 hPa

[206] Total Energy Index 850 hPa

[207] Maximaler Gradient des Total Energy Index 850 hPa

[208] Total Totals Index

[209] Maximaler Gradient des Total Totals Index

[210] Modifizierter Total Totals Index

[211] Maximaler Gradient des Modifizierten Total Totals Index

[212] Vertical Totals Index

[213] Maximaler Gradient des Vertical Totals Index

[212] Yonetani-Index

[213] Maximaler Gradient des Yonetani-Index

[212] Modifizierter Yonetani-Index

[213] Maximaler Gradient des Modifizierten Yonetani-Index

[214] H-Index

[215] Maximaler Gradient des H-Index

[216] Delta-Theta-E

[217] Maximaler Gradient Delta-Theta-E

[218] WBZH

[219] Maximaler Gradient WBZH

[220] Windscherung 0 – 1 km über Grund

[221] Maximaler Gradient Windscherung 0 – 1 km über Grund

[222] Windscherung 0 – 3 km über Grund

[223] Maximaler Gradient Windscherung 0 – 3 km über Grund

[224] Windscherung 0 – 6 km über Grund

[225] Maximaler Gradient Windscherung 0 – 6 km über Grund

[226] Windscherung 3 – 6 km über Grund

[227] Maximaler Gradient Windscherung 3 – 6 km über Grund

- [228] Temperaturgradient 0 – 1 km über Grund
- [229] Maximaler Gradient Temperaturgradient 0 – 1 km über Grund
- [230] Temperaturgradient 0 – 3 km über Grund
- [231] Maximaler Gradient Temperaturgradient 0 – 3 km über Grund
- [232] Temperaturgradient 0 – 6 km über Grund
- [233] Maximaler Gradient Temperaturgradient 0 – 6 km über Grund
- [234] Temperaturgradient 1 – 2 km über Grund
- [235] Maximaler Gradient Temperaturgradient 1 – 2 km über Grund
- [236] Temperaturgradient 2 – 3 km über Grund
- [237] Maximaler Gradient Temperaturgradient 2 – 3 km über Grund
- [238] Temperaturgradient 3 – 4 km über Grund
- [239] Maximaler Gradient Temperaturgradient 3 – 4 km über Grund
- [240] Temperaturgradient 4 – 5 km über Grund
- [241] Maximaler Gradient Temperaturgradient 4 – 5 km über Grund
- [242] Temperaturgradient 5 – 6 km über Grund
- [243] Maximaler Gradient Temperaturgradient 5 – 6 km über Grund
- [244] Temperaturgradient 6 – 7 km über Grund
- [245] Maximaler Gradient Temperaturgradient 6 – 7 km über Grund
- [246] Temperaturgradient 7 – 8 km über Grund
- [247] Maximaler Gradient Temperaturgradient 7 – 8 km über Grund
- [248] Precipitable Water Vapour
- [249] Maximaler Gradient Precipitable Water Vapour
- [250] Bulk Richardson Number
- [251] Maximaler Gradient Bulk Richardson Number
- [252] Bulk Richardson Number mit virtueller Temperaturkorrektur
- [253] Maximaler Gradient Bulk Richardson Number mit virtueller Temperaturkorrektur
- [254] CI_Reap
- [255] Maximaler Gradient CI_Reap
- [256] CI_Barber

[257] Maximaler Gradient CI_Barber
[258] uvv
[259] Maximaler Gradient uvv
[260] uvv mit virtueller Temperaturkorrektur
[261] Maximaler Gradient uvv
[262] Craven-Index
[263] Maximaler Gradient Craven-Index
[264] Craven-Index mit virtueller Temperaturkorrektur
[265] Maximaler Gradient Craven-Index mit virtueller Temperaturkorrektur
[266] SHIP
[267] Maximaler Gradient SHIP
[268] SHIP mit virtueller Temperaturkorrektur
[269] Maximaler Gradient mit virtueller Temperaturkorrektur
[270] LPI
[271] Maximaler Gradient LPI
[272] LPI mit virtueller Temperaturkorrektur
[273] Maximaler Gradient LPI mit virtueller Temperaturkorrektur
[274] Theta mean 1-200
[275] Maximaler Gradient Theta mean 1-200
[276-281] Zyklonalität in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa
[282-284] Divergenz Q-Vektor Theta in 700, 500 und 300 hPa
[285-287] Mittlere Divergenz Q-Vektor Theta in 700, 500 und 300 hPa
[288-293] U-Wind im Zentrum in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa
[294-299] V-Wind im Zentrum 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa
[300-304] mittlerer U-Wind in 950, 850, 700, 500 und 300 hPa
[305-309] mittlerer V-Wind in 950, 850, 700, 500 und 300 hPa
[310-315] Gradient U-Wind in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa
[316-321] Gradient V-Wind in 950, 925, 850, 700, 500 und 300 hPa

Anhang 2 Anhang Hagelauswertung Schloß Wackerbarth

Datum Länge Breite Ergebnis

2007-06-25 13.432851.2319 not detected

2007-06-25 13.440051.2314 not detected

2007-06-25 13.435151.2345 not detected

2007-06-25 13.443851.2312 not detected

2007-06-25 13.428551.2367 not detected

2007-06-25 13.437251.2323 not detected

2007-06-25 13.428951.2355 not detected

2010-08-15 13.443851.2312 not detected

2010-08-15 13.428551.2367 not detected

2010-08-15 13.448451.2322 not detected

2010-08-15 13.447451.2322 not detected

2010-08-15 13.446851.2321 not detected

2010-08-15 13.428951.2355 not detected

2010-08-15 13.422551.2379 not detected

2010-08-15 13.424851.2366 not detected

2010-08-15 13.437251.2323 not detected

2010-08-15 13.440051.2314 not detected

2012-05-04 13.586451.1542 not detected

2012-05-04 13.587551.1532 not detected

2012-07-06 13.586451.1542 detected

2012-07-06 13.587551.1532 detected

2012-07-06 13.602951.1226 detected

2012-07-06 13.606351.1254 detected

2012-07-06 13.608251.1212 detected

2012-07-06 13.614751.1168 detected

2012-07-06 13.622451.1199 detected

2012-07-06 13.620851.1158 detected
2014-07-08 13.437051.2348 not detected
2014-07-08 13.434351.2348 not detected
2014-07-08 13.435651.2343 not detected
2014-07-08 13.430651.2354 not detected
2014-07-08 13.438351.2336 not detected
2014-07-08 13.432851.2319 not detected
2014-07-08 13.447451.2321 not detected
2015-04-26 13.583751.1542 detected
2015-09-01 13.587551.1532 detected
2015-09-01 13.447451.2321 detected
2015-09-01 13.443851.2312 detected
2015-09-01 13.439351.2320 detected
2015-09-01 13.494051.1259 detected
2015-09-01 13.493451.1259 detected
2015-09-01 13.489151.1265 detected
2015-09-01 13.489051.1259 detected
2015-09-01 13.489551.1270 detected

Anhang 3 Gefährdungspotentiale

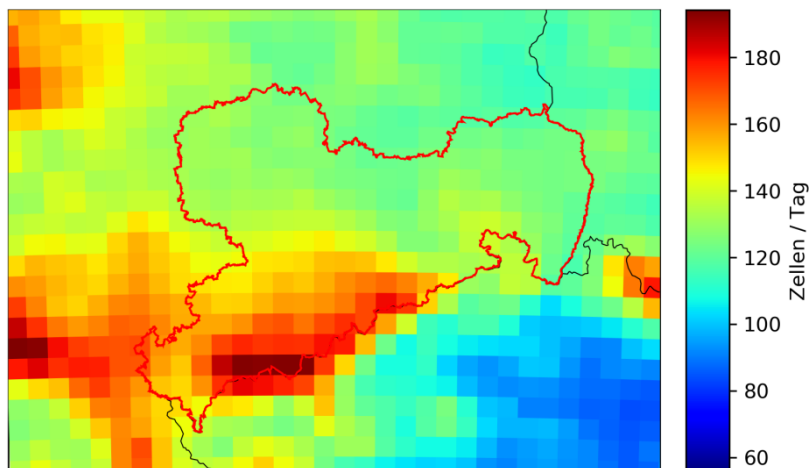


Abbildung A1: Allgemeines Konvektionspotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

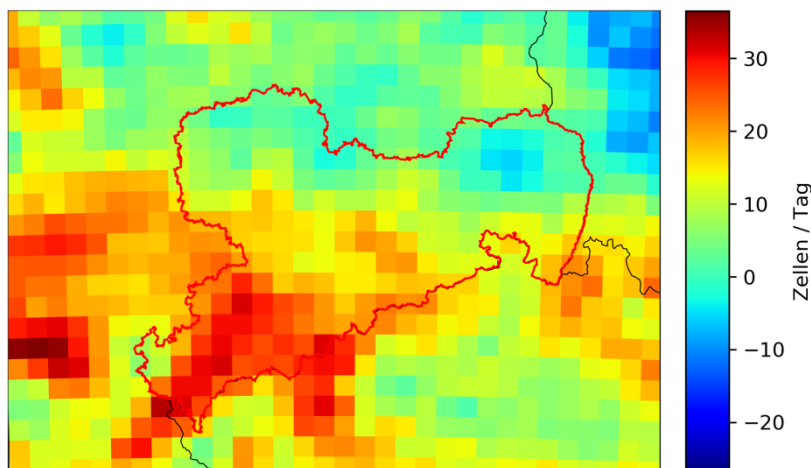


Abbildung A2: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

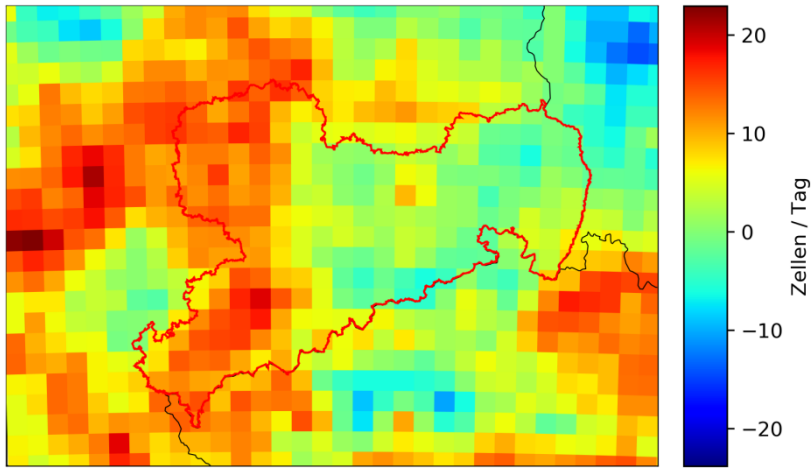


Abbildung A3: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

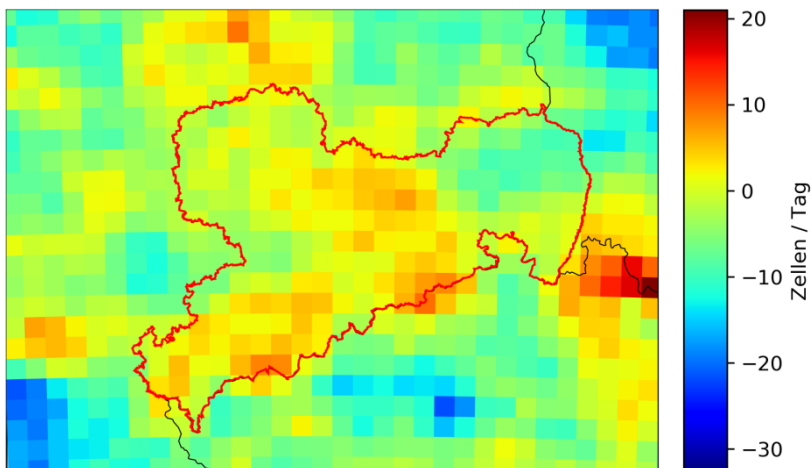


Abbildung A4: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

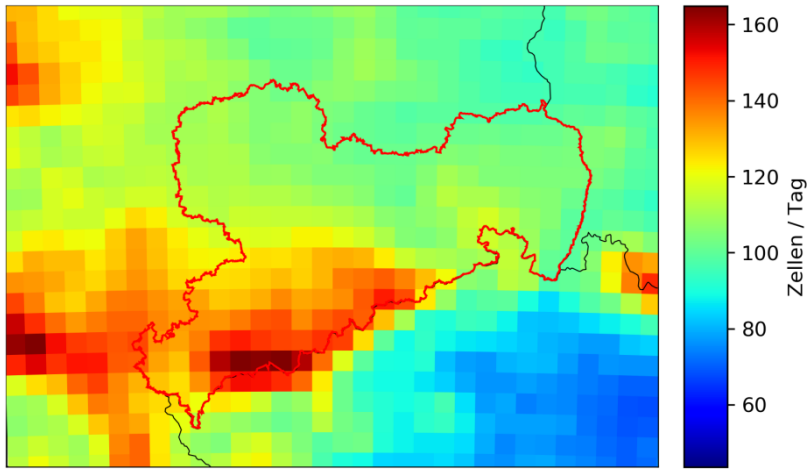


Abbildung A5: Allgemeines Konvektionspotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

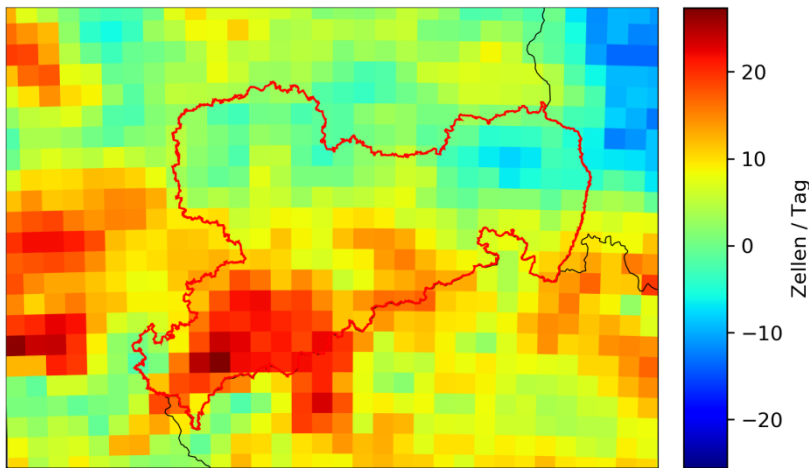


Abbildung A6: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

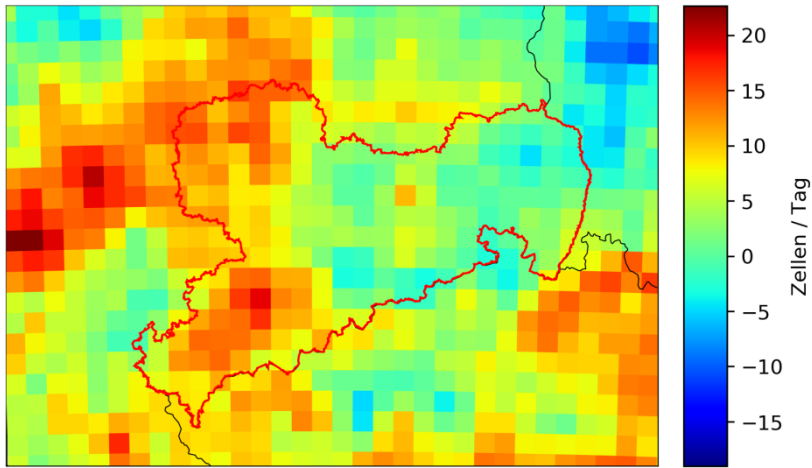


Abbildung A7: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

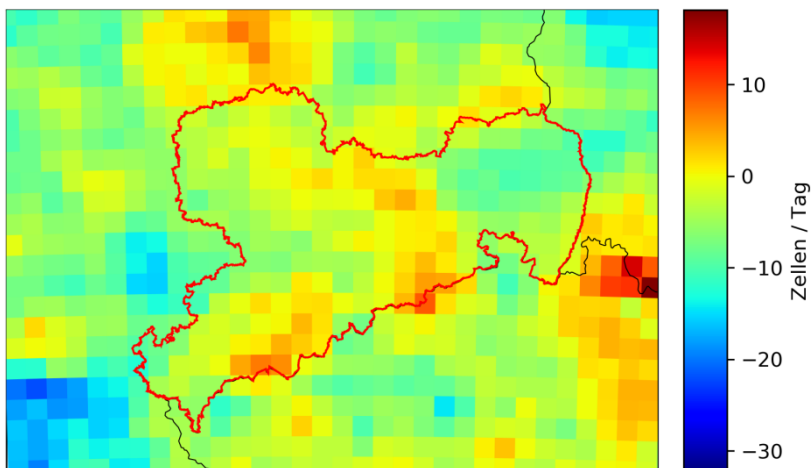


Abbildung A8: Differenz des Allgemeinen Konvektionspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

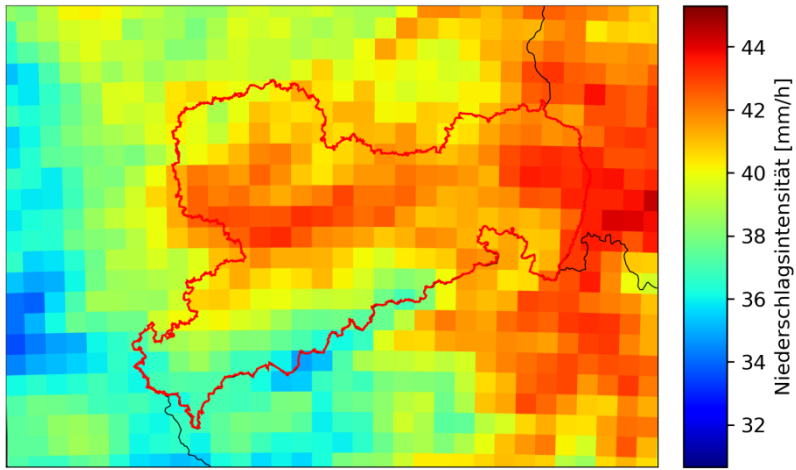


Abbildung A9: Starkniederschlagspotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

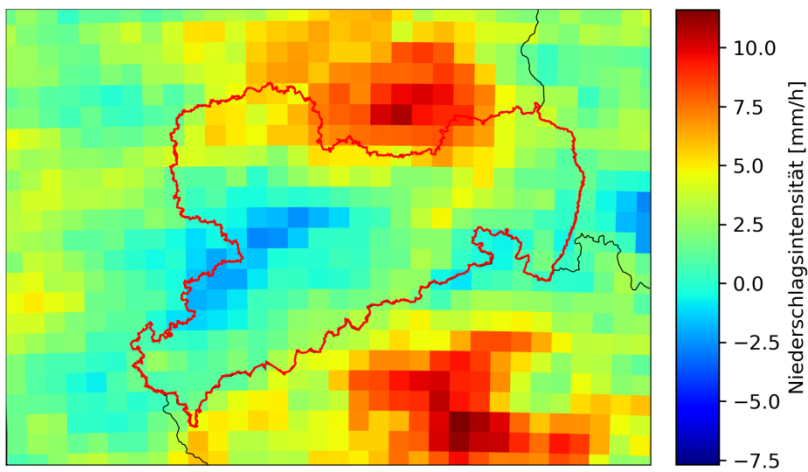


Abbildung A10: Differenz des Starkniederschlagspotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

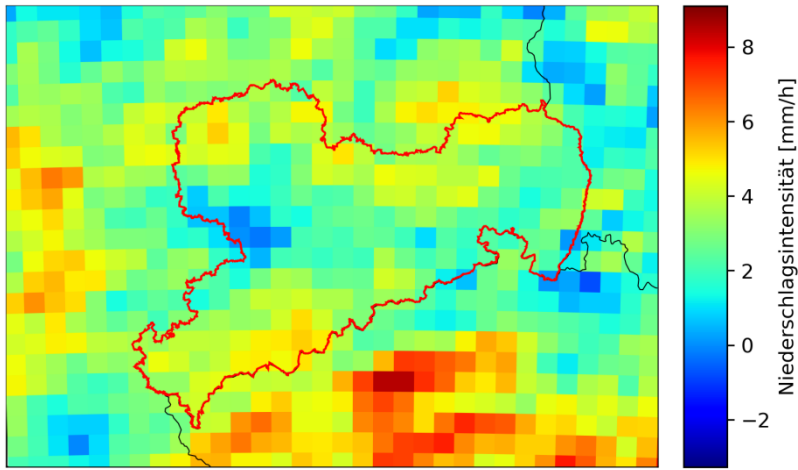


Abbildung A11: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

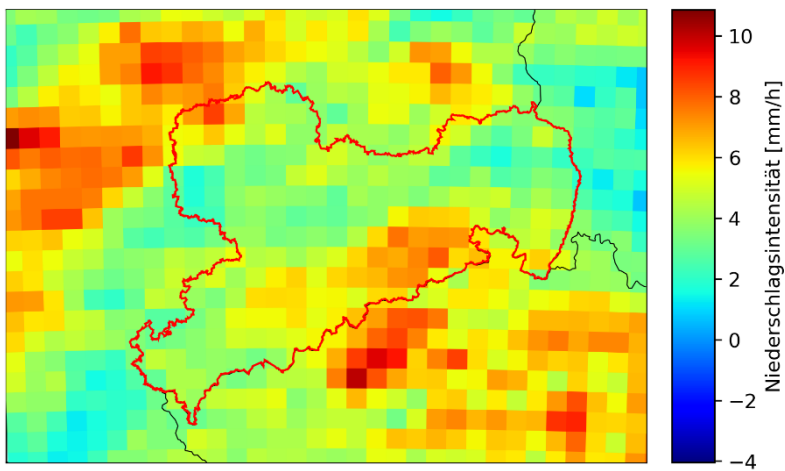


Abbildung A12: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

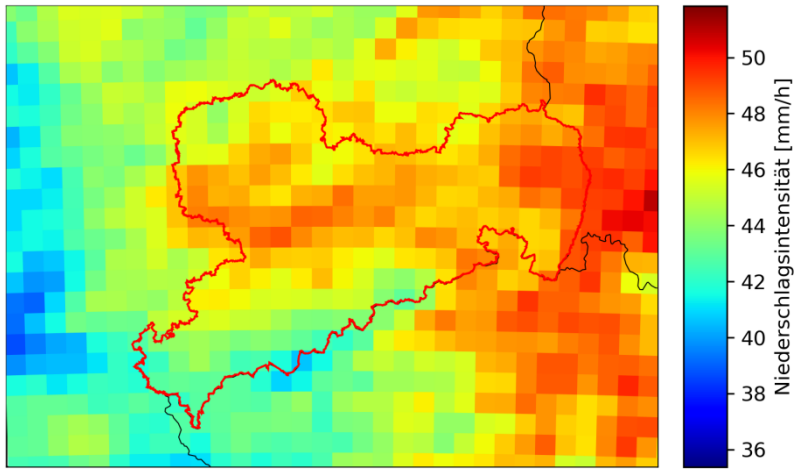


Abbildung A13: Starkniederschlagspotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

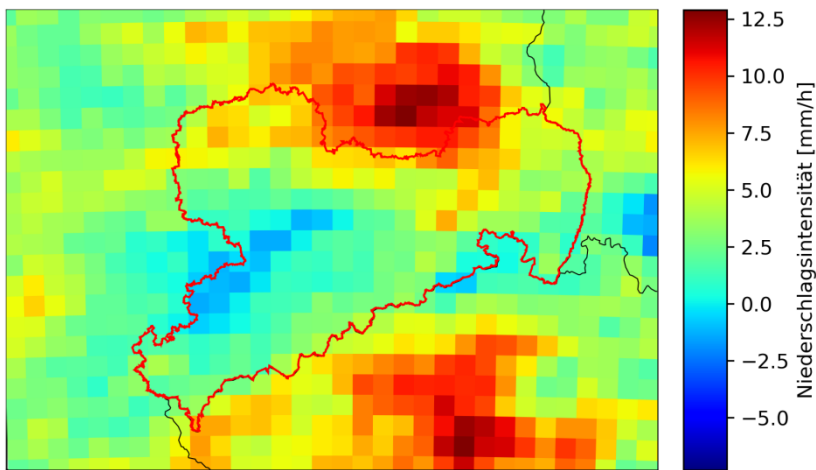


Abbildung A14: Differenz des Starkniederschlagspotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

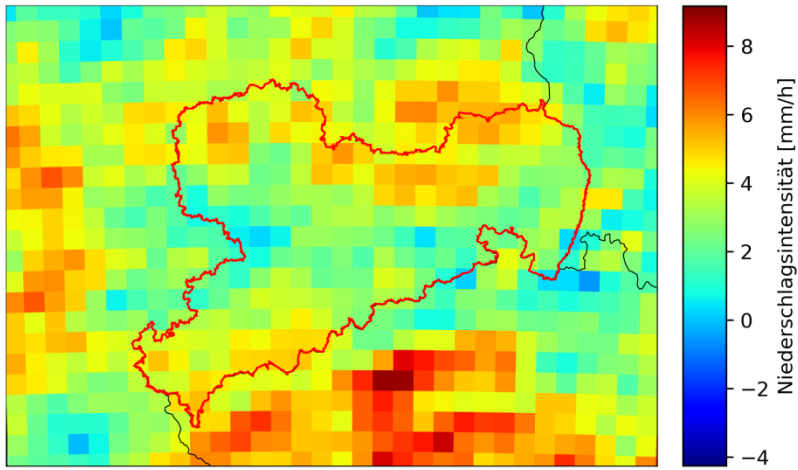


Abbildung A15: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

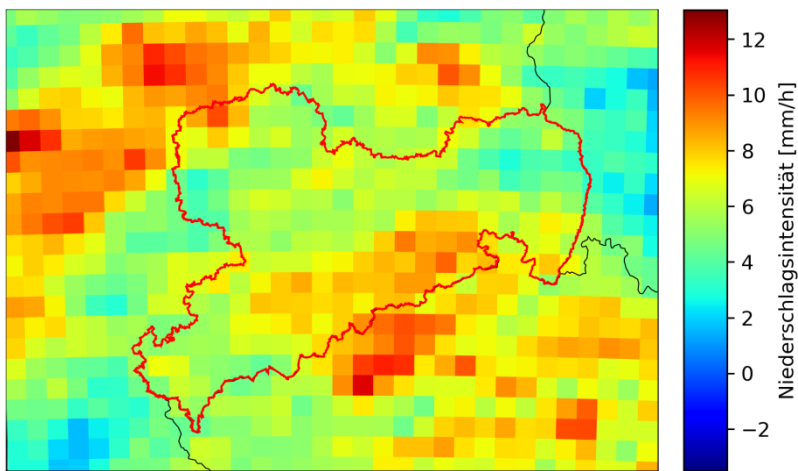


Abbildung A16: Differenz des Starkniederschlagspotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

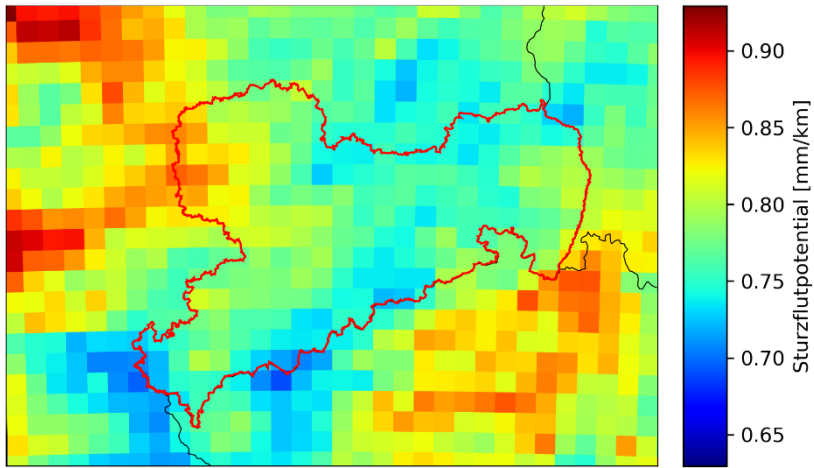


Abbildung A17: Sturzflutpotential für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

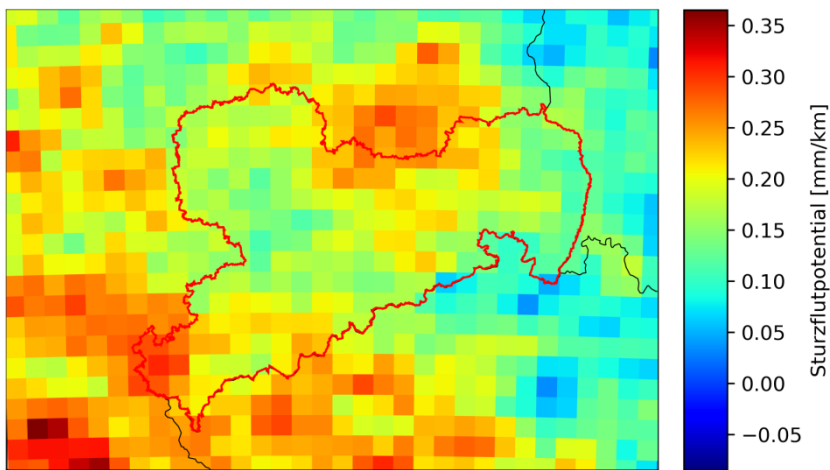


Abbildung A18: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

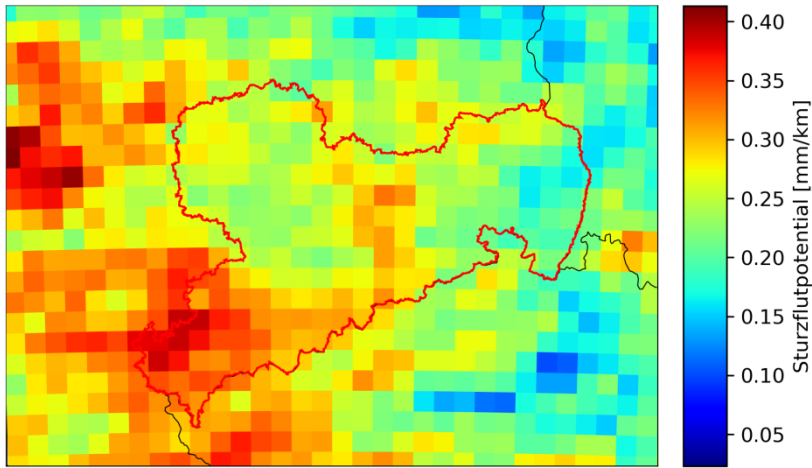


Abbildung A19: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

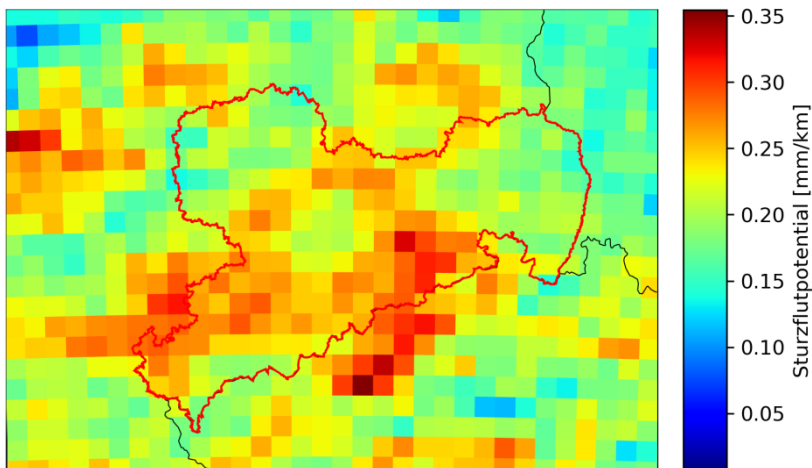


Abbildung A20: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 10 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

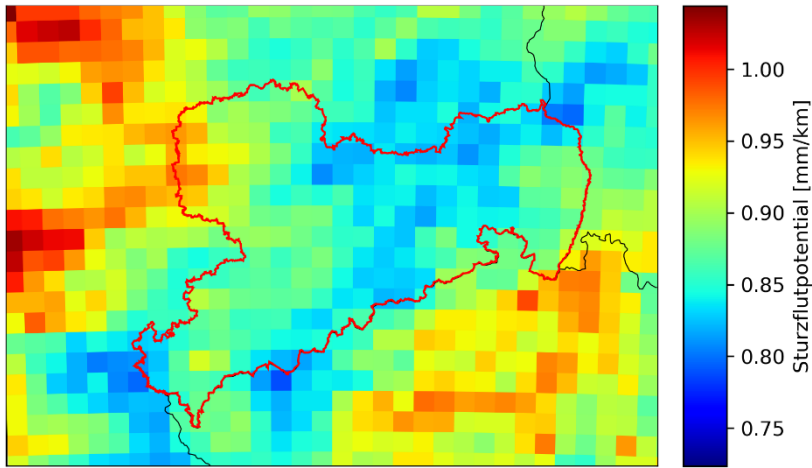


Abbildung A21: Sturzflutpotential für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September für die Jahre 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

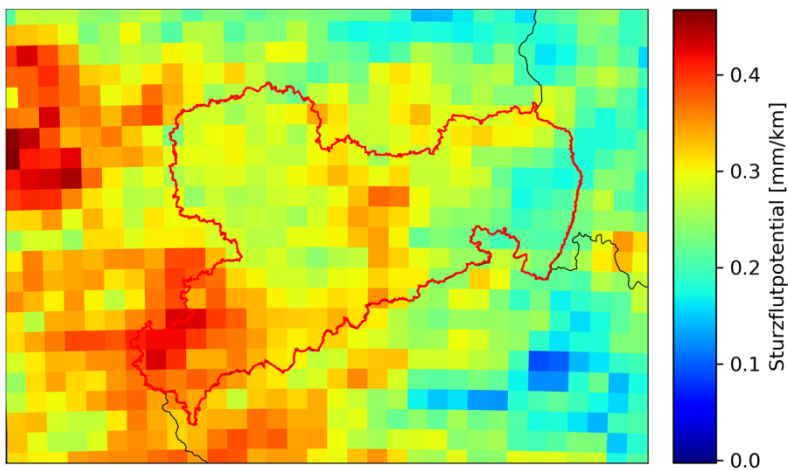


Abbildung A22: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2011 bis 2040 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

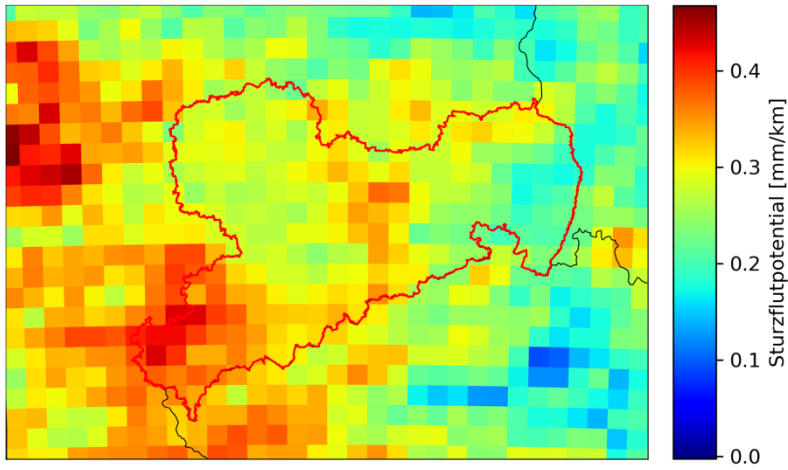


Abbildung A23: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2041 bis 2070 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

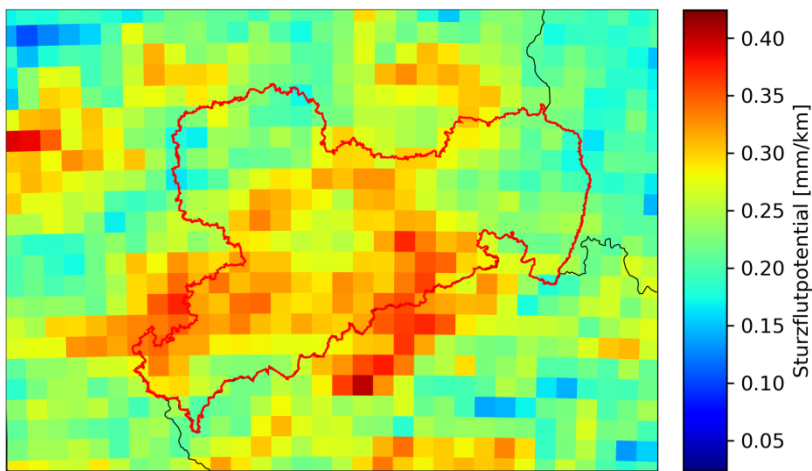


Abbildung A24: Differenz des Sturzflutpotentials für Zellen > 15 mm/h in dem Monaten April bis September zwischen den Zeiträumen 2071 bis 2100 und 1981 bis 2010 simuliert mit WRF

Herausgeber:

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

Autor:

Dr. Klemens Barfus, Prof. Dr. Christian Bernhofer
Technische Universität Dresden, Professur für Meteorologie
Pienner Str. 23, 01737 Tharandt
Telefon: +49 351 463-31340
Telefax: +49 351 463-31302
E-Mail: meteorologie@tu-dresden.de

Redaktion:

Dr. Johannes Franke
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen / Fachzentrum Klima
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5501
Telefax: +49 351 2612-5199
E-Mail: johannes.franke@smekul.sachsen.de

Fotos:

Bernd März, Annaberg-Buchholz (Titelbild)

Auflage:

1. Auflage

Redaktionsschluss:

09.01.2022

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber
als PDF-Datei unter

<https://publikationen.sachsen.de/bdb/heruntergeladen> werden.

Verteilerhinweis

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

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

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de