



SACHSEN-ANHALT

Landesamt für Umweltschutz

Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotenzials über Sachsen-Anhalt

Impressum

Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotenzials
über Sachsen-Anhalt

- Herausgeber: Landesamt für Umweltschutz
Tel.: +49 345-5704-101
poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de
Internet: www.lau.sachsen-anhalt.de
- Erstellt durch: Institut für Atmosphäre und Umwelt
Goethe-Universität Frankfurt am Main
- Abschlussdatum: Dezember 2016
- Redaktion: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Dr. Christiane Röper
Manfred Unglaube
- Redaktionsschluss: Halle (Saale), Februar 2017
- Web-Link der Publikation www.lau.sachsen-anhalt.de
(Wir über uns, Publikationen/Fachpublikationen/Berichte des
LAU/Heft 1-2017)
- ISSN-Nummer: 0941-7281
- Titelfoto: Superzelle
(Foto: ©Thomas Knickmeier/ DWD)

Vorwort



Beobachtete Klimaveränderungen in der Vergangenheit und Gegenwart sowie extreme Witterungsereignisse der letzten Jahre werfen immer wieder Fragen nach der möglichen Entwicklung von Starkregenereignissen verbunden mit Überschwemmung, Hagelschlägen und Blitzschlägen in der Zukunft auf. Solche Ereignisse können zu großen Schäden für die Bevölkerung und Wirtschaft führen.

So interessieren sich zum Beispiel Planer für konvektive Wetterereignisse, die kurz andauernde, heftige Niederschläge auf einem relativ eng begrenzten Gebiet umfassen.

Für die Beantwortung dieser Fragen wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes durch das Institut für Atmosphäre und Umwelt der Goethe-Universität Frankfurt mit Unterstützung des Deutschen Wetterdienstes das räumliche und zeitliche Gefährdungspotenzial durch konvektive Wetterereignisse in Sachsen-Anhalt untersucht.

Methodisch wurde das Gefährdungspotenzial durch eine Kombination von Reanalysedaten für die beobachtete Vergangenheit und Klimamodelldaten für die Zukunft unter Einbeziehung von Ergebnissen aus Niederschlagsradar- und Blitzdaten ermittelt.

Dabei waren die Abschätzung der zukünftigen konvektiven Gefährdung im Klimawandel und das bessere Verständnis der konvektiven Prozesse von wesentlichem Interesse. In die berechnete konvektive Gefährdung gingen die Häufigkeitsverteilung der Großwetterlagen, die Anzahl konvektiv extremer Tage und die räumliche Verteilung von fünf Gefährdungsgrößen (Zellzahl, Starkniederschlagspotential, Sturzflutpotential, Blitzpotential und Hagelpotential) ein.

Im Ergebnis liegen Aussagen für Sachsen-Anhalt vor, aus denen für größere zusammenhängende Gebiete Schlussfolgerungen für das Gefährdungspotenzial in der Gegenwart sowie in der Zukunft abgeleitet werden können.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass aus den Berichtsergebnissen keine Rückschlüsse auf einzelne Gemeinden oder Landkreise möglich sind, da die quantitativen Aussagen einer Unsicherheit unterliegen (z.B. durch Unsicherheiten in der globalen Klimasimulation, aber auch durch Unsicherheiten in den Beobachtungsdaten).

Halle (Saale), 17.02.2017

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. Ehrlich'.

Prof. Dr. Christian Ehrlich
Präsident (m.d.W.d.G.b.)

Abschlussbericht zum Projekt: Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Sachsen-Anhalt

Bodo Ahrens, Stephan Herzog, Erwan Brisson, Christopher Purr
Institut für Atmosphäre und Umwelt
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Altenhöferallee 1, D-60325 Frankfurt am Main
E-Mail: Bodo.Ahrens@iau.uni-frankfurt.de

In Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
(LAU) und in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)

28.11.2016

Zusammenfassung

Das räumliche und zeitliche Gefährdungspotential durch konvektive Wetterereignisse in Sachsen-Anhalt wurde durch eine Kombination von Reanalysedaten und Klimamodelldaten unter Einbeziehung von Ergebnissen aus Niederschlagsradar- und Blitzdaten ermittelt. Dabei waren die Abschätzung der zukünftigen konvektiven Gefährdung im Klimawandel und das bessere Verständnis der konvektiven Prozesse von wesentlichem Interesse. In die berechnete konvektive Gefährdung gingen die Häufigkeitsverteilung der Großwetterlagen, die Anzahl konvektiv extremer Tage und die räumliche Verteilung von fünf Gefährdungsgrößen (Zellzahl, Starkniederschlagspotential, Sturzflutpotential, Blitzpotential und Hagelpotential) ein.

Es zeigte sich im Verlauf der Untersuchung, dass der Niederschlagsradardatensatz geeignet ist, konvektiv extreme Tage zu identifizieren, aber nicht geeignet ist, Klimatologien räumlich differenzierter Gefährdungsgrößen zu erstellen. Daher wurde bei der Berechnung der Gefährdungsgrößen weitgehend das regionale Klimamodell COSMO-CLM (mit einer Gitterdistanz von 1 km) genutzt. Die Großwetterlagen und die Anzahl konvektiv extremer Tage für das zukünftige Klima wurden mit globalen Klimasimulationen der Modelle EC-Earth und MPI-ESM identifiziert. Dabei stützten sich die Ergebnisse stärker auf das EC-Earth, da sich zeigte, dass das MPI-ESM konvektive Luftmassen schlechter abbilden konnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass Großwetterlagen des Typus feuchte Strömung aus Südwest für etwa 75 % der konvektiv extremen Tage der Gegenwart verantwortlich sind. Diese Großwetterlagen treten im Sommerhalbjahr an etwa 30 % der Tage auf. Ihre Häufigkeit nimmt unter Annahme des Treibhausgasemissionsszenarios RCP8.5 bis Ende des 21ten Jahrhunderts auf über 40 % zu. Gleichzeitig ändern sich die Luftmasseneigenschaften, so dass sich in der EC-Earth Klimasimulation die Anzahl der konvektiv extremen Tage pro 30 Jahren von 266 Tagen in der Gegenwart auf 394 Tage (um ~40 %) im Zeitraum 2016 – 2045 und auf 609 (um ~130 %) Tage im Zeitraum 2071 – 2100 erhöht. Wird das optimistische Treibhausgasemissionsszenario RCP2.6 zugrunde gelegt, dann erhöht sich die Anzahl konvektiv extremer Tage auf 357 (um ~34%) im Zeitraum 2016 – 2045 und auf 383 (um ~44 %) im Zeitraum 2071 – 2100. Dies deutet auf eine starke Zunahme der konvektiven Gefährdung im Klimawandel hin.

Die Gefährdung durch Hagelereignisse und Blitzaktivität wird sich dabei nicht wesentlich verändern (außer durch Blitzaktivität in den Landesteilen östlich der Dübener Heide). Zwar nimmt die Anzahl der konvektiven Tage zu, aber die mittlere Hagel- und Blitzgefährdung an den einzelnen extrem konvektiven Tagen nimmt in den meisten Regionen ab. Unter Annahme des Szenarios RCP8.5 nimmt die Hagelgefährdung pro konvektiv extremem Tag in vielen nördlichen Landesteilen, in der Region zwischen Dessau-Roßlau und Magdeburg und in Bereichen des Kreises Wittenberg über 50 % bis Ende des Jahrhunderts ab. Auch die Anzahl der konvektiven Zellen pro konvektiv extremem Tag nimmt in den nördlichen Landesteilen ab, aber leicht zu in den südlichen Landesteilen. Das

Starkniederschlagspotential nimmt räumlich relativ gleichmäßig leicht zu (im Mittel um etwa 3 %) pro konvektiv extremem Tag. Damit werden Starkniederschlagsereignisse landesweit um über einen Faktor zwei wahrscheinlicher. Das Sturzflutpotential, d.h. die Sturzflutgefährdung an einem konvektiv extremen Tag, nimmt in weiten Regionen stark (bis zu 50 %) zu. Da sich außerdem die Anzahl der konvektiv extremen Tage mehr als verdoppelt, wird es vor allem in den Mittelgebirgsregionen und in der Region um Halle (hier aufgrund vermehrter starker Luftmassengewitter) zu häufigeren und stärkeren Sturzflutereignissen kommen.

Der Jahresgang der Gefährdung wird sich nicht verändern. Juli und August werden weiterhin die Monate mit der meisten atmosphärischen Konvektion sein.

Das zentrale Ergebnis des Projekts ist, dass die integrierende Größe konvektive Gefährdung relativ zur Gegenwart 1971 – 2005 im Zeitraum 2016 - 2045 im räumlichen Mittel um 50 % und im Zeitraum 2071 - 2100 um 120 % erhöht sein wird, wenn ein derzeit realistisch erscheinendes Treibhausgasemissionsszenario RCP8.5 (s. Anhang C) angenommen wird. Dabei ist die Gefährdungszunahme in den südlicheren Landesteilen von Zeitz, Naumburg über Halle bis Dessau-Roßlau am höchsten (bis zu 150 %) und um Wernigerode und Stendal etwas geringer (75 bis 100 %). Unter Annahme des optimistischeren Szenarios RCP2.6 könnte der Anstieg bis Ende des Jahrhunderts unter 50 % bleiben. Die hier gemachten quantitativen Aussagen unterliegen einer Unsicherheit (z.B. durch Unsicherheiten in der globalen Klimasimulation, aber auch durch Unsicherheiten in den Beobachtungsdaten), die aber die Tendenz der Aussage nicht verfälscht.

Bei konvektiven Unwettern entstehen häufig stürmische Fallböen. Diese Fallböen können ähnliche Schäden verursachen wie Tornados, die ebenfalls in konvektiven Wettersituationen entstehen. Beide Windphänomene waren in diesem Projekt kein Untersuchungsziel. Es ist aber aufgrund der Ergebnisse plausibel anzunehmen, dass beide Phänomene in der Klimazukunft häufiger und intensiver auftreten. Eine klimatologische Untersuchung dieser höchstdynamischen und sehr kleinräumigen Phänomene bildet ein spannendes zukünftiges Forschungsthema. Aber auch die Darstellung der hier untersuchten Gefährdungsgrößen in Modellen muss verbessert werden, damit sehr lokale Einflüsse, wie beispielsweise der Einfluss einer Veränderung der Landnutzung auf die lokale Blitzaktivität, besser modelliert werden können. Dazu bedarf die Einbindung beobachteter Daten (Fernerkundungsklimatologien mit Niederschlagsradar, Blitz- aber auch Satellitenbeobachtung) weitergehender Forschung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1. Einleitung	7
2. Datengrundlage	9
2.1 Beobachtungsdaten	9
2.2 Modellgestützte Analysen	10
2.3 Modelldaten	11
3. Methodik	15
3.1 Großwetterlagen	15
3.2 Zellverfolgungsalgorithmus	15
3.3 Konvektiv extreme Tage: logistisches Regressionsmodell	18
3.4 Gefährdungsgrößen	19
3.5 Gefährdungskarten	21
3.6 Ablaufdiagramm	22
4. Ergebnisse und Diskussion	25
4.1 Räumliche Verteilung konvektiver Niederschlagszellen aus Radardaten	25
4.2 Räumliche Verteilung konvektiver Niederschlagszellen aus COSMO-CLM	31
4.3 Konvektiv extreme Tage	34
4.4 Statistik der Großwetterlagen	36
4.5 Gefährdungsgröße Blitzpotential aus Beobachtungsdaten	40
4.6 Konvektive Gefährdungsgrößen basierend auf ERA-Interim (Zeitraum 1979 – 2014)	42
4.7 Konvektive Gefährdungsgrößen basierend auf Klimasimulationen für die Gegenwart (1972 – 2005) und die Zukunft (2071 – 2100, RCP8.5)	46
4.8 Gefährdungskarten	52
Danksagung	57
Literaturverzeichnis	58
Anhang A: Kennzahlen und Kennungen der 40 objektiven Wetterlagen	60
Anhang B: Aspekte der Berechnung der Gefährdungskarten	61
Anhang C: CO₂-Emissionen	64

1. Einleitung

Atmosphärische Ereignisse, insbesondere Unwetter, haben ein großes Schadenspotential für Wirtschaft und Bevölkerung. Eine Vielzahl dieser Ereignisse geht auf den Prozess der Konvektion zurück, welche kleinräumige und kurzlebige (bis zu wenige Stunden andauernde) Unwetter hervorrufen kann. Mit diesen Unwettern gehen Starkregen, lokale Überschwemmungsereignisse, Hagelschläge, Blitzschläge und starke Winde einher. Ein besseres Verständnis des Gefährdungspotentials durch konvektive Wetterereignisse im gegenwärtigen und zukünftigen Klima kann daher ökologische, wirtschaftliche und soziale Schäden vermindern helfen.

Der vorliegenden Studie liegt daher folgende Fragestellung zugrunde:

Wie ist die Gefährdung durch konvektive Unwetter in Sachsen-Anhalt räumlich verteilt und wie ist deren Änderung im Kontext des Klimawandels einzuschätzen?

Konvektion ist ein Energie- und Massetransport in einem Medium, infolgedessen dieses durchmischt wird. In der Erdatmosphäre ist die Konvektion üblicherweise für den ausgleichenden Transport von sensibler und latenter Wärme vom Boden in höhere Schichten der Atmosphäre verantwortlich. Die Auslösung von Konvektion kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Eine Trockenthermik beispielweise ist durch die Erwärmung des Erdbodens und der untersten atmosphärischen Schicht verursacht. Hierbei sinkt die Dichte der Luftmasse im Vergleich zur Umgebungsluft, woraufhin ein Aufsteigen der Luftmasse ausgelöst wird. Für hochreichende Konvektion mit längerer Lebensdauer und mit Unwetterpotential müssen weitere Bedingungen erfüllt sein. Nach Johnson und Mapes (2001) braucht es neben einer ausreichenden Labilität einen hinreichenden Feuchtegehalt, einen Hebungsantrieb und eine Dynamik in der Atmosphäre, die Konvektion begünstigt. Je besser diese Bedingungen erfüllt sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für konvektive Ereignisse mit Unwetterpotential. Fragen, die sich daraus für das Projekt ergeben, betreffen vor allem den Einfluss der Landoberfläche (insbesondere der Orographie) und des Klimawandels auf die Häufigkeit und Intensität der atmosphärischen Konvektion.

Da ausschließlich die konvektive Gefährdung Gegenstand der Untersuchung ist, wird nicht das konvektive Risiko, sondern die Gefährdungskomponente des Risikos betrachtet. Insgesamt setzt sich das Risiko aus der Vulnerabilität, der Exposition und der Gefährdung zusammen (IPCC 2001).

Die gestellten Fragen wurden durch Analyse verfügbarer Beobachtungsdaten, die Informationen über Unwetter bereitstellen (wie Niederschlagsradar- und Blitzbeobachtungen), und durch Klimasimulationen (mit einem regionalen Klimamodell für Sachsen-Anhalt mit einer horizontalen Gitterdistanz von 1 km) bearbeitet. Über diese Datengrundlagen wird in Kapitel 2 berichtet. Die Auswertemethoden werden in Kapitel 3 eingeführt. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse, d.h. die räumliche Verteilung verschiedener

konvektiver Gefährdungsgrößen (wie beispielsweise das Sturzflut- oder Blitzpotential) und der aus allen Gefährdungsgrößen aggregierten konvektiven Gefährdung, gezeigt und diskutiert. Konvektive Windphänomene wie Fallböen und Tornados, die große Schäden verursachen, waren nicht zur Bearbeitung vorgesehen, da die Erstellung von Klimatologien dieser höchstdynamischen und komplexen Phänomene den zeitlichen und finanziellen Rahmen gesprengt hätte. Ein letztes Kapitel fasst die aus dem Projekt möglichen Schlussfolgerungen über die Entwicklung der konvektiven Gefährdung in Sachsen-Anhalt zusammen.

2. Datengrundlage

Die konvektive Gefährdung wurde aus langjährig verfügbaren Radar- und Blitzbeobachtungen einerseits und aus modellgestützten Analysen und Modellsimulationen andererseits bestimmt. Diese Informationsquellen werden hier eingeführt und diskutiert.

2.1 Beobachtungsdaten

In dieser Untersuchung wurden zwei Fernerkundungsdatensätze verwendet: Radar- und Blitzbeobachtungen. Beide Datensätze sind für viele Beobachtungsjahre mit hoher räumlicher und hoher zeitlicher Beobachtungsfrequenz verfügbar. Diese Eigenschaften sind notwendig, um eine Klimatologie konvektiver Phänomene erstellen zu können. Beispielsweise ist es mit Niederschlagsbeobachtungen an den Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes nicht möglich, konvektive Niederschlagszellen repräsentativ zu erfassen (d.h. viele Zellen werden nicht bzw. in ihrer Zugbahn nur punktuell erfasst), da diese zu kurzlebig und zu kleinräumig sind. Die beiden Fernerkundungsdatensätze werden hier kurz eingeführt und diskutiert.

Radardaten

Niederschlagsradare werden verwendet, um mit Mikrowellen Hydrometeore zu detektieren. Sie senden Signale aus und empfangen den Signalanteil, der an den Hydrometeoren in der Atmosphäre reflektiert wird. Je stärker das reflektierte Signal ist, desto stärker ist die Niederschlagsintensität. Innerhalb des Projekts wurde das Radarprodukt RZ des Deutschen Wetterdienstes verwendet, welches auf einem Gitter von 1100 x 900 km² vorliegt und das Projektgebiet für den Zeitraum von Januar 2001 bis Dezember 2014 abdeckt. Die Radardaten des RZ-Produkts besitzen eine räumliche Auflösung von 1 km und eine zeitliche Auflösung von 5 Minuten. Die hohe raumzeitliche Datenauflösung ist notwendig, um kleinräumige, schnellziehende konvektive Niederschlagszellen mittels Radar zu beobachten. Diese Anforderung an die Auflösung hat den Nachteil, dass kein an Niederschlagsbeobachtungen durch Niederschlagsstationen angeeichtes Radarprodukt (wie z.B. das Radarprodukt des Routineverfahrens RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) des Deutschen Wetterdienstes mit stündlicher Auflösung) verwendet werden konnte.

Niederschlagsradare empfangen häufig Fehlsignale (sog. Fehlechos, Olbrück 1975, Sauvageot 1992) durch Signalreflexionen (beispielsweise an hohen Gebäuden, Bergen oder Windrädern). Diese Fehlechos werden als Niederschlagsspitzen fehlinterpretiert und üblicherweise in operationellen Radarprodukten ortsspezifisch herausgefiltert. Dies kann dazu führen, dass beispielsweise über den Mittelgebirgen Niederschlag systematisch unterschätzt wird. In diesem Projekt wurde daher das ungefilterte RZ-Radarprodukt verwendet, welches zwar ungefiltert ist und daher die Niederschlagsunterschätzung durch Filterung vermeidet, aber eben Fehlechos enthält. Da hier nur dynamische Niederschlagszellen betrachtet wurden, waren Fehlechos an stationären Hindernissen unkritisch.

Blitzdaten

Die Blitzdaten, die innerhalb des Projekts analysiert wurden, stammen vom „Blitz InformationsDienst Siemens“ (BLIDS) und wurden vom Projektpartner LAU für die Jahre 1992 - 2014 beschafft. Bei der Blitzmessung werden über 148 Stationen des europaweiten Messnetzes („European Cooperation for Lightning Detection“, EUCLID) eingesetzt. Die Detektion beruht auf dem Time-Of-Arrival Prinzip und ermöglicht sekundengenaue Messungen mit einer horizontalen Genauigkeit von 200 m. Die Position der Blitze wird hierbei über die Differenz der Detektionszeiten an verschiedenen Messorten und die Lichtgeschwindigkeit berechnet. Damit eine möglichst exakte Messung gewährleistet wird, werden die Sensoren fortwährend über GPS-Signale synchronisiert. Das Verfahren ermöglicht außerdem die Unterscheidung zwischen Wolke-Wolke- und Wolke-Erde-Blitzen. Im Projekt wurde diese Unterscheidung nicht durchgeführt und der gesamte Blitzdatensatz in die Berechnung der Unwettergefährdung einbezogen, da a) die räumlichen Muster der Blitzvarianten sehr ähnlich sind und b) die Unterscheidung sowohl größere Unsicherheiten im verwendeten Blitzdatenprodukt als auch kleinere Stichproben zur Folge gehabt hätte.

2.2 Modellgestützte Analysen

Modellgestützte Analysen kombinieren verfügbare Beobachtungsdaten mit Modellsimulationen, um die beste Schätzung für den Zustand der Atmosphäre zu bestimmen. Diese Analysen werden von den Wetterdiensten operationell durchgeführt, aber auch mit historischen Beobachtungsdaten für vergangene Jahrzehnte prozessiert. Diese Analysen, die mit homogenen Methoden für einen historischen Zeitraum erstellt werden, werden Reanalysen genannt, haben eine typische horizontale Gitterauflösung von 100 km und sind ein wichtiges Hilfsmittel in der Klimatologie. Im Projekt wurden Reanalysedaten unter anderem dazu verwendet, Wetterlagen und potentiell konvektive Tage (Tage mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für konvektive Aktivität) zu bestimmen.

ERA-Interim

Bei der verwendeten Reanalyse ERA-Interim des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (Dee et al. 2011) handelt es sich um einen global verfügbaren Datensatz atmosphärischer Parameter, der bis Januar 1979 zurückreicht. Die zeitliche Auflösung beträgt für bodennahe Parameter 3 Stunden und für Parameter der oberen Schichten der Atmosphäre 6 Stunden. Die Daten liegen auf einem räumlichen Gitter mit horizontalen Gitterpunktabständen von ca. 80 km und mit 60 Höhenniveaus (von der Erdoberfläche bis in 0.1 hPa Höhe) vor. ERA-Interim-Daten wurden u.a. verwendet, um Großwetterlagen und konvektive Tage des Zeitraums 1979 bis heute zu detektieren und das Ausschnittsklimamodell COSMO-CLM anzutreiben.

NCEP Winddaten

Die Winddaten der Reanalyse des „National Centers for Environmental Prediction“ (NCEP) wurden verwendet, um bei der Verfolgung konvektiver Niederschlagszellen (s. Abschnitt 3.1) in den Radarbeobachtungen die Position der Zellen im nächsten Zeitschritt zu prognostizieren. Die Daten liegen alle sechs Stunden auf einem Gitter mit horizontalen Gitterpunktabständen von ca. 200 km auf 17 vertikalen Schichten vor (Kalnay et al. 1996). Es wurden NCEP-Daten des Zeitraums 2001 bis 2014 verwendet.

2.3 Modelldaten

Klimamodelle sind ein essentielles Werkzeug in der Klimaforschung, da mit ihrer Hilfe das Klima der Erde simuliert werden kann und durch Berechnung von Klimaprojektionen eine Einschätzung zukünftiger Änderungen im Klimasystem gegeben werden kann. Im Projekt wurden Simulationsdaten globaler Klimamodelle und Simulationen mit einem räumlich sehr fein auflösenden, sog. konvektionserlaubenden regionalen Klimamodell verwendet. Bei Simulationen mit Klimamodellen werden für Perioden der jüngeren Vergangenheit bzw. Gegenwart beobachtete Treibhausgaskonzentrationen verwendet. Für zukünftige Perioden wurden zwei verschiedene Szenarien des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (<http://www.ipcc.ch>) der Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen verwendet: das Treibhausgasszenario RCP8.5 (Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration bei angenommenem anthropogenen Strahlungsantrieb von 8.5 W/m^2 im Jahr 2100), da dieses den derzeitigen Entwicklungen am nächsten liegt, sowie das optimistischere Treibhausgasszenario RCP2.6 (Anstieg des angenommenen anthropogenen Strahlungsantriebs auf $\sim 3 \text{ W/m}^2$ und danach eine Reduktion auf 2.6 W/m^2 im Jahre 2100). Abbildung C1 in Anhang C zeigt den Emissionsverlauf der Szenarien und der historischen Emissionen. Ein Vergleich mit den historischen Daten zeigt, dass das pessimistischere Szenario RCP8.5 näher an den tatsächlichen Emissionen der letzten Jahre liegt als das Szenario RCP2.6.

Die globalen Klimamodelle, deren Simulationen verwendet wurden, sind das EC-Earth und das MPI-ESM; das regionale Klimamodell ist das COSMO-CLM. Eine kurze Vorstellung dieser Modelle folgt.

Globales Klimamodell EC-Earth

Das Klimamodell EC-Earth ist das Erdsystemmodell des EC-Earth Konsortiums (<https://www.ec-earth.org>, Hazeleger et al. 2012). Die hier verwendeten Simulationen wurden für das „Climate Model Intercomparison Project Phase 5“ (CMIP5, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) erstellt. Dabei wurde eine horizontale Gitterdistanz des Modells von ca. 120 km und 62 vertikale Schichten verwendet. Die Simulationen sind auf den CMIP5 Datenservern frei verfügbar. Im Projekt wurden Simulationsdaten für die Perioden 1972 bis 2005, 2016 bis 2045 und 2071 bis 2100 verwendet.

Globales Klimamodell MPI-ESM

Das Klimamodell MPI-ESM ist eine Entwicklung des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M, <http://www.mpimet.mpg.de>) und ebenfalls ein Erdsystemmodell (ESM) mit gekoppeltem Ozean, dynamischer Vegetation und weiteren wichtigen Modellkomponenten (Giogetta et al. 2013). Die verwendete Simulation wurde ebenfalls für das CMIP5 berechnet, wobei die horizontale Gitterdistanz ca. 200 km bei 47 vertikalen Schichten gesetzt wurde. Die atmosphärische Modellkomponente basiert auf dem Modell ECHAM6 (Akronym aus ECMWF und Hamburg, Version 6). Im Projekt wurden ebenfalls Simulationsdaten für die Perioden 1972 bis 2005, 2016 bis 2045 und 2071 bis 2100 verwendet.

Regionales Klimamodell COSMO-CLM

Die vorliegenden Ergebnisse basieren stark auf Simulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM des „Consortium for Small-scale MOdelling in CLimate Mode“ (<http://www.clm-community.eu>). Das COSMO-CLM ist die Klimaversion des COSMO (<http://www.cosmo-model.org>), welches in hoher räumlicher Auflösung für die operationelle Wettervorhersage, beispielsweise beim Deutschen Wetterdienst, eingesetzt und weiterentwickelt wird. Die Arbeitsgruppe *Mesoskalige Meteorologie und Klima* an der Universität Frankfurt hat sehr gute Erfahrungen bei der Simulation konvektiver Phänomene mit dem Modell COSMO-CLM gemacht (z.B. Brendel et al. 2014, Brisson et al. 2016).

Für Untersuchungen konvektiver Phänomene sind Simulationen notwendig, bei denen konvektive Prozesse im Modell nicht parametrisiert werden müssen, sondern deren Dynamik explizit simuliert wird (Brisson et al. 2017). Dies bedeutet, dass die Gitterabstände kleiner als 4 km sein müssen. Testrechnungen ergaben, dass die besten Ergebnisse mit einem horizontalen Gitterabstand von 1 km und einem aufwendigen Wolken-Niederschlagsschema mit Graupel- und Hagelberechnung erreicht werden. In den Simulationen wurde eine neue Parametrisierung des Blitzpotentials getestet und verwendet. Die Abb. 1 zeigt das Rechengebiet der 1-km COSMO-CLM-Rechnungen und die verwendete hochaufgelöste Orographie.

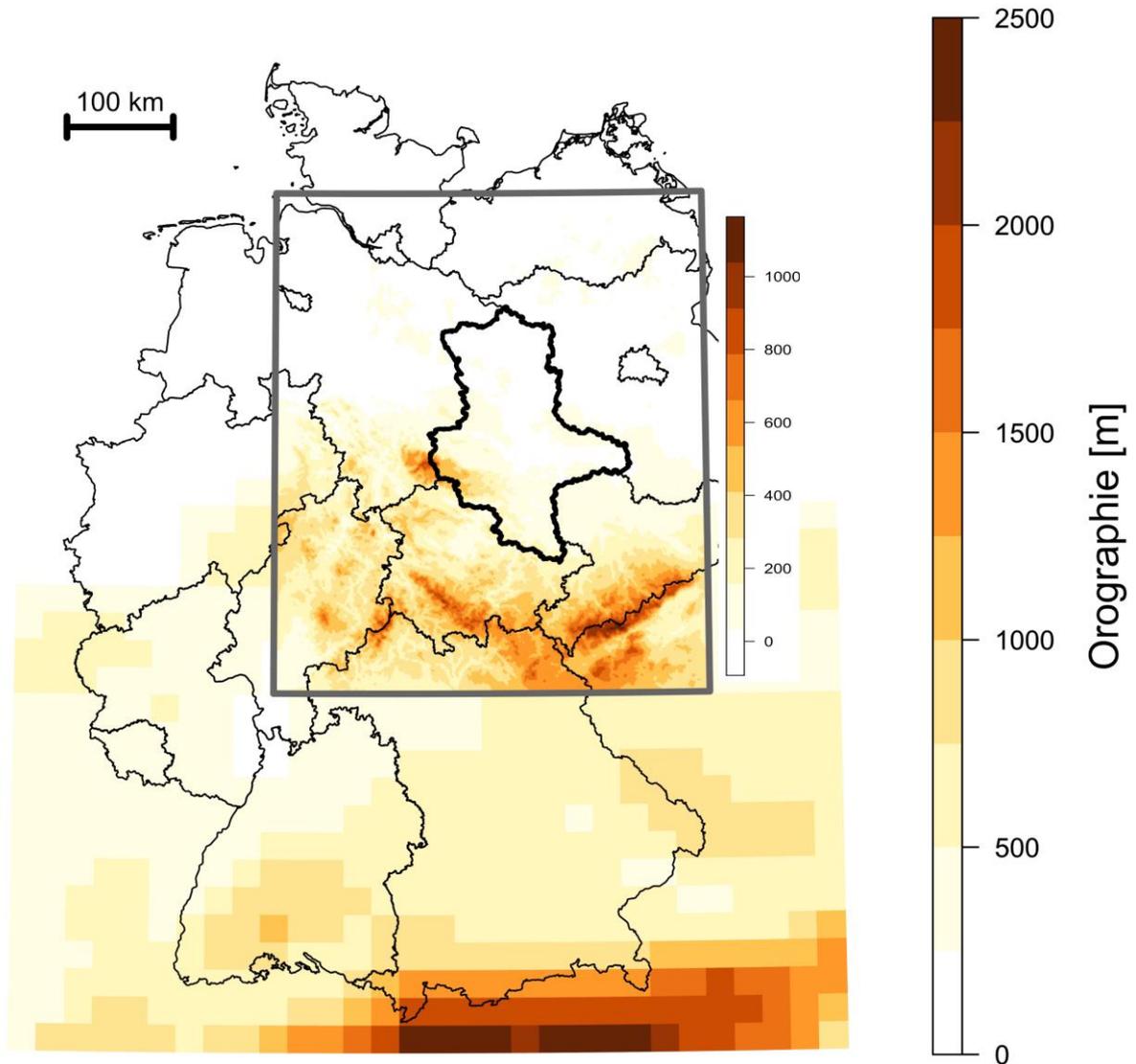


Abb. 1: Simulationsgebiet des 1-km COSMO-CLM mit 1-km Orographie (eingerahmt) und die 25-km Orographie, die in der größeren äußeren COSMO-CLM Simulation verwendet wurde.

Die sehr hohe Gitterauflösung hat einerseits zur Folge, dass der Skalensprung von den antreibenden globalen Klimamodellen zu den 1-km Simulationen sehr groß ist und andererseits die Simulationen sehr rechen- und speicherintensiv sind. Ersteres Problem des sehr großen Skalensprungs wurde gedämpft, indem eine COSMO-CLM Klimasimulation mit einer Gitterauflösung von 25 km zwischengeschaltet wurde, die von den verschiedenen globalen Datensätzen angetrieben wurde und dann wiederum Antriebsdaten für die hochauflösenden Simulationen liefert. In Abb. 1 wird außerhalb des 1-km Rechengebiets die dafür verwendete gröbere Orographie gezeigt. Zweites wurde berücksichtigt, indem mit COSMO-CLM in der 1-km Version nur konvektiv extreme Ereignisse simuliert wurden. Die Vorlaufzeit (um ein Einschwingen der Modelllösung nach der Initialisierung zu erlauben) betrug hierbei 12 Stunden. Auf die Methode zur Auswahl dieser konvektiv extremen Ereignisse wird im folgenden Kapitel (Abschnitt 3.3) eingegangen.

3. Methodik

Wie bereits angesprochen, müssen extreme, stark konvektive Ereignisse detektiert werden, konvektive Niederschlagszellen identifiziert, deren Eigenschaften bestimmt und weitere Parameter (z.B. Hagel- und Blitzhäufigkeit) quantifiziert werden. Dazu wurden Methoden angewendet, die weitgehend bereits in Brendel et al. (2009, 2014) beschrieben wurden. Daher werden sie hier nur dann im Detail dargestellt, wenn sie im Rahmen dieses Projekts verbessert wurden.

3.1 Großwetterlagen

Großwetterlagen dienen zur Stratifizierung und Interpretation der konvektiven Ereignisse. Beispielsweise ist eine konvektive Wetterlage bei Anströmung aus Südwest in Mitteleuropa wahrscheinlicher als bei Anströmung aus Nordost. Im Projekt wurde das Wetter mit dem Algorithmus nach Bissolli und Dittmann (2001) in Wetterlagen eingeteilt. Damit ließen sich für gewählte Perioden beispielsweise Wetterlagenstatistiken bestimmen. Dazu wurde die Auswertung auf Mitteleuropa fokussiert. Eingangsdaten in den Klassifikationsalgorithmus waren sowohl ERA-Interim Reanalysen für das tatsächliche Wetter und globale Klimasimulationsdaten. Wichtige Kriterien zur Klassifikation sind die vier Hauptwindrichtungen für Mitteleuropa (Nordost, Südost, Südwest und Nordwest), die Zyklonalität auf zwei Höhenniveaus (950 hPa und 500 hPa) und das Vorherrschen einer feuchten oder trockenen Luftmasse. Hieraus ergeben sich 40 Großwetterlagen (s. Anhang A). Die Kennung der einzelnen Wetterlagen setzt sich wie folgt zusammen: Die ersten beiden Buchstaben beziehen sich auf die Anströmung (z. B. ‚SW‘ für Südwest), die weiteren beiden Buchstaben geben die Zyklonalität der beiden Höhen an (z.B. ‚AZ‘ für antizyklonal in 950 hPa und zyklonal in 500 hPa oder ‚ZZ‘ für zyklonal in 950 hPa und in 500 hPa) und zuletzt wird mit T (trocken) oder F (feucht) der Feuchtindex angegeben. Mit ‚XX‘ beginnt die Kennzeichnung jener Großwetterlagen, bei denen die Anströmung nicht aus einer der vier Hauptrichtungen erfolgt.

3.2 Zellverfolgungsalgorithmus

Ein wesentliches Werkzeug der Untersuchung war ein Zellverfolgungsalgorithmus, der konvektive Niederschlagszellen identifiziert und dann im Raum von Radarbild zu Radarbild bzw. zwischen simulierten Niederschlagsfeldern mit einem zeitlichen Abstand von 5 min verfolgt. Dadurch können Zellen und ihre Eigenschaften (z.B. Lebensdauer und mittlere Niederschlagsintensität) in ihrem Lebenszyklus quantifiziert werden. Der hier verwendete Algorithmus basiert auf Steinacker et al. (2001) und wurde von Brendel et al. (2009, 2014) weiterentwickelt.

Für die Identifikation der Niederschlagszellen werden die Niederschlagsfelder zunächst mit einem zweidimensionalen Gaußfilter (Glättungsparameter 0.85 Gitterdistanzen) geglättet, um sekundäre Zellkerne (d.h. Nebenmaxima größerer Zellen) nicht als Einzelzellen zu

identifizieren. Eine Zelle gilt als identifiziert, wenn ihr Kern eine Intensität gleich oder größer 8.12 mm/h (bzw. 35 dBZ im Radarbild) erreicht und eine größere Intensität als alle Nachbarwerte hat. Um stratiforme (d.h. nichtkonvektive, raumzeitlich glattere) Niederschläge auszuschließen, werden noch Anforderungen an die Feldrauigkeit gestellt (Steinacker et al. 2000).

Abbildung 2 zeigt beispielhaft die beobachtete Niederschlagsintensität am 11. September 2011 in einem 5-min Zeitfenster um 15:45 Uhr Ortszeit. Deutlich sichtbar sind die starken Gewitterzellen zwischen Halle und Magdeburg, die an der Autobahn 14 bei Plötzkau zu Überschwemmungen und Bodenerosion führten (s. H. Helbig: Überschwemmungen und Bodenerosion an der A 14 bei Plötzkau (Salzlandkreis) am 11. September 2011, [http://www.lagb.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/LaGB/boden/pdf/](http://www.lagb.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/LaGB/boden/pdf/Fallbeispiel_Bodenerosion_A14_Ploetzkau.pdf)

Fallbeispiel_Bodenerosion_A14_Ploetzkau.pdf). Die vom beschriebenen Zellalgorithmus identifizierten konvektiven Niederschlagszellen sind mit einem Punkt gekennzeichnet. Deutlich zu sehen ist der räumlich homogenere stratiforme Niederschlag in westlichen Landesteilen, der nicht so hohe Intensitäten erreicht. Rund um das Radar Ummendorf (Kreuz in der Abb. 2) sind Fehlechos zu erkennen.

Radar: 11.09.11 15:45

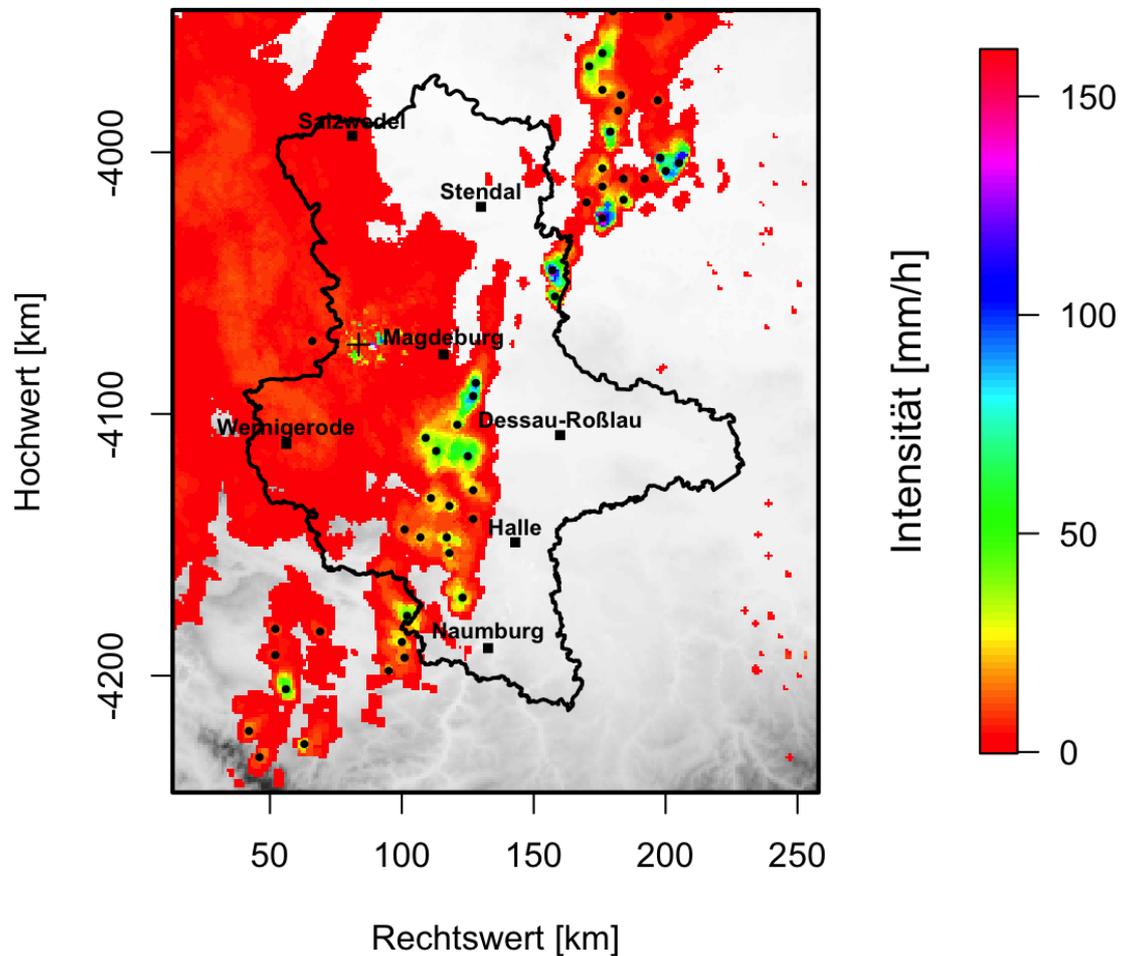


Abb. 2: Niederschlagsintensität und identifizierte konvektive Niederschlagszellen (schwarze Punkte) im Radarbild vom 11. September 2011, 15:45 Uhr. Der Radarstandort Ummendorf ist mit einem Kreuz gekennzeichnet.

Im nächsten Schritt des Algorithmus werden Zellen auf einer Zeitscheibe benachbarten Zellen auf der nächsten (5 min späteren) Zeitscheibe zugeordnet. Ketten von Zellen in Raum und Zeit werden als Zellzugbahnen identifiziert. Um die Verlagerung der Niederschlagszellen von einer Zeitscheibe zur nächsten Zeitscheibe zu berücksichtigen, wurden für die Zellidentifikation aus Radardaten die NCEP-Winddaten (s. Abschnitt 2.2) herangezogen. Zuvor wurden die sechsständlichen NCEP-Werte auf stündliche Werte linear interpoliert. Nach Klose (2008) wurde angenommen, dass sich die Zellkerne im Windfeld mittlerer Höhe fortbewegen. Deshalb wurden die Winddaten der NCEP-Reanalyse dreier Höhengniveaus (entsprechend den Druckniveaus 850 hPa, 700 hPa und 500 hPa) verwendet. Der vorliegende Standort spannt zusammen mit dem Windvektor einen Suchradius auf. Liegt der Standort der Zelle im nächsten Zeitschritt innerhalb dieses Radius und am nächsten am Zentrum, so wird er zusammen mit den vorhergehenden Standorten einer Zellzugbahn

zugeordnet. Die Gitterpunkte des 1-km Auswertungsgitters auf den Verbindungslinien der Zellstandorte werden der Zellzugbahn zugeordnet. Im Falle der simulierten Niederschlagsfelder wurden die Windfelder aus den Simulationen verwendet.

Ein Vorteil der Betrachtung von Zellzugbahnen ist, dass stationäre Fehlechos in den Radardaten herausgefiltert werden. Es zeigte sich im Projektverlauf, dass es in einer Region mit hoher Dichte an Windkraftanlagen in der Nähe des Radars Ummendorf zu Phantomzugbahnen kommt, wenn der obige Algorithmus angewendet wird. In der Sequenz der Radarbilder erfolgt ein Aufflackern von Fehlechos an nahe beieinanderliegenden Gitterzellen, die als kurze Zellzugbahnen interpretiert wurden. Daher musste ein zusätzlicher Filter entwickelt werden. Dieser basiert auf einer Klimatologie der Zellzugbahnen. Es werden Gitterpunkte der Klimatologie markiert, die außergewöhnlich häufig (empirisch bestimmt) auf den Zugbahnen kurzlebiger (max. 15 min) Zellen liegen. Dann werden Zugbahnen, die ausschließlich auf solchen Gitterpunkten detektiert werden, als Phantomzugbahnen detektiert und nicht weiter betrachtet. Dieses Verfahren kann zu einer leichten, systematischen Unterschätzung der Zellzugbahndichten an solchen Gitterpunkten führen.

3.3 Konvektiv extreme Tage: logistisches Regressionsmodell

Radarbeobachtungen, mit deren Hilfe eine konvektive Gefährdung direkt berechnet werden kann, liegen nur für die Jahre 2001 bis 2014 vor. Es sollten aber auch konvektiv extreme Tage vor diesem Zeitraum aus Reanalysedaten und vor allem auch Tage in globalen Klimasimulationen für die nähere Vergangenheit und die Zukunft identifiziert werden. Diese Tage wurden im Projekt beispielsweise den verschiedenen Großwetterlagen zugeordnet.

Für die Identifikation extremer Tage wurde ein statistisches Modell entwickelt, welches gegen extreme konvektive Tage trainiert wurde, welche aus den Radarbeobachtungen bestimmt wurden (Tage mit >100 identifizierten Niederschlagszellen mit mehr als 10 mm/h Intensität; Tage hoher Ränge des Produkts aus Intensitätsmedian und Anzahl, des 90sten Perzentsils, der mittleren Zugbahnlänge und niedriger Ränge bezüglich der mittleren Zugbahngeschwindigkeit). Das statistische Verfahren ist ein logistisches Regressionsmodell.

Aus den atmosphärischen Daten der Reanalyse ERA-Interim wurden zunächst 303 in der Literatur beschriebene Konvektionsindikatoren (Prädiktoren) berechnet. Diese Anzahl wurde auf einen optimalen Satz von 9 Prädiktoren reduziert (große Trefferzahl extremer Tage bei gleichzeitig möglichst geringer Anzahl Prädiktoren). Die ausgewählten Prädiktoren sind die relative Feuchtigkeit in 700 hPa, der Gradient der Relativen Feuchtigkeit in 500 hPa, die Feuchtigkeit in 500 hPa, der Gradient des Delta Index, der Gradient des Jefferson Index, der Gradient des virtuellen SHIP Index, der Gradient des virtuellen Blitzpotential Index (LPI), der Virtuelle CAPE Index und der mittlere ostwärts gerichtete Wind in 850 hPa.

Ein wichtiger Aspekt des Trainings des statistischen Modelles ist der verwendete Satz von Evaluationsmaßen. Hier wurden drei übliche Maße verwendet, die sich aus der Kontingenztafel einer binären Größe wie „Extremer Tag“ bestimmen lassen. Diese sind die „Probability of Detection“ (*POD*, Wertebereich [0,1] mit dem Wert 1 für das perfekte

Modell), die „False Alarm Rate“ (*FAR*, ebenfalls mit dem Wertebereich $[0,1]$ aber dem Wert 0 für das perfekte Modell) und der „Heidke Skill Score“ (*HSS*, mit dem maximalen Wert 1 für das perfekte Modell und Werten größer 0 für Modelle, die besser als eine zufällige Auswahl sind).

3.4 Gefährdungsgrößen

Aus den beschriebenen Datensätzen wurden mit Hilfe der beschriebenen Methoden verschiedene konvektive Gefährdungsgrößen bestimmt. Diese Variablen ergaben sich aus vorangegangenen Projekten und der Diskussion mit Projektbeteiligten. Die Variablen beschreiben verschiedene Potentiale für Gefährdung durch konvektive Phänomene in der Atmosphäre, welche in gewichteter Form in die Gefährdungskarten eingehen. Die Variablen wurden auf einem Gitter mit 1 km Gitterdistanz berechnet und sind Zellzahl, Starkniederschlags-, Sturzflut-, Blitz- und Hagelpotential.

Zellzahl

Die Gefährdungsgröße Zellzahl ist die Gesamtzahl aller identifizierten konvektiven Zellen mit einer Niederschlagsintensität über 8.12 mm/h in der betrachteten Zeitperiode. Der Schwellenwert von 8.12 mm/h (entsprechend der Intensitätsstufe 35 dBZ der Radarreflektivität) wurde gewählt, um nur signifikante konvektive Ereignisse, aber dennoch eine ausreichende Anzahl von Zellen zu berücksichtigen (Untersuchungen am Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes haben gezeigt, dass Ereignisse größer als 30 mm/h auf Dauerstufen von 5 min nur etwa ein bis zweimal pro Jahr beobachtbar sind).

Starkniederschlagspotential

Das Starkniederschlagspotential *SP* ist die mittlere extreme Niederschlagsintensität I_n ($I_n > 8.12$ mm/h) aller N identifizierten konvektiven Niederschlagszellen:

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

Zusätzlich zur einfachen Quantifizierung potentiell gefährlicher Zellkerne mit der Zellzahl liefert das Starkniederschlagspotential eine Information über die Ausprägtheit dieser Zellen.

Sturzflutpotential

Das Sturzflutpotential *SFP* ist das mittlere Verhältnis von Niederschlagsintensität I_n ($I_n > 8.12$ mm/h) und der Zuggeschwindigkeit V_n eines Zellkerns nach

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

Im Vergleich zu den beiden vorhergehenden Potentialen gibt diese Größe Informationen darüber, wie groß die Auswirkung einer Zelle auf eine Region ist. Ein hoher Wert ergibt sich beispielsweise bei geringer Verlagerungsgeschwindigkeit und hoher Intensität, was gleichbedeutend ist mit einem erhöhten potentiellen Risiko für lokale Sturzfluten.

Die Detektion der Zellen, die für die Bestimmung der obigen Potentiale ausgewertet werden, erfolgte mit dem oben beschriebenen Zellverfolgungsalgorithmus entweder aus Radarbeobachtungen oder aus Simulationen mit dem Modell COSMO-CLM mit einer Gitterauflösung von 1 km.

Blitzpotential

Das Blitzpotential ist im Falle der Auswertung der verfügbaren Blitzdaten die Anzahl der aufgetretenen Blitze. Für die Simulationsdaten wurde mit COSMO-CLM ein „Lightning Potential Index“ (*LPI*) berechnet. Für die simulierten Indexwerte wurde ein Schwellwert im Vergleich mit Beobachtungen festgelegt, ab dem Blitze simuliert wurden. Indexwerte größer als dieser Schwellwert wurden in einer Vergleichsperiode linear gegen die Anzahl der Blitzbeobachtungen korrigiert und als simulierte Blitzzahl interpretiert.

Hagelpotential

Ein häufig verwendetes Verfahren, Hagelereignisse zu detektieren, ist (mangels direkter Beobachtungen) Niederschlagsintensität größer 55 dBZ im Radarbild als Hagelereignis zu interpretieren. Dieses Vorgehen führte in der Region Sachsen-Anhalt zu unplausiblen Ergebnissen (s. Kapitel 4). Daher wurde auf ein mit COSMO-CLM simuliertes Hagelpotential zurückgegriffen. Mit COSMO-CLM treten Hageltage in $16 \times 16 \text{ km}^2$ Gitterflächen auf, wenn durch das Zwei-Momenten-Schema für Wolkenmikrophysik nach Seifert und Beheng (2005) eine akkumulierte Hagelmasse größer als 0.005 kg/m^2 simuliert wird. Dies entspricht einem Äquivalent von etwa 10 Hagelkörnern mit einem Durchmesser vom 1 cm pro Quadratmeter. Dieser Schwellwert wurde empirisch gewählt, so dass die Anzahl an Hagelereignissen den vom Radar beobachteten ähnelt.

In späteren Abschnitten sind die gezeigten Werte der Gefährdungsgrößen immer pro konvektiv extremem Tag angegeben (außer es wird explizit anders angegeben). In Karten gezeigte Werte der Gefährdungsgrößen wurden auf ein Gitter mit 16 km Gitterdistanz gemittelt, um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen. Die Zugbahnen konvektiver Zellen beispielsweise zeigen auf der Auflösung von 1 km ein sehr raues Netz von Linien, deren genaue Lage aufgrund der Unsicherheiten sowohl in den Radarbeobachtungen aber vor allem auch in den Modellsimulationen nicht interpretierbar ist. Wie später im Ergebnisteil dieses Berichtes noch diskutiert wird, sollten verschiedene Größen auch auf dem Gitter mit der größeren 16 km Gitterdistanz nicht überinterpretiert werden, da die konvektiven

Extreme selten sind und daher eine zeitliche Mittelung je nach Gefährdungsgröße nicht robust ist.

3.5 Gefährdungskarten

Aus den Einzelkarten der verschiedenen Gefährdungsgrößen wurden für bestimmte Klimaperioden (abhängig von den Datenquellen wie z.B. Reanalyse oder Klimasimulation) Gefährdungskarten erstellt. Hierfür kamen drei Methoden zum Einsatz. In alle Methoden gehen die aus COSMO-CLM-Simulationen gewonnenen, entdimensionierten Gefährdungsgrößen ein. Dazu werden die einzelnen Gefährdungsgrößen i_C^P (wie z. B. Hagel-, Blitzpotential etc.) an den jeweiligen Gitterpunkten in der Periode P (ERA-Interim: 1979-2014, EC-Earth bzw. MPI-ESM: 1972-2005, 2016-2045 oder 2071-2100) über die Großwetterlagenklasse C (für „circulation type“, $C = 1, \dots, 4$) gemittelt und entdimensioniert zur entdimensionierten Gefährdungsgröße I mit

$$I_C^P = \frac{i_C^P}{\text{Mittel}(i^{P=1})}$$

wobei der Nenner die mittlere Gefährdungsgröße der ERA-Interim-Periode über alle Großwetterlagenklassen der ersten Periode ist. Dadurch werden die Gefährdungsgrößen mit verschiedener Dimension vergleichbar. Die Werte aller Gefährdungsgrößen sind gleich oder größer Null.

Die Gefährdungsgrößen werden mit der relativen Häufigkeit f^P der ausgewählten konvektiven Tage gewichtet. Die Häufigkeit f^P ist das Verhältnis der Anzahl ausgewählter Tage d („selected days“) und der Gesamtanzahl der Tage D der Periode P nach

$$f_C^P = \frac{d_C^P}{D_C^P}$$

in der jeweiligen Großwetterlagenklasse C .

Außerdem werden die Gefährdungsgrößen mit der relativen Häufigkeit F_C^P einer bestimmten Großwetterlagenklasse in einer betrachteten Periode gewichtet.

Methode 1: Großwetterlagenstatistik

Die erste verwendete Berechnungsmethode der Gefährdungsänderung beruht ausschließlich auf der Änderung der Großwetterlagenstatistik. Diese erste Methode sieht vor, dass sowohl für die einzelnen entdimensionierten Gefährdungsgrößen I , als auch für die relative Häufigkeit f konvektiver Tage lediglich die Information der EC-Earth Klimasimulation und der mit EC-Earth angetriebenen COSMO-CLM Simulation für die Gegenwart ($P = 2$) verwendet wird. Sollen die fünf verwendeten Gefährdungsgrößen in der Berechnung einer Gefährdung verschieden gewichtet werden, können Gewichte $w_i, i = 1, \dots, 5$ und der Gewichtsumme Eins gewählt werden. Damit ist die Gefährdung G_P in einer bestimmten Periode zu berechnen mit

$$G_P = \sum_{C=1}^4 \sum_{i=1}^5 w_i I_{i,C}^2 \cdot F_C^P \cdot f_C^2$$

Methode 2: Großwetterlagenstatistik und konvektive Tage

Zusätzlich zu Methode 1 berücksichtigt Methode 2, dass sich die relative Häufigkeit konvektiver Tage in den einzelnen Großwetterlagenklassen von Periode zu Periode ändern kann. Dann berechnet sich die Gefährdung mit

$$G_P = \sum_{C=1}^4 \sum_{i=1}^5 w_i I_{i,C}^2 \cdot F_C^P \cdot f_C^P$$

Methode 3: Großwetterlagenstatistik, konvektive Tage und Gefährdungsgrößen

Bei dieser Methode werden zusätzlich regionale und lokale Veränderungen der Gefährdungsprozesse berücksichtigt. Es wird also berücksichtigt, dass sich zusätzlich die Gefährdungsgrößen ändern können. Dann berechnet sich die Gefährdung mit

$$G_P = \sum_{C=1}^4 \sum_{i=1}^5 w_i I_{i,C}^P \cdot F_C^P \cdot f_C^P$$

Bei dieser Berechnung müssen also COSMO-CLM Simulationen für jede betrachtete Periode durchgeführt werden. Daher ist diese Methode im Vergleich zu den obigen Methoden sehr rechenintensiv.

Damit die Gefährdungen verschiedener Klimaperioden und Methoden der Gefährdungsberechnung leicht vergleichbar sind, wird abschließend mit dem Maximum der mit EC-Earth berechneten Gefährdung der Gegenwart normalisiert zu

$$G_P^{norm} = \frac{G_P}{Max(G_2)}$$

Die Abbildungen im Haupttext zeigen immer die normalisierten Gefährdungskarten.

3.6 Ablaufdiagramm

In Abb. 3 ist der methodische Ablauf zur Berechnung schematisch dargestellt. Aus der Kenntnis der Gefährdungsgrößen, der Anzahl konvektiv extremer Tage und der Großwetterlagenstatistik wird bei gewählter Gewichtung der einzelnen Gefährdungsgrößen eine Gefährdungskarte für die betrachtete Klimaperiode berechnet. Es zeigt sich nochmal, dass das regionale nichthydrostatische Klimamodell COSMO-CLM eine zentrale Rolle in der Gefährdungskartenberechnung einnehmen muss.

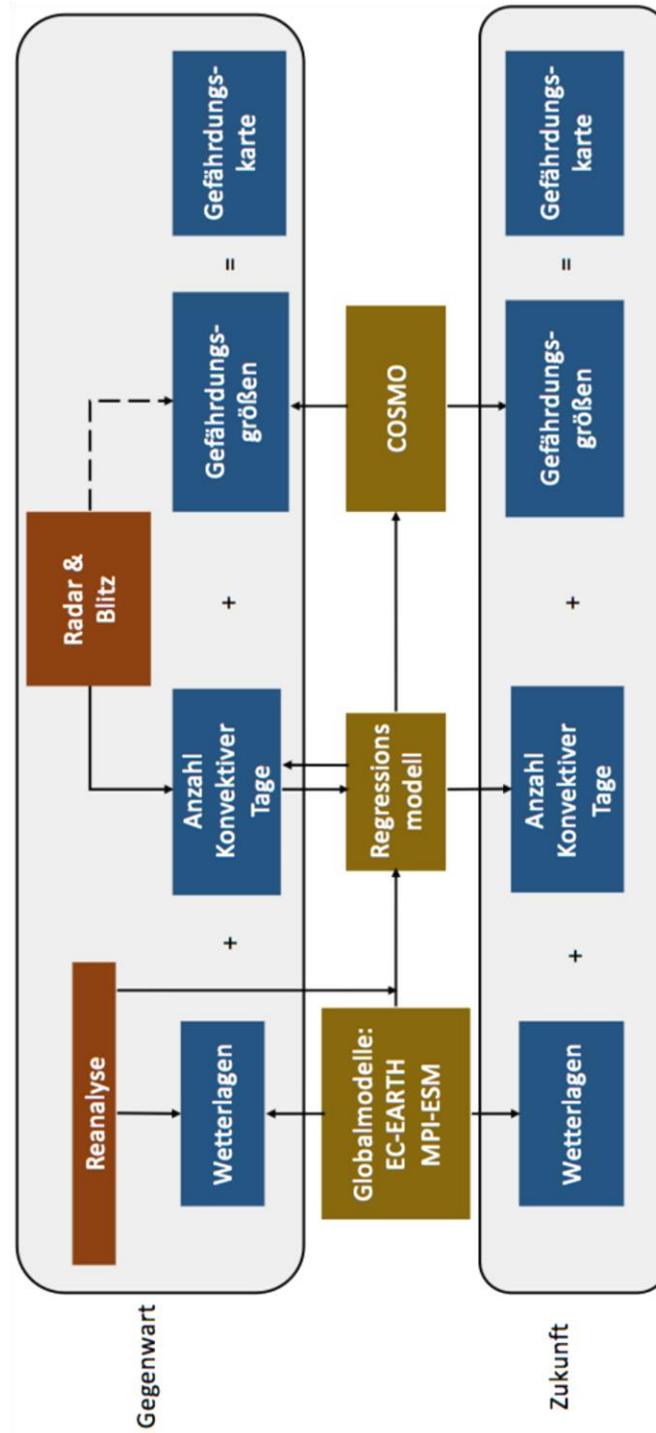


Abb. 3: Schema der Gefährdungskartenberechnung.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Werte der für die Berechnung der konvektiven Gefährdung in Sachsen-Anhalt notwendigen Größen, wie Großwetterlagenverteilung, Anzahl konvektiv extremer Tage und Gefährdungsgrößen, werden in diesem Kapitel dargestellt und diskutiert. Im letzten Abschnitt des Kapitels, Abschnitt 4.8, werden die für die verschiedenen Klimaperioden berechneten Gefährdungskarten vorgestellt.

4.1 Räumliche Verteilung konvektiver Niederschlagszellen aus Radardaten

In der vorliegenden Studie wurde das RZ-Produkt der Radardaten (s. Abschnitt 2.1) mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten verwendet. Die Abbildung 4 zeigt die aus dem RZ-Produkt abgeleitete Gefährdungsgröße Zellzahl (Anzahlverteilung der konvektiven Zellen mit Zellkernintensität > 8.12 mm/h) für Sachsen-Anhalt der Sommerhalbjahre (Monate April-September) 2001 bis 2014. Sehr auffallend ist ein Anzahlminimum nahe dem Radarstandort Ummendorf (westlich von Magdeburg). Dieses Minimum wurde durch einen Anzahlfilter erzeugt, der angewendet wurde, um Fehlechos durch Windkraftanlagen (die scheinbare Zellzugbahnen verursachen, s. Abschnitt 3.2) zu reduzieren.

Konvektive Zellen 2001-2014

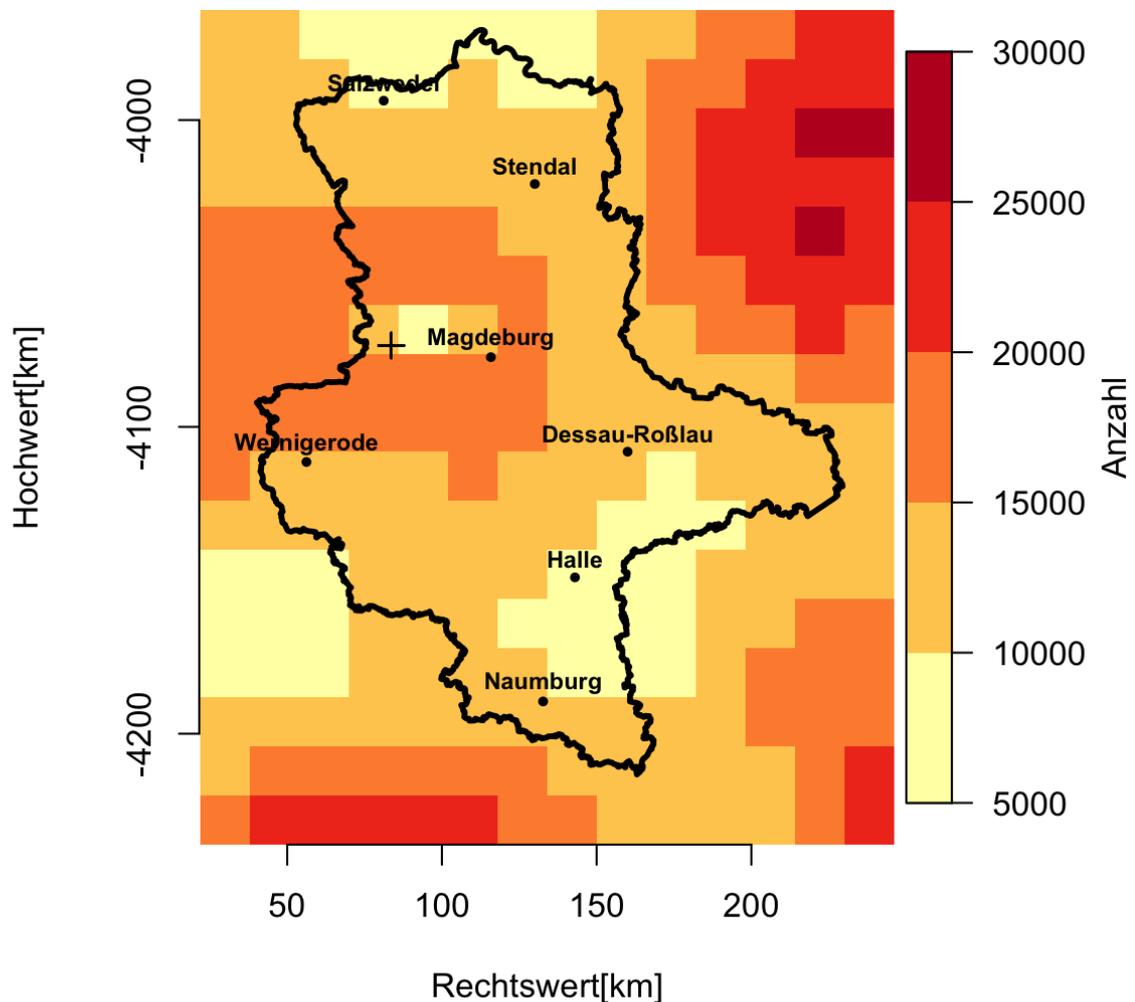


Abb. 4: Karte der Gefährdungsgröße Zellzahl, d.h. der Anzahl konvektiver Zellen mit einer Zellkernintensität $>8.12 \text{ mm/h}$, abgeleitet aus Radarbeobachtungen. Der Standort des Radars Ummendorf ist durch ein Kreuz gekennzeichnet.

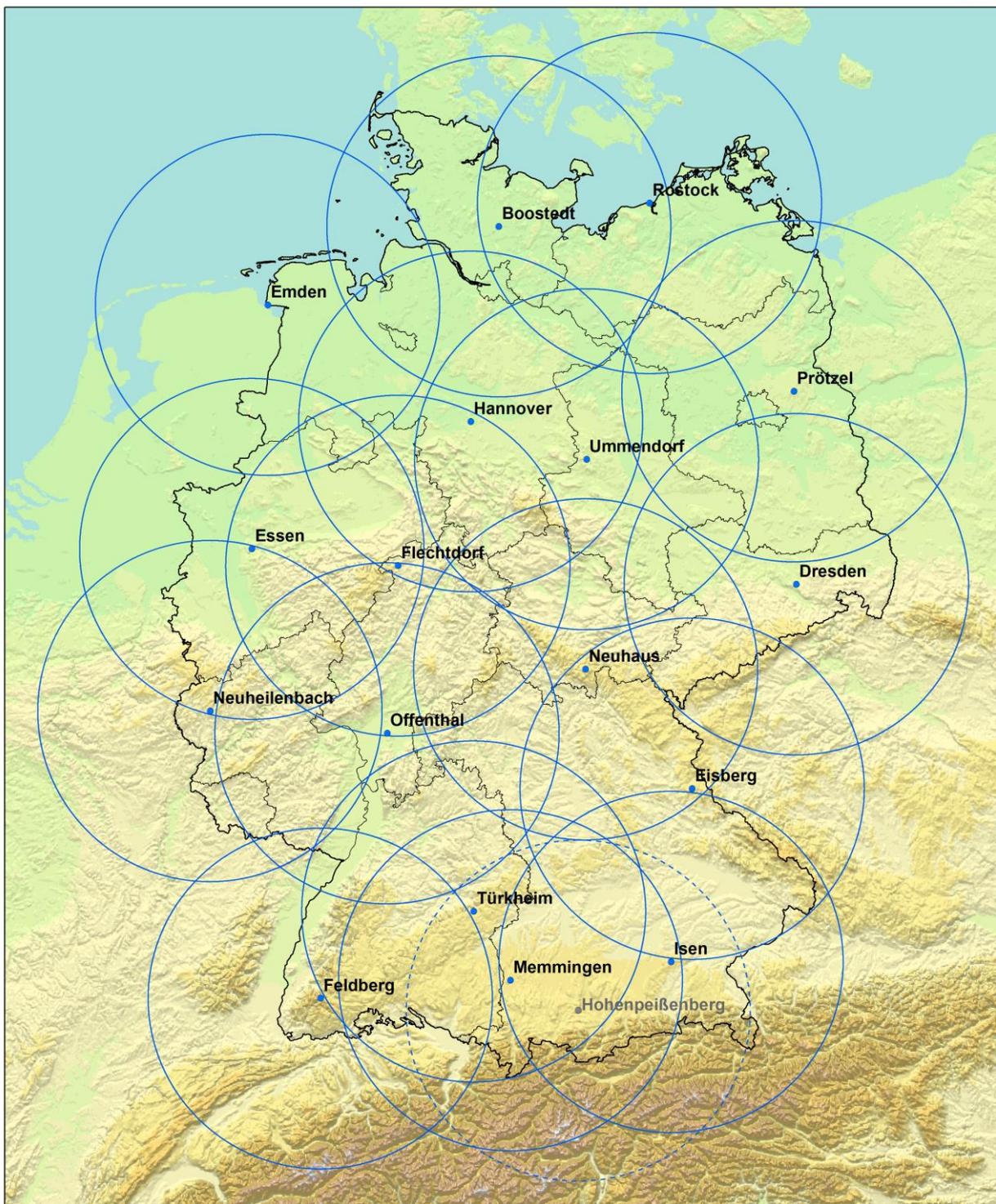
In der weiteren Umgebung (z. B. Richtung Halle) fällt auf, dass die Anzahl der identifizierten Zellen mit zunehmendem Abstand vom Radarstandort Ummendorf abnimmt. Eine Erklärung dieser Struktur könnte eine entfernungsabhängige Signalreduktion sein. Mit zunehmendem Abstand zum Radar steigt das unterste Abtastniveau des Radarstrahls und erdoberflächennahe Niederschläge werden nicht erfasst. Dadurch wird das Signal tendenziell unterschätzt. (Der konvektive Niederschlag nimmt in der Intensität in der Wolke hin zur Wolkenbasis zu. Liegt die Wolkenbasis unter dem Abtastniveau des Radarstrahls, wird die Niederschlagsintensität unterschätzt.) Allerdings sind nicht alle Radare des Deutschen Wetterdienstes gleich betroffen. Beispielsweise befindet sich der Radarstandort Neuhaus/Thüringen in einer Höhe von 873 m. Dadurch ist es für dieses Radar möglich, das unterste Abtastniveau mit einem geringeren Abtastwinkel (d.h. horizontaler) zu beobachten

(Radarstrahlhindernisse sind in relativ geringerer Höhe) als für das Radar Ummendorf mit der Standorthöhe von 185 m. Damit steigt das Abtastniveau des Radars Neuhaus mit dem Abstand weniger stark an (Wagner et al. 2015). Der Nachteil im Beispiel Neuhaus ist aber eine Unterschätzung der Niederschlagsintensitäten in direkter Radarumgebung (Brendel et al. 2014). Diese Effekte und weitere mögliche Ursachen der Signalreduktion sind dem Deutschen Wetterdienst bekannt und sind Gegenstand derzeitiger Forschung (Winterrath et al. 2015). Diese Signalreduktion wird besonders deutlich, wenn nur Messungen eines einzelnen Radarstandortes betrachtet werden.

Im verwendeten Radardatenprodukt werden alle verfügbaren Radarstandorte des Deutschen Wetterdienstes einbezogen. Dies kann den Einfluss der Signalreduktion verringern, da für einen bestimmten Ort Messungen durch Radare an verschiedenen Standorten kombiniert werden können. In der Abb. 4 zeigt sich aber beispielsweise auch eine abnehmende Zellzahl mit dem Abstand vom Radar Berlin-Tempelhof (Standort in 2012 verlegt nach Prötzel). Daher gibt es nach wie vor Regionen, welche bei bestehender Radarnetzdichte des Deutschen Wetterdienstes (Abb. 5) zu weit von den umliegenden Radarstandorten entfernt sind. Die Abbildung zeigt die Abdeckungsradien der Radare. Beim Vergleich der Abdeckungsradien und der Abnahme der Zellzahl mit Abstand vom Radar Ummendorf in Abb. 4 fällt auf, dass sich die Regionen mit geringerer Zellzahl und die Regionen mit größerer Distanz zu den umliegenden Radarstandorten überschneiden (z.B. in der Gegend von Naumburg). Daher ist davon auszugehen, dass das in Abb. 4 gezeigte räumliche Muster der Zellzahl teilweise auf die entfernungsabhängige Signalreduktion zurückzuführen ist. Eine meteorologisch zu erwartende räumliche Variabilität der Zellzahl (z.B. eine Zunahme der Zellzahl in Richtung Harz) ist durch diese Problematik nicht zufriedenstellend beobachtbar.

Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



Legende

- operationelles Verbundradar
- Qualitätssicherungsradar
- 150km Abdeckungsradius

0 20 40 80 120 160
Kilometer

Maßstab 1:3 000 000

T122H1
Stand: 04.03.2015 © GeoBasis-DE / BKG 2014

Abb. 5: Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes (zur Verfügung gestellt durch das Radarklimatologie-Projekt des DWD).

Ein Vergleich mit Blitzdichtekarten zeigte, dass eine Zunahme der Zellenanzahl in Richtung Berlin ebenfalls nicht real ist. Dies ist durch Fehlechos im Großraum Berlin erklärbar. Daher musste im Projekt davon ausgegangen werden, dass Klimatologien konvektiver Zellenanzahl für Sachsen-Anhalt ohne Entwicklung und Anwendung aufwendiger Korrekturverfahren nicht verwendbar sind. Ein Vorbild für solch ein korrigiertes Produkt ist der bereits erwähnte Radardatensatz RADOLAN, der auf einer Aneichung an Stationsniederschläge basiert. Der Datensatz RADOLAN stellt stündliche Radardaten bereit, die durch die geringe zeitliche Auflösung keine Identifikation konvektiver Zellen erlauben.

Abbildung 6 zeigt den mittleren, an Stationsniederschläge angeeichten Radarniederschlag in Sachsen-Anhalt der Jahre 2001 bis 2015. Diese vom Deutschen Wetterdienst erstellte Radarklimatologie deckt den gesamten Zeitraum ab und beinhaltet daher sowohl stratiform als auch konvektiv gefallenen Niederschlag. In der Abbildung ist der Harz mit den höchsten Niederschlagswerten besonders auffällig. Die flachere Region im Nordwesten des Harzes bis Magdeburg und die Region im Südosten des Harzes bis zur Saale zeigen hingegen deutlich geringere Niederschlagssummen. Ein Ergebnis der Aneichung ist, dass die Radarklimatologie die oben diskutierte entfernungsabhängige Signalreduktion nicht zeigt. Aber auch diese Radarklimatologie zeigt noch die Schwierigkeiten bei der Filterung von Fehlsignalen (z.B. im Großraum Berlin oder westlich von Magdeburg).

Mittlerer Niederschlag in Sachsen-Anhalt (2001 - 2015)

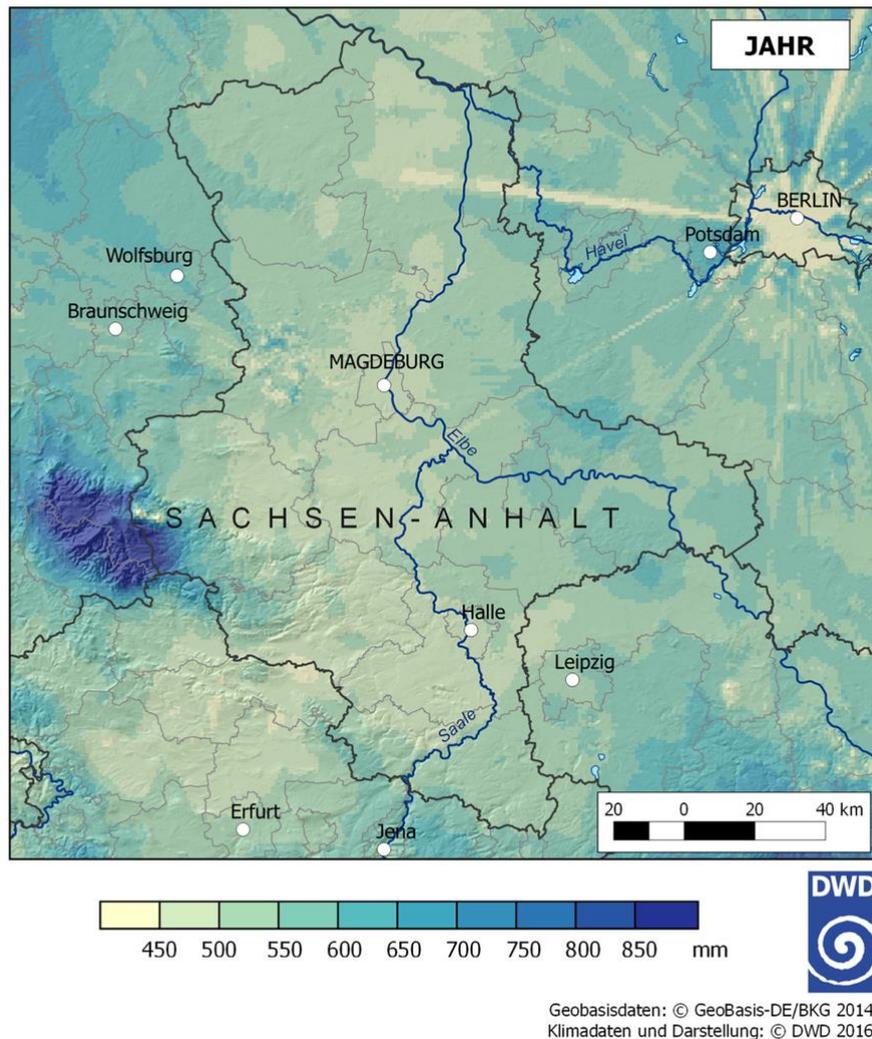


Abb. 6: Mittlere jährliche Niederschlagssumme in Sachsen-Anhalt basierend auf der angeeichten Radarklimatologie, 2001-2015 (zur Verfügung gestellt durch das Radarklimatologie-Projekt des Deutschen Wetterdienstes).

Aus dieser Diskussion musste der Schluss gezogen werden, dass es mit Radardaten für Sachsen-Anhalt nicht möglich ist, Gefährdungsgrößen zu berechnen, da diese klimatologische Größen sind und damit systematische Fehler wie durch Signalreduktion deutlich zeigen. Die Radarbeobachtungen wurden daher nur für die Betrachtung von konvektiven Einzelereignissen bzw. zur Ereignisbestimmung verwendet.

4.2 Räumliche Verteilung konvektiver Niederschlagszellen aus COSMO-CLM

Abb. 7 (links) zeigt beispielhaft mit dem Modell COSMO-CLM (angetrieben durch die Reanalyse ERA-Interim) simulierte Zugbahnen konvektiver Niederschlagszellen des 02.07.2007. Die Abbildung zeigt, dass im ausgewählten Zeitraum die simulierte Zelldichte im Norden, im Bereich des Harzes und im Südwesten Sachsen-Anhalts erhöht ist.

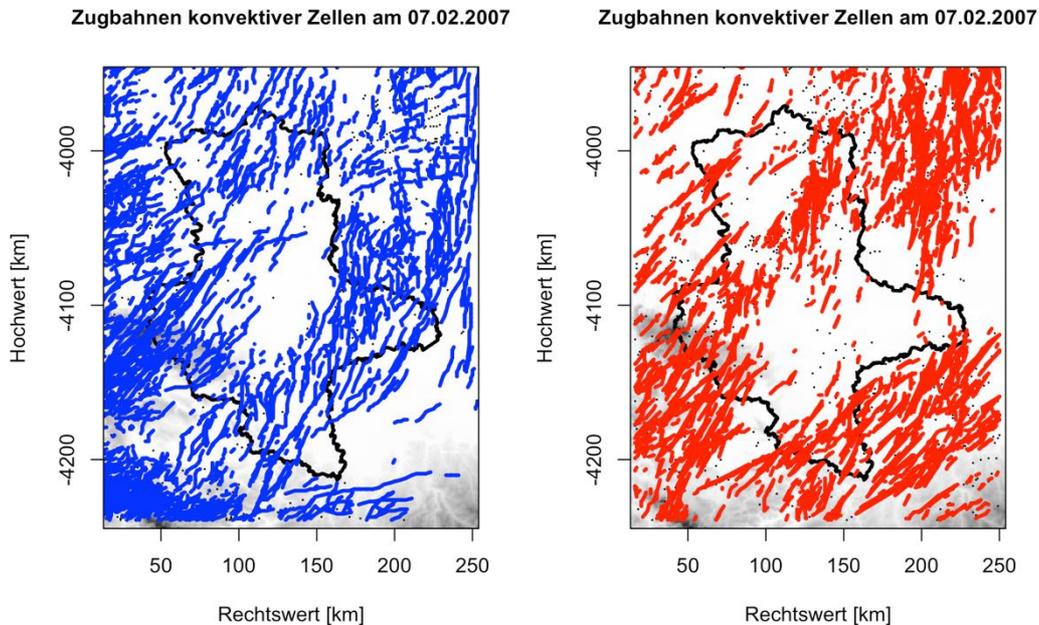


Abb. 7: Zugbahnen konvektiver Niederschlagszellen des 02.07.2007 wie simuliert mit COSMO-CLM (links) bzw. beobachtet mit Radar (rechts).

Vergleichend zeigt die Abb. 7 (rechts) die aus Radarbeobachtungen identifizierten Zellzugbahnen desselben Zeitraums. Es zeigt sich, dass die beobachtete Verteilung der simulierten Zugbahnverteilung ähnelt, aber auch Unterschiede aufzeigt.

Abbildung 8 vergleicht die simulierten und beobachteten Zellzugbahnen für einen weiteren Tag beispielhaft. Auch an diesem Tag zeigen sich ähnliche Muster, aber auch deutliche Unterschiede in der Zugbahnverteilung.

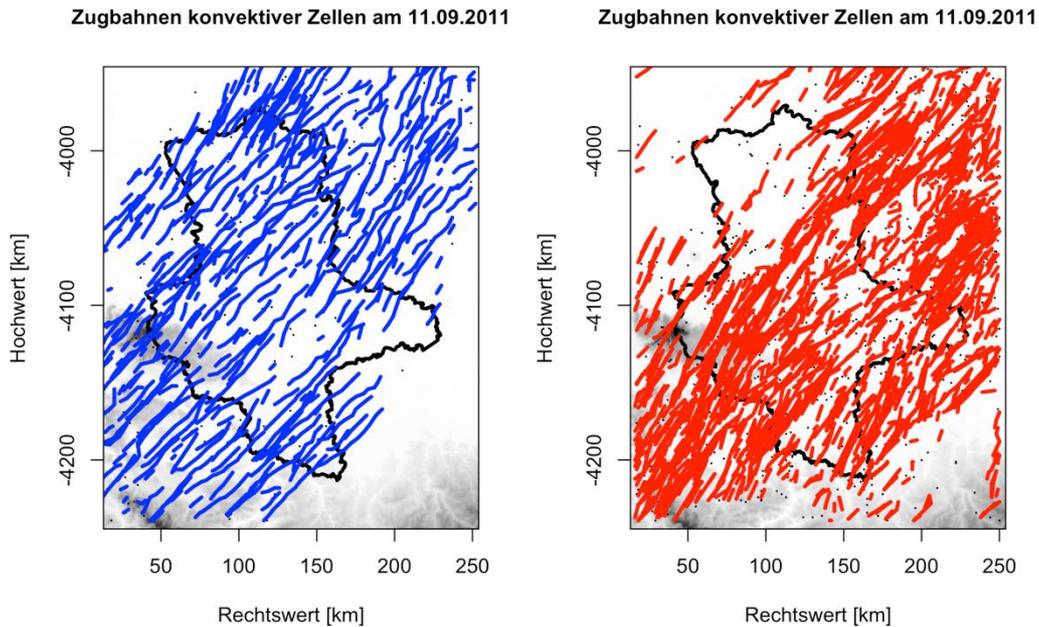


Abb. 8: Zugbahnen konvektiver Niederschlagszellen des 11.09.2011 wie simuliert mit COSMO-CLM (links) bzw. beobachtet mit Radar (rechts).

Für Einzelereignisse, wie hier beispielhaft für den 02.07.2007 und den 11.09.2011 berechnet, kann aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der Atmosphäre und der dadurch bedingten endlichen Vorhersagbarkeit die Lokalisierung der Zellkerne aus Modellsimulation und Beobachtung nur grob übereinstimmen. In vorliegender Studie wurde allerdings die Klimatologie solcher konvektiven Ereignisse untersucht, so dass mit ausreichend vielen simulierten Ereignissen eine robustere Statistik erreicht ist.

Abbildung 9 zeigt die mit COSMO-CLM (angetrieben durch ERA-Interim) simulierte Gefährdungsgröße Zellzahl für Sachsen-Anhalt an vom Regressionsmodell ausgewählten, konvektiv extremen Tagen im Sommerhalbjahr (April-September) der Jahre 2001-2014. Die Auswahl an Tagen war notwendig, da es zum jetzigen Stand der Rechentechnik nicht möglich ist, 14 Jahre mit COSMO-CLM mit der notwendigen Gitterdistanz von 1 km zu simulieren. Dies erklärt die geringeren Zellzahlen im Vergleich zur Auswertung der Radarbeobachtungen (Abb. 4).

Konvektive Zellen 2001-2014

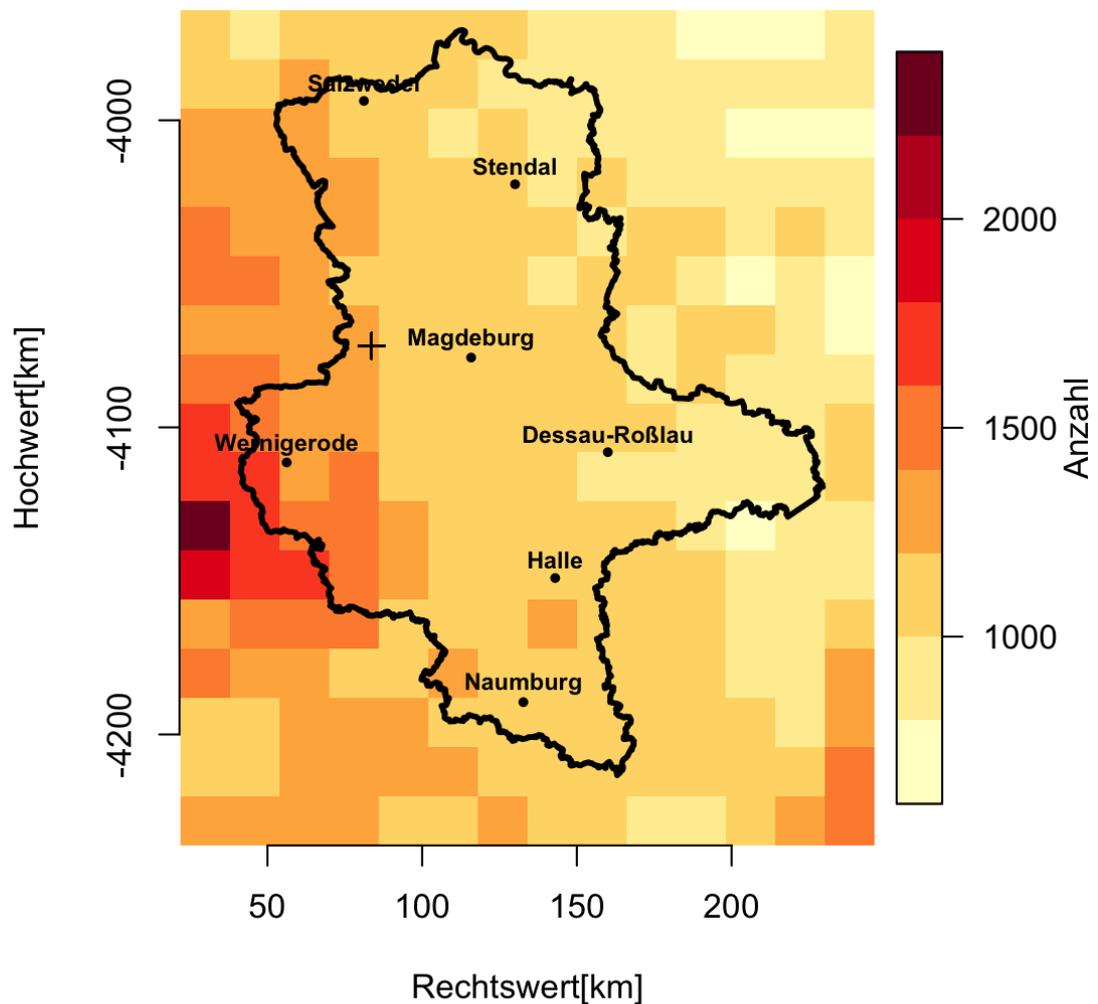


Abb. 9: Karte der Gefährdungsgröße Zellzahl, d.h. der Anzahl konvektiver Zellen mit einer Zellkernintensität >8.12 mm/h, abgeleitet aus COSMO-CLM Simulationen ausgewählter, konvektiv extremer Tage in den Sommerhalbjahren des Zeitraums 2001 bis 2014.

Die größte Anzahl an konvektiven Zellen wurde im Harz simuliert, während geringere Anzahlen in der Region um Stendal und im Südosten Magdeburgs simuliert wurden. Es zeigten sich in den Simulationen keine kreisförmigen Strukturen wie in den Radarbeobachtungen (Abb. 4), die simulierte Karte der Zellzahl entspricht der erwarteten Verteilung konvektiver Zelhäufigkeit (mit einem Maximum im Bereich des Harzes, einer Abnahme in Richtung des nordöstlichen Landesteils) und ist konsistent mit der angeeichten Radarklimatologie in Abb. 6.

Die hier durchgeführten Vergleiche und die sehr guten Ergebnisse in einem Vorläuferprojekt (Brendel et al. 2014) erlaubte die Verwendung der COSMO-CLM Daten für die Erstellung von Klimatologien konvektiver Phänomene, d.h. für die Berechnung der Gefährdungsgrößen. Dieses Vorgehen wurde durch die ausschließlich normierte Verwendung der

Simulationsdaten in den später zu zeigenden Gefährdungskarten untermauert, durch die multiplikative wie additive Fehler herausgerechnet werden. Radardaten wurden für die Berechnung der Gefährdungsgrößen nicht verwendet und entsprechend wurden die mit COSMO-CLM simulierten Gefährdungsgrößen nicht bzgl. systematischer Fehler korrigiert (wie es im Vorgängerprojekt in Thüringen, Brendel et al. (2014), noch der Fall war).

4.3 Konvektiv extreme Tage

Zunächst wurden mit Hilfe der Radarbeobachtungen (wie in Abschnitt 3.3 beschrieben) konvektiv extreme Tage im Radarzeitraum 2001 bis 2014 selektiert. Mit Hilfe dieser Selektion wurde ein statistisches Modell, ein logistisches Regressionsmodell, trainiert. Dieses wurde verwendet, um aus globalen atmosphärischen Datensätzen (der Reanalyse ERA-Interim und den globalen Klimamodellen EC-Earth und MPI-ESM) extreme Tage zu selektieren. Es wurden in jedem Fall nur Tage in Sommerhalbjahren (1. April bis 30. September) selektiert. Eine Evaluation des statistischen Modells ergab für die in Abschnitt 3.3 beschriebenen Gütemaße die Werte $HSS = 0.38$, $POD = 0.33$, $FAR = 0.38$. Im Radarzeitraum wurden 99 extreme Tage korrekt detektiert, 202 Ereignisse wurden nicht detektiert und 2201 konvektiv nicht extreme Tage wurden korrekt ausgeschlossen. Hierbei ist zu bedenken, dass das Ergebnis des statistischen Modells eine Wahrscheinlichkeit ist und für ERA-Interim bei einer Wahrscheinlichkeit größer 50 % ein konvektiv extremer Tag (im folgenden einfach Extremereignis genannt) angenommen wurde. Wird dieser Schwellwert vergrößert, dann reduziert sich die Anzahl der Fehldetektionen, aber es vergrößert sich auch die Anzahl der fehlerhaften Nichtdetektionen.

Entsprechend wurden in den Daten der Reanalyse ERA-Interim 319 Extremereignisse detektiert. Dies ergibt umgerechnet auf eine Referenzperiode von 30 Jahren 267 Ereignisse (Tab. 1). Da die Reanalyse die Referenz für die Klimasimulationen ist, wurde für diese der Detektionsschwellwert angepasst, um in einer Referenzperiode von 30 Jahren des gegenwärtigen Klimas dieselbe Anzahl von Extremereignissen zu detektieren (bis auf Rundungsdifferenzen). Diese Detektionsschwellwerte sind in der Tabelle gelistet. Es zeigte sich, dass EC-Earth dazu neigt, eine Atmosphäre mit im Vergleich zu ERA-Interim erhöhter Konvektionsneigung zu simulieren. Das Modell MPI-ESM tendiert relativ zu ERA-Interim dazu konvektive Phänomene zu unterdrücken.

Tab. 1: Anzahl der Extremereignisse in der Gegenwart.

	Zeitraum	Detektions- schwellwert	Extremereignisse im Datenzeitraum	Extremereignisse auf 30 a bezogen
ERA-Interim	1979 - 2014	50 %	319	267
EC-Earth	1972 - 2005	65 %	301	266
MPI-ESM	1972 - 2005	30 %	301	266

Eine Anwendung dieser Detektionsmethode auf die Klimasimulationen in zukünftigen Klimazeiträumen erlaubte die Bestimmung konvektiv extremer Tage. In der Tab. 2 sind die Anzahlen für verschiedene Klimazeiträume unter Annahme der RCP-Treibhausgasemissionsszenarios RCP2.6 und RCP8.5 angegeben.

Tab. 2: Anzahl der Extremereignisse in der Zukunft (Veränderung gegen die Gegenwart in Prozent).

	EC-Earth		MPI-ESM	
Gegenwart	266			
	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
2016 - 2045	357 (+34 %)	394 (+48 %)	284 (+7%)	341 (+28 %)
2071 - 2100	383 (+44 %)	609 (+130 %)	335 (+26%)	377 (+42 %)

Die Tabelle zeigt, dass sich für das Szenario RCP8.5 in EC-Earth die simulierte Anzahl von Extremtagen gegen Ende des aktuellen Jahrhunderts mehr als verdoppelt, während sie sich in MPI-ESM vergleichsweise wenig um knapp über 40 % erhöht. Unter Annahme des optimistischen Szenarios RCP2.6 erhöht sich die Anzahl der Extremtage in der Projektion mit EC-Earth/MPI-ESM um 34 %/7 % in der näheren Zukunft und um 44 %/26 % bis Ende des Jahrhunderts.

Den Jahresgang des Anteils potentiell extremer Tage zeigt die Abb. 10. Die in ERA-Interim analysierten Luftmassen sind besonders günstig für extrem konvektive Phänomene in den Monaten Juli und August: der Anteil potentiell konvektiver Tage ist etwa 0.1, d.h. im Mittel ist jeder zehnte Tag extrem konvektiv. Das Winterhalbjahr und auch die Randmonate des Sommerhalbjahres sind konvektiv wenig aktiv. Aufgrund der ungleichen Verteilung der konvektiv extremen Tage über das Jahr ist eine Betrachtung einzelner Monate bzw. Saisonen im Projekt nicht durchgeführt worden, um für die statistische Betrachtung ausreichende Stichprobengrößen zu erreichen. Die Abbildung zeigt auch, dass EC-Earth in der Vergleichsperiode einen ähnlichen Jahresgang simuliert, während MPI-ESM das Hochsommermaximum unterschätzt.

Anteil konvektiver Tage

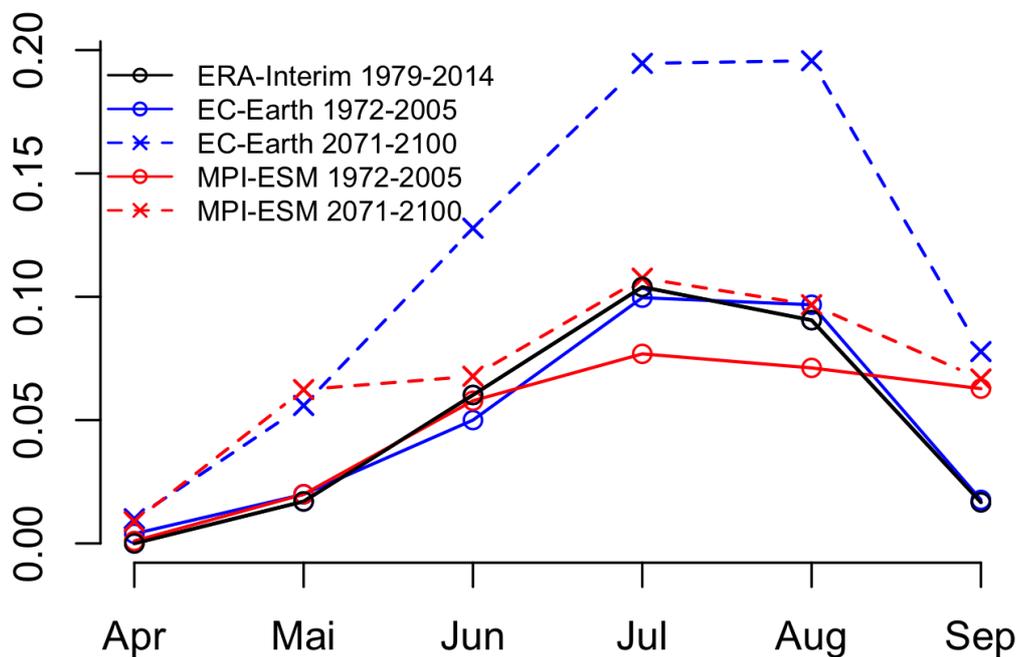


Abb. 10: Jahresgang des Anteils konvektiv extremer Tage wie in den globalen Datensätzen dargestellt für die Gegenwart (ERA-Interim im Zeitraum 1979 bis 2014, EC-Earth und MPI-ESM im Zeitraum 1972 bis 2005) und für die Zukunft (EC-Earth und MPI-ESM 2071 – 2100, RCP8.5).

Für die Klimaperiode Ende des Jahrhunderts zeigt EC-Earth den bereits erwähnten starken Zuwachs potentiell extrem konvektiver Tage: in allen Monaten ein höherer Anteil an Tagen. Im Mittel wurde mit dem Klimamodell jeder fünfte Tag in den Monaten Juli und August extrem konvektiv simuliert. Das Modell MPI-ESM zeigt einen höheren Anteil konvektiver Tage im Frühling und in abgeschwächter Form im Sommer.

Da die Reanalyse ERA-Interim die beste Schätzung des atmosphärischen Zustandes der letzten Jahrzehnte bereitstellt und die Anzahl und der Jahresgang der potentiell extrem konvektiven Tage in der EC-Earth-Simulation deutlich besser mit ERA-Interim übereinstimmt als in der MPI-ESM-Simulation, wurde entschieden, MPI-ESM nicht weiter bei der Selektion konvektiver Tage und zum Antrieb von COSMO-CLM Simulationen zu berücksichtigen.

4.4 Statistik der Großwetterlagen

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1 diskutierten Methode wurden die Häufigkeitsverteilungen von Großwetterlagen Mitteldeutschlands aus den globalen Datensätzen ERA-Interim, EC-Earth und MPI-ESM für verschiedene Klimaperioden analysiert. Abbildung 11 zeigt die Verteilung

der Tage auf die verschiedenen Wetterlagen für die letzten Jahrzehnte bestimmt aus der Reanalyse und den beiden Klimasimulationen.

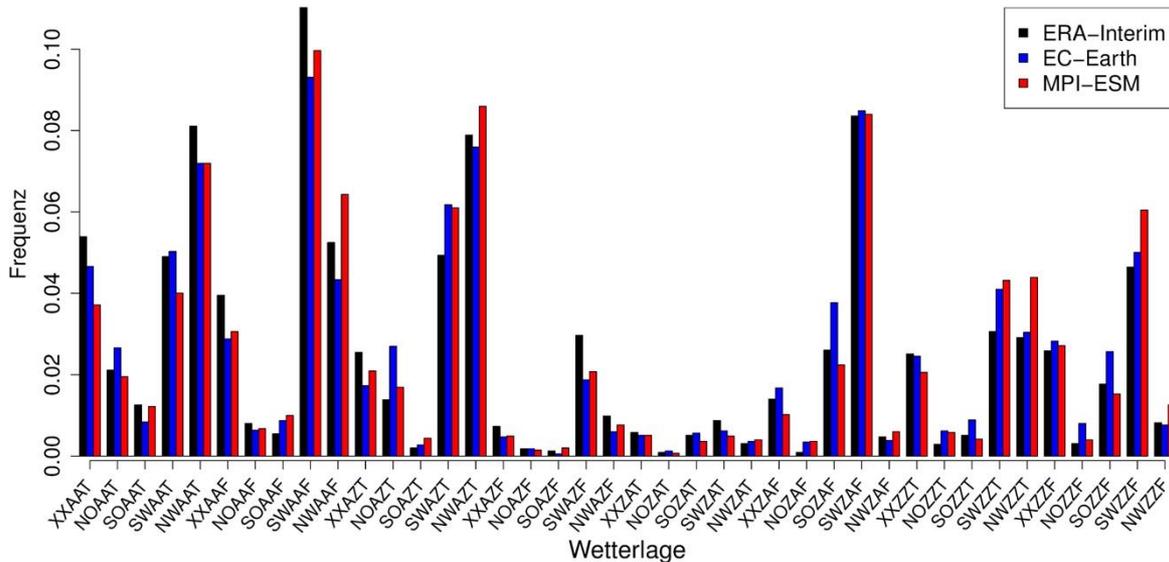


Abb. 11: Relative Wetterlagenhäufigkeiten in der Gegenwart im Sommerhalbjahr. Die Akronyme sind in Anhang A erklärt (z.B. bedeutet SWAAF Anströmung feuchter antizyklonaler Luftmasse aus südwestlicher Richtung).

Die Klimasimulationen zeigen eine ähnliche Wetterlagenverteilung wie die Reanalyse. Dies bestätigt die Erwartung, dass aktuelle globale Klimasimulationen in der Lage sind, großräumige Wetterlagen zu repräsentieren. Die Wetterlageninformation wurde daher explizit in den Berechnungsmethoden der Gefährdungskarten (Abschnitt 3.5) berücksichtigt. Die unterschiedlichen Wetterlagen zeigen eine sehr unterschiedliche relative Häufigkeit von konvektiv extremen Tagen. Um die Unsicherheiten der Klimasimulationen weiter zu reduzieren, wurden die Großwetterlagen weiter aggregiert in vier Großwetterlagenklassen mit ähnlichen Anzahlen konvektiv extremer Tage. Es zeigte sich, dass bei feuchten Wetterlagen aus Südwest (Wetterlagen mit dem Bezeichnungsmuster SW..F) drei Viertel der konvektiv extremen Tage detektiert werden. Daraus ergab sich die Klasseneinteilung

Klasse 1: Wetterlage SWAAF

Klasse 2: Wetterlage SWAZF und Wetterlage SWZZF

Klasse 3: Wetterlage SWZAF

Klasse 4: Alle weiteren Wetterlagen

Die Klassen 1 bis 3 sind deutlich seltener (je etwa 10 % Eintrittswahrscheinlichkeit) als die Klasse 4. Dies wird in Abb. 12 veranschaulicht. Jede Klasse zeigt aber eine ähnliche Anzahl konvektiver Tage im Klima der letzten Jahrzehnte.

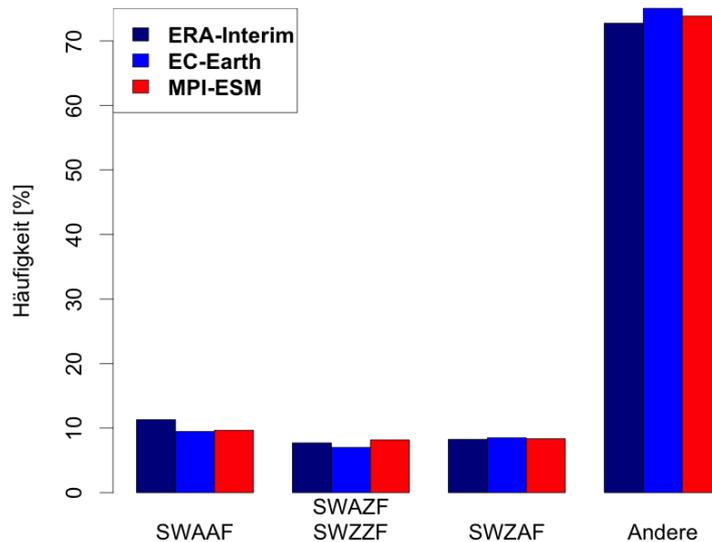


Abb. 12: Relative Häufigkeiten der vier gewählten Wetterlagenklassen in der Gegenwart im Sommerhalbjahr für ERA-Interim (dunkelblau), EC-Earth (blau) und MPI-ESM (rot).

Diese Klasseneinteilung ist sehr robust und konnte daher auf zukünftige Klimaperioden angewendet werden. Abbildung 13 zeigt die Änderung der Klassenhäufigkeiten für die Klimaperiode 2016 bis 2045 unter Verwendung der RCP2.6- und RCP8.5-Treibhausgasszenarien im Vergleich zur Referenzperiode 1972 bis 2005. Sowohl EC-Earth als auch MPI-ESM zeigen eine Zunahme der Klassen 1 und 2 (beide Klassen enthalten relativ viele konvektiv extreme Tage), kaum eine Häufigkeitsänderung der Klasse 3 und eine entsprechende Abnahme der Großwetterlagen in Klasse 4 (die relativ wenige konvektiv extreme Tage zeigt). Diese Häufigkeitsänderungen der Klassen deuten auf eine Zunahme der extremen Tage hin und bestätigen die Ergebnisse in Abschnitt 4.3. Die Änderung der Wetterlagenklassen scheint aber auf einen stärkeren Zuwachs extremer Tage in MPI-ESM als in EC-Earth hinzudeuten. Dies wäre im Widerspruch zu den Ergebnissen in Abschnitt 4.3 und ist damit erklärt, dass die Großwetterlageninformation nicht ausreicht, um die Luftmasse bezüglich konvektiver Aktivität ausreichend zu charakterisieren. Wichtige Eigenschaften der Luftmasse (wie Labilität) gehen nicht in die verwendete Großwetterlagenklassifikation ein.

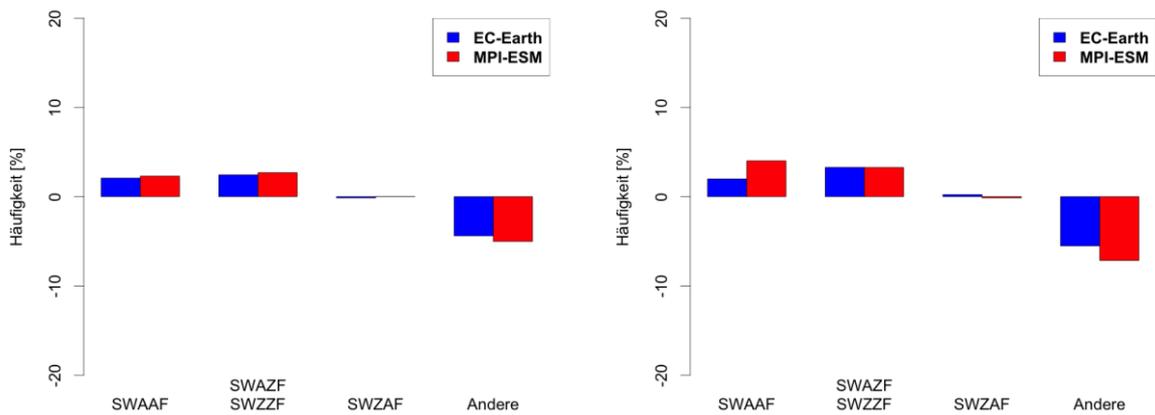


Abb. 13: Änderung der relativen Häufigkeit der vier gewählten Wetterlagenklassen in der näheren Zukunft (2016-2045, links: RCP2.6, rechts: RCP8.5) im Vergleich zur Gegenwart (1972-2005), wie mit den globalen Modellen EC-Earth und MPI-ESM simuliert.

Abbildung 14 zeigt den vorhergehenden Vergleich der simulierten Großwetterlagenklassen, aber für die fernere Klimaperiode 2071 bis 2100. Die Änderungen der großräumigen Zirkulation zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber heute führen im RCP8.5-Szenario zu deutlich häufigerem Auftreten (um je 5 Prozentpunkte und mehr) von Wetterlagen der Klassen 1 und 2 mit feuchter Anströmung aus Südwest. Somit wird die in Abb. 13 gezeigte Tendenz zum Ende des Jahrhunderts bestätigt. Die Wetterlagenklasse 3 bleibt weiterhin nahezu unverändert und die Wetterlagenklasse 4 nimmt weiterhin ab (um mehr als 10 Prozentpunkte). Die Änderung der Verteilung der Großwetterlagen auf die Klassen deutet also auf einen weiteren Anstieg der Anzahl der konvektiv extremen Tage hin.

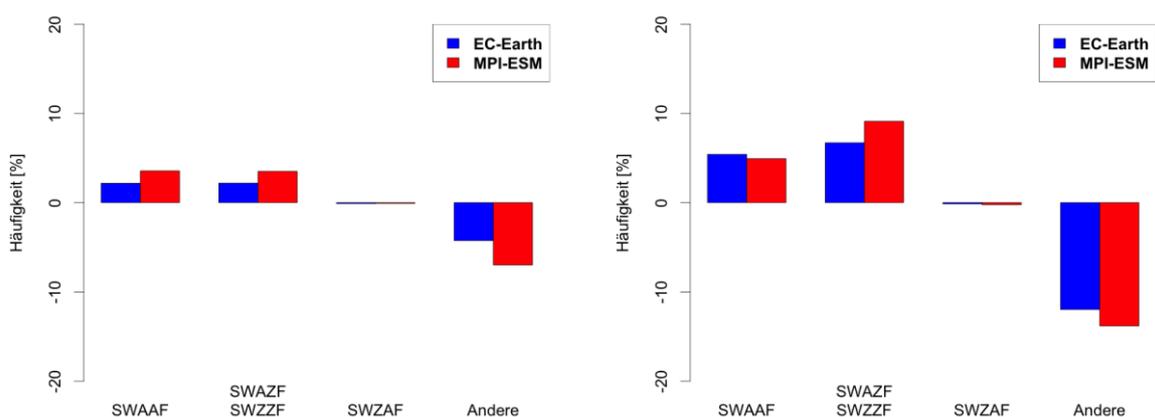


Abb. 14: Änderung der relativen Häufigkeit der vier gewählten Wetterlagenklassen in der ferneren Zukunft (2071-2100, links: RCP2.6, rechts: RCP8.5) im Vergleich zur Gegenwart (1972-2005), wie mit den globalen Modellen EC-Earth und MPI-ESM simuliert.

4.5 Gefährdungsgröße Blitzpotential aus Beobachtungsdaten

Mit Hilfe der Blitzdaten des Beobachtungsdatensatzes BLIDS lässt sich die Gefährdungsgröße Blitzpotential für die Sommerhalbjahre im Beobachtungszeitraum 1992 bis 2014 direkt bestimmen. Abbildung 15 zeigt das Blitzpotential, d.h. hier einfach die Gesamtzahl aller gezählten Blitze, für alle Wetterlagen und gesplittet nach den Wetterlagenklassen. Es ist interessant zu sehen, dass die meisten Blitze in den Klassen 3 und 4 gezählt werden. Dies macht deutlich, dass die Zahl konvektiv extremer Tage nicht mit der Blitzhäufigkeit 1:1 korreliert. Da die Wetterlagenanzahl in den Klassen 3 und 4 in den zukünftigen Klimasimulationen gleich bzw. kleiner werden, ist außerdem von einer zukünftigen Abnahme der Gefährdung durch Blitze auszugehen.

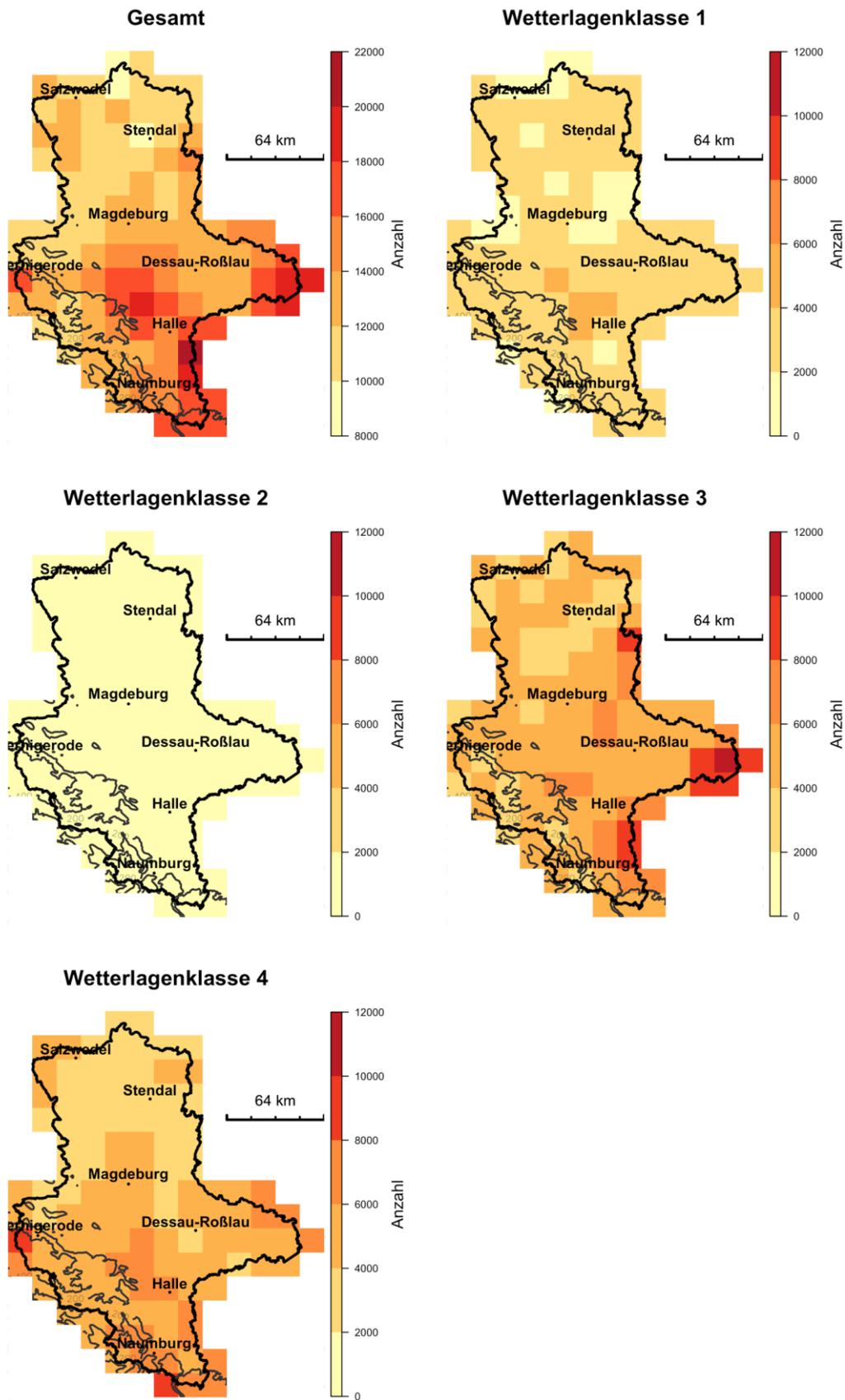


Abb. 15: Beobachtete Blitze: Gesamtzahl und die Anzahl je Wetterlagenklasse in den Sommerhalbjahren 1992 bis 2014. Die dünnen Konturlinien zeigen Höhenlinien 200 und 400 m über Normal-Null.

Die größte Anzahl von Blitzen wurden im Hochharz, im östlichen Harzvorland, im Naturraumbereich des Erzgebirgsvorlandes und sächsischen Hügellandes bis in die östlich der Dübener Heide gelegenen Landesteile beobachtet. Bis auf das Blitzanzahlmaximum im Hochharz, welches relativ selten bei Südwestanströmung auftritt, wurden die häufigsten Blitze in den flacheren Landesregionen angrenzend an die südlichen Mittelgebirge gezählt. Es ist anzunehmen, dass die Anregung von Konvektion an den Mittelgebirgen ein wichtiger Blitzauslöser ist.

Da das Blitzpotential für zukünftige Klimaperioden nicht aus Beobachtungen abgeleitet werden kann sowie aus Datenkonsistenzgründen, wurde die Gefährdungsgröße Blitzpotential in der Folge für das gegenwärtige wie auch für das zukünftige Klima mit Hilfe einer Parametrisierung des Blitzpotentials (s. Abschnitt 3.4) im regionalen Klimamodell COSMO-CLM berechnet. Dieses berechnete Blitzpotential wird gemeinsam mit den weiteren Gefährdungsgrößen im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.6 Konvektive Gefährdungsgrößen basierend auf ERA-Interim (Zeitraum 1979 – 2014)

Für die Referenzperiode wurden mit COSMO-CLM Simulationen für konvektiv extreme Tage, die mit der Reanalyse ERA-Interim angetrieben wurden, Gefährdungsgrößen berechnet. Die Karten der fünf im Projekt betrachteten Gefährdungsgrößen Zellzahl, Starkniederschlagspotential, Sturzflutpotential, Blitzpotential und Hagelpotential sind in Abb. 16 gezeigt. Hier wurde nicht nach Wetterlagen klassifiziert. Die gezeigten Größenwerte sind pro konvektiv extremem Tag bestimmt – von denen in der ERA-Interim-Periode 319 (s. Abschnitt 4.3) detektiert wurden.

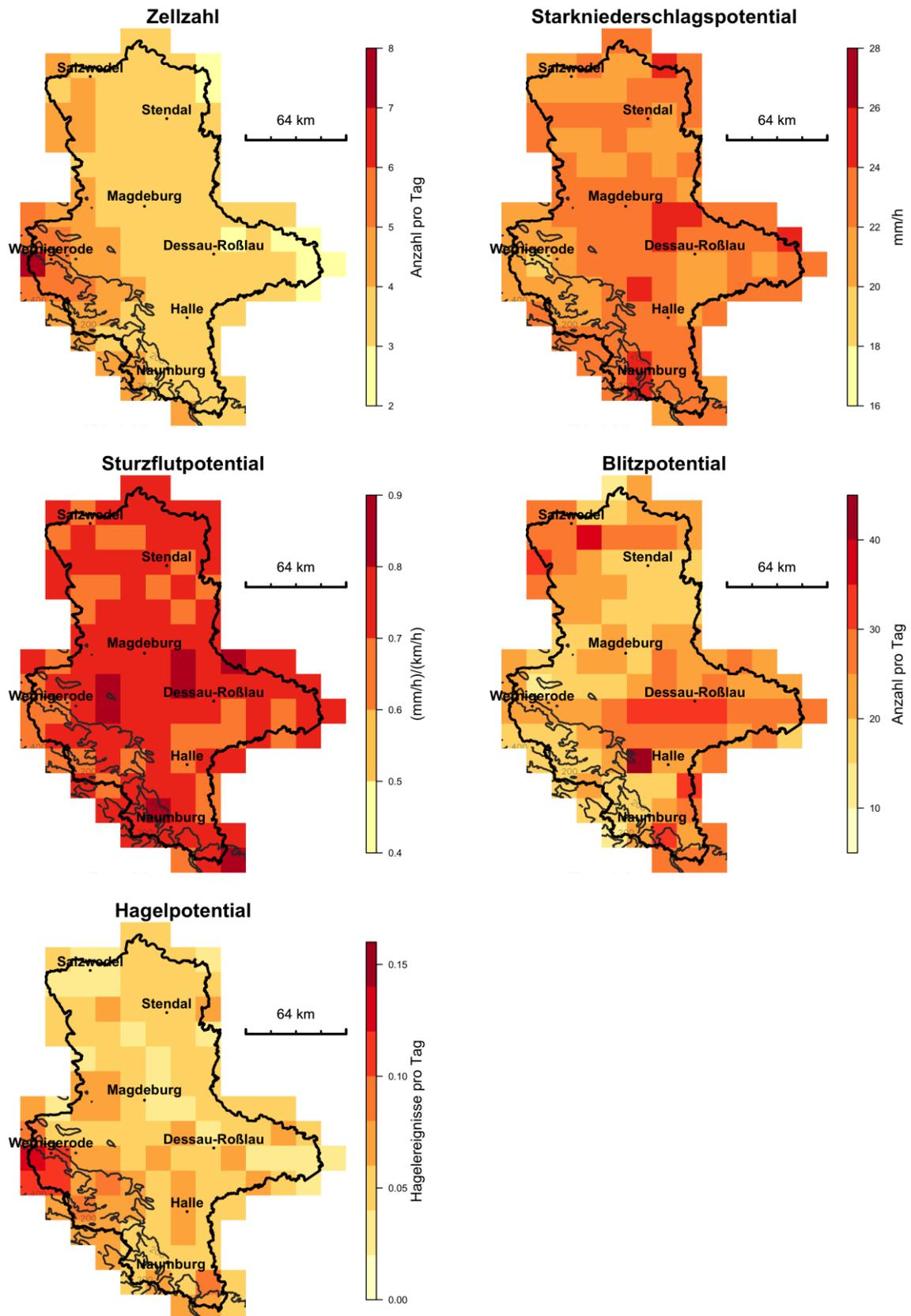


Abb. 16: Werte der Gefährdungsgrößen der konvektiv extremen Tage in der ERA-Interim-Periode (1979-2014).

Die Zellzahl zeigt, wie auch für die Radarperiode (2001-2014, Abb. 9), einen deutlichen Gradienten von West nach Ost. Am Interessantesten sind die Regionen des Harzes und die hügelige Region an der Landesgrenze zu Thüringen. Bei der gezeigten Anzahl von Zellen muss bedacht werden, dass für einzelne konvektive Tage typischerweise nur ein kleiner Flächenanteil von Sachsen-Anhalt von konvektiven Zellen überstrichen wird und andere Flächenanteile völlig unbetroffen sind. Durch die Mittelung der Zellzahl über alle konvektive Tage ergeben sich dann die kleinen Anzahlen pro Tag.

Das Starkniederschlagspotential hat eine weniger ausgeprägte räumliche Struktur. Mittlere Niederschlagsintensitäten von konvektiven Zellen im Wertebereich von etwa 20 bis 26 mm/h sind beachtlich. Interessanterweise sind die Intensitäten im Harz etwas geringer als im Umland. Dies ist weniger überraschend, wenn berücksichtigt wird, dass die Konvektion und damit die Niederschlagszellbildung gehäuft durch den Harz ausgelöst werden, aber die maximalen Niederschläge in den ziehenden konvektiven Zellen erst in späteren Stadien des Lebenszyklus einer Zelle ausfallen.

Das Sturzflutpotential zeigt ebenfalls nur ein schwach ausgeprägtes Muster, mit erhöhten Werten auf einer Linie, die etwa Wernigerode und Dessau-Roßlau verbindet. Dieser Streifen erhöhten Sturzflutpotentials könnte durch Anregung relativ langsam ziehender Zellen im Lee des Harzes bei Südwestanströmung erklärbar sein. Ein weiteres Maximum des Sturzflutpotentials findet sich in der hügeligen Region um Naumburg. Ganz im Norden, um Salzwedel, sind die mittleren Niederschlagsintensitäten unauffällig, aber dennoch wurde ein erhöhtes Sturzflutpotential simuliert. Hier häuften sich langsam ziehende Niederschlagszellen.

Bei der Gefährdungsgröße Blitzpotential fällt zunächst auf, dass das Maximum der Blitzanzahl im Harz, welches beobachtet wird (Abschnitt 4.5, Abb. 15), nicht simuliert wurde. Bei einem Vergleich von Simulation und Beobachtung in der Beobachtungsperiode der Blitze zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung. Aber natürlich konnte die Simulation sehr lokale Effekte leider immer noch nicht berücksichtigen. Beispielsweise zeigt die langjährige Klimazeitserie der Gewittertage (von 1880 bis heute) am Hohenpeißenberg/Bayern (Observatorium des Deutschen Wetterdienstes) eine plötzliche Zunahme der Häufigkeit im Jahr 1978. In diesem Jahr wurde ein 160 m hoher Sendemast am Hohenpeißenberg erbaut. Solche oder ähnliche Ereignisse können in den Simulationen nicht berücksichtigt werden. Sehr wohl ist die Orographie und die Landbedeckung in den Simulationen mit 1-km Gitterauflösung berücksichtigt, soweit sie die Dynamik und Thermodynamik der Atmosphäre beeinflussen. Die in COSMO-CLM verwendete Blitzparametrisierung berücksichtigt den atmosphärischen Zustand, aber lässt den direkten Einfluss der Landoberfläche (z.B. der Bodenfeuchte) unberücksichtigt. Zusammenfassend lässt sich dennoch aussagen, dass das Maximum zwischen Harz und Dessau-Roßlau robust simuliert wird, aber das Muster insgesamt stark von dem betrachteten Zeitraum innerhalb einer Klimaperiode abhängt.

Das Hagelpotential erreicht sein räumliches Maximum im Harz. Es basiert auf der Häufigkeit von Hagelereignissen und nicht auf der Hagelintensität (diese Größe wäre aus den Simulationen nur mit zu großer Unsicherheit ableitbar). Das Hagelpotential ist daher gut korreliert mit der Zellzahl und auch mit der Geländehöhe (kleinere Hagelkörner und Graupel schmelzen bei längerer Fallzeit und sommerlichen Temperaturen schnell auf).

Die räumlich gemittelten Werte der Gefährdungsgrößen sind in Tab. 3 zusammengefasst. In der Tabelle sind die mittleren Werte für alle konvektiven Tage und für alle Tage in den jeweiligen Wetterlagenklassen angegeben.

Tab. 3: Mittlere Werte der Gefährdungsgrößen konvektiv extremer Tage für alle Wetterlagen bzw. für die Wetterlagenklassen.

	Zellzahl (1/Tag)	Stark- niederschlagp. (mm/h)	Sturzflutp. (mm/h)/ (km/h)	Blitzp. (1/Tag)	Hagelp. (1/Tag)
Alle Wetterlagen	3.8	22	0.73	23	0.06
Klasse 1	2.1	23	0.64	19	0.04
Klasse 2	5.9	22	0.75	23	0.08
Klasse 3	3.4	23	0.65	28	0.07
Klasse 4	5.2	21	0.88	29	0.05

Die Wetterlagenklassen 1 bis 3 waren belegt mit Wetterlagen mit feuchter Südwestanströmung. Die unterschiedliche mittlere Zellzahl in diesen drei Klassen ist also durch die unterschiedliche Zyklonalität verursacht. Insbesondere sind in der Klasse 2 und 3 mehr Tage mit frontaler Aktivität als in Klasse 1, die eher ungestörte Sommerlagen repräsentiert. Auch in Klasse 4 werden viele Zellen in Zusammenhang mit frontaler Aktivität gezählt.

In Klasse 4 werden die zweitmeisten Zellen gezählt, aber diese Zellen haben im Mittel eine geringere Intensität. Allerdings ist das simulierte Sturzflutpotential in dieser Klasse durch die geringeren Zuggeschwindigkeiten am höchsten (insbesondere in den hügeligen Randregionen an der Grenze zu Thüringen).

Klasse 3 und 4 zeigten das größte Blitzpotential. In Abschnitt 4.4 wurde diskutiert, dass sich die Klasse 3 in den Klimaprojektionen wenig verändert und Klasse 4-Wetterlagen weniger häufig werden. Dies deutet wiederum darauf hin, dass das Blitzpotential in Zukunft geringer wird.

Eine wichtige Frage ist, wie robust die Muster der Gefährdungsgrößen sind und welchen Einfluss der bei Extremgrößen notwendigerweise kleine Stichprobenumfang von 319 Extremtagen hat. Hierzu wurde ein Streumaß berechnet (der sog. Interquartilsabstand mit Hilfe eines Bootstrap-Verfahrens). In Tab. 4 sind die räumlich gemittelten Streuwerte angegeben.

Tab. 4: Mittlere Streuwerte.

	Zellzahl	Starkniederschlag	Sturzflut	Blitzpotential	Hagelpotential
Streuwert (Einheiten: s. Tab. 3)	0.63	1.5	0.07	6.7	0.02
Streuw./Mittelw.	0.2	0.1	0.1	0.3	0.3
Verlässlichkeit	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1

Die Werte des Streumaßes belegen, dass die durch die Gefährdungsgrößen Zellzahl, Starkniederschlags- und Sturzflutpotential gezeigten Muster robust sind. Die Muster und auch die absoluten Werte durch den begrenzten Stichprobenumfang sind unsicherer für die Größen Blitz- und Hagelpotential. Dies wird deutlich, wenn der mittlere Streuwert zur Entdimensionierung durch den Mittelwert (aus Tab. 3) geteilt wird (zweite Zeile in Tab. 4). In der dritten Zeile wird aus dem Streuwert eine Verlässlichkeit der Bestimmung der Gefährdungsgrößen angegeben. Diese Verlässlichkeiten sind die auf Eins normierten Kehrwerte der zweiten Zeile.

4.7 Konvektive Gefährdungsgrößen basierend auf Klimasimulationen für die Gegenwart (1972 – 2005) und die Zukunft (2071 – 2100, RCP8.5)

Damit eine Gefährdung für zukünftige Klimaperioden berechnet werden kann, müssen Klimasimulation verwendet werden. Hier betrachten wir die Gefährdungsgrößen simuliert von COSMO-CLM angetrieben mit der globalen Klimasimulation des Modells EC-Earth (wie oben diskutiert, liefert MPI-ESM einen unbefriedigenden Jahresgang konvektiv extremer Tage und wurde daher als Antriebsmodell von den Untersuchungen ausgeschlossen).

Ein Vergleich der Gefährdungsmuster für die Gegenwart, entweder simuliert mit EC-Earth-Antrieb (Abb. 17) oder mit ERA-Interim-Antrieb (Abb. 16), zeigt, dass eine hohe Übereinstimmung, aber auch deutliche Unterschiede bestehen. Beispielsweise war in beiden Simulationen die Zellzahl groß im Bereich des Harzes, wohingegen in der Region zwischen Magdeburg und Stendal die EC-Earth angetriebene Simulation eine höhere Zellzahl zeigt. Die entsprechende Feldkorrelation beträgt gute 72 %. Auch die Feldkorrelation des Hagelpotentials liegt bei 50 % und die des Blitzpotentials bei 74 %. Die räumlich weniger strukturierten Größen Starkniederschlags- und Sturzflutpotential zeigen entsprechend eine geringere Korrelation. Auch zeigt die EC-Earth getriebene Simulation ein etwa 14 % geringeres Sturzflutpotential (im Mittel 0.6 (mm/h)/(km/h)) als mit der Reanalyse ERA-Interim. Das Hagelpotential ist um etwas unter 20 % größer simuliert.

Hierbei ist zu beachten, dass die Klimasimulation etwas früher beginnt und 9 Jahre früher endet als der ERA-Interim-Zeitraum. Das heißt, dass in der ERA-Interim-Periode der Klimawandel geringfügig weiter fortgeschritten ist. Vor allem aber sind die konvektiv

extremen Tage seltene Ereignisse, wodurch eine zufällige Musterkomponente impliziert wird. Hinzu kommt eine Unsicherheit in den EC-Earth Antriebsdaten.

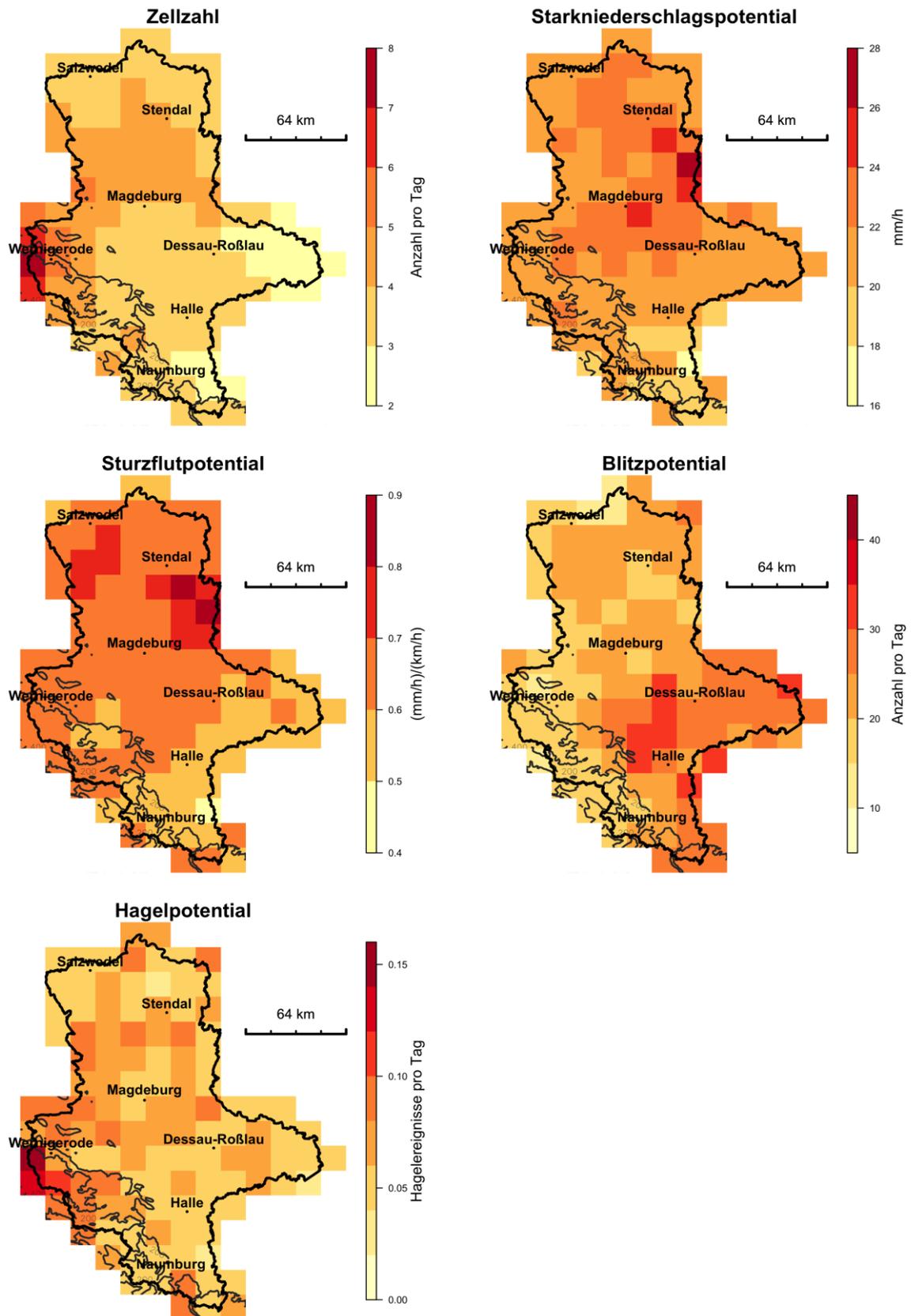


Abb. 17: Werte der Gefährdungsgrößen aus den Klimasimulationen für die Gegenwart (EC-Earth, 1972-2005).

In Abb. 18 sind die Werte der Gefährdungsgrößen für die Zukunft (Ende dieses Jahrhunderts) gezeigt unter Annahme des Szenarios RCP8.5. Es ist entscheidend zu beachten, dass die Werte pro konvektiv extremem Tag gezeigt sind. Für die Gegenwart wurden 266 und für die ferne Zukunft 609 extreme Tage in 30-jährigen Zeiträumen detektiert.

Die Abbildungen zeigen beispielsweise, dass die Zellzahl pro konvektiv extremem Tag leicht abnimmt (im Mittel von 3.8 auf 3.3 Zellen pro Tag je Gitterbox). Aber in Summe wurden für die Zukunft deutlich mehr Zellen in einer Klimaperiode simuliert. Die Veränderung der Zellzahl ist nur in den nördlichen Landesteilen negativ und positiv in den südlichen Landesteilen. Dies ist aus Abb. 19 ersichtlich, die die prozentuale Veränderung der Gefährdungsgrößen aufzeigt.

Abbildung 19 zeigt auch die bereits andiskutierte Verringerung des Blitzpotentials (um 27 %). Außerdem verringert sich das Hagelpotential deutlich um etwa 50 %. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, aber es ist eine plausible Hypothese, dass in einem wärmeren Klima mit einer größeren Fallhöhe des Niederschlags (aufgrund der Wolkenbildung in höherer Atmosphäre) ein größerer Anteil des Hagels bis zum Erreichen der Erdoberfläche aufschmilzt.

Das Starkniederschlagspotential zeigt pro Tag eine leichte prozentuale Zunahme (etwas über 3 %; aber Starkniederschläge sind in der Zukunft eben mehr als doppelt so häufig!). Das mittlere Sturzflutpotential nimmt deutlich um 20 % zu. Dies lässt häufigere und stärkere Sturzflutereignisse erwarten. Das Änderungssignal ist räumlich allerdings heterogen, mit einer Tendenz zu größeren Änderungen in den Landesteilen südlich von Magdeburg.

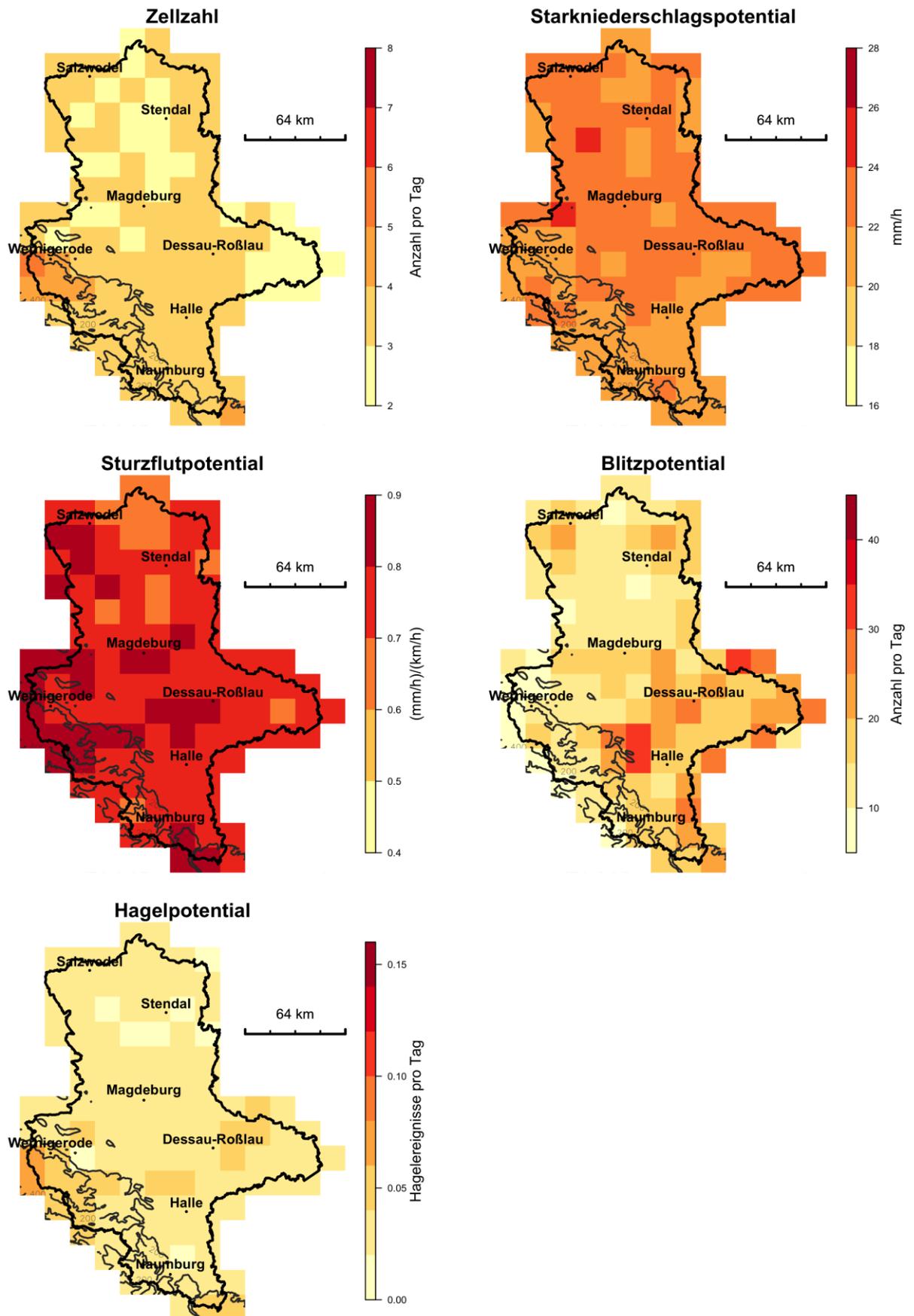


Abb. 18: Werte der Gefährdungsgrößen aus den Klimasimulationen für die Zukunft (2071-2100, RCP8.5).

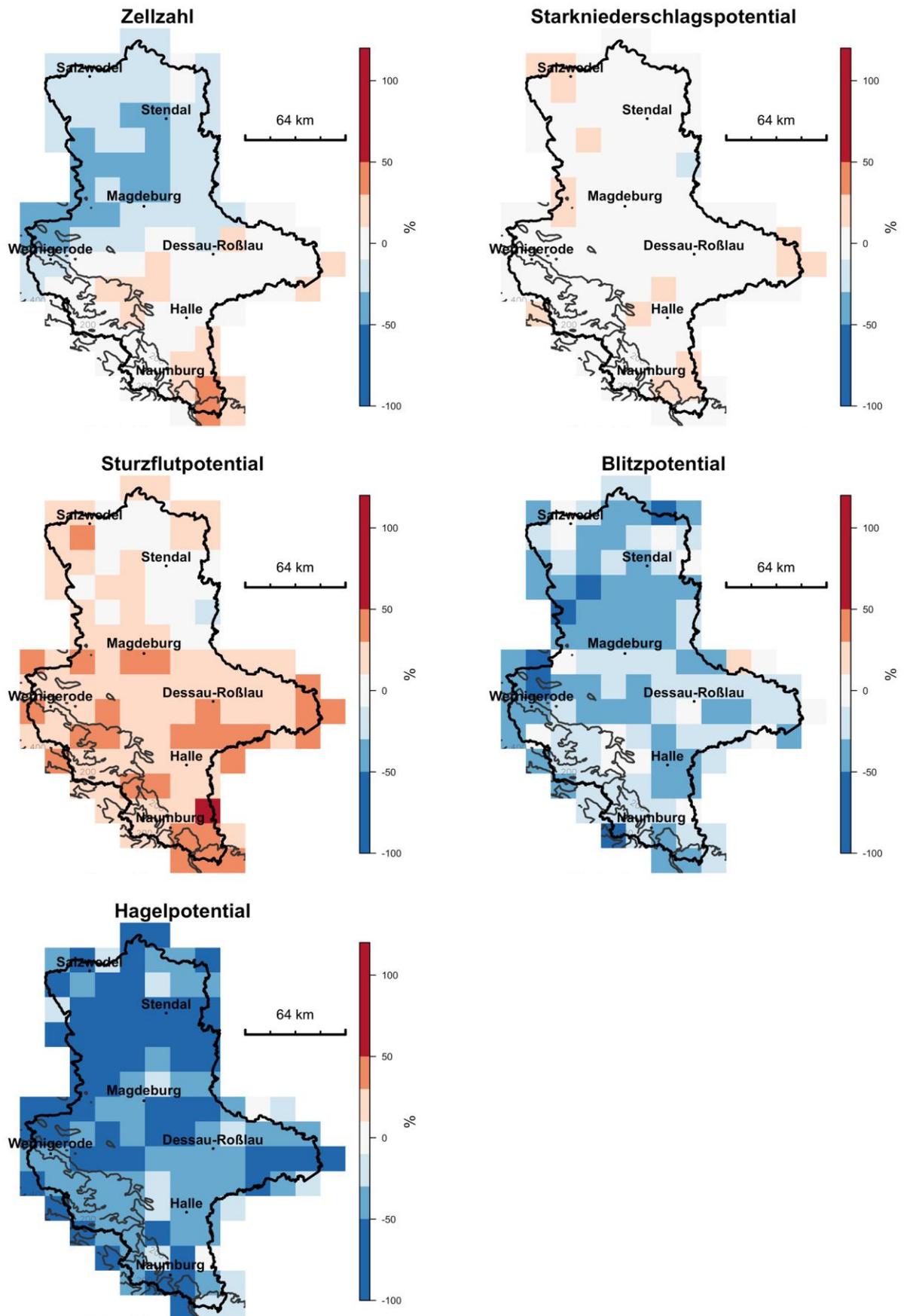


Abb. 19: Prozentuale Änderung der Werte der Gefährdungsgrößen in der Zukunft (2071-2100, RCP8.5) im Vergleich zur Gegenwart (1972-2005) aus den Klimasimulationen.

4.8 Gefährdungskarten

Die Informationen über die zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung der konvektiven Gefährdung wurden in Gefährdungskarten zusammengefasst. Wie in Abb. 3 schematisch dargestellt, geht in die Gefährdung die Information der Verteilung der Wetterlagen, der Anzahl konvektiv extremer Tage, und die räumliche Verteilung der Gefährdungsgrößen pro konvektivem Tag ein. Die Berechnungsformel der Gefährdung wurde in Abschnitt 3.5 angegeben.

Die für die Gegenwart und Zukunft berechnete Anzahl konvektiv extremer Tage wurde in Abschnitt 4.3 besprochen. Wie diskutiert, wurde bei der Gefährdungsberechnung auf die Klimaprojektionen mit dem globalen Modell EC-Earth zurückgegriffen, da dieses den Jahresgang der konvektiven Aktivität besser abbildete (Ergebnisse mit dem Modell MPI-ESM sind in Anhang B dargestellt).

In diesem Abschnitt wird zunächst die Gefährdungsänderung unter Annahme des Szenarios RCP8.5 diskutiert, da dieses das pessimistischere und vermutlich realistischere Szenario (s. Anhang C) ist. Nur für RCP8.5 wurden die extrem rechenaufwendigen höchstauflösenden Simulationen mit dem Klimamodell COSMO-CLM durchgeführt. Daher konnte auch nur für RCP8.5 die Berechnungsmethode 3 der Gefährdung angewendet werden.

Die mit EC-Earth projizierte Häufigkeit konvektiv extremer Tage ist in der Klimaperiode 2016 – 2045 um knapp 50 % und in der Klimaperiode 2071 – 2100 um 130 % größer als in der Gegenwart unter Annahme des Szenarios RCP8.5. Konvektiv extreme Tage sind bei Großwetterlagen mit südwestlicher Anströmung feuchter Luftmassen 3-mal häufiger als bei anderen Großwetterlagen. In Abschnitt 4.4 wurde gezeigt, dass diese feuchten südwestlichen Wetterlagen bis Ende dieses Jahrhunderts über 10 Prozentpunkte häufiger werden.

Die Entwicklung der Gefährdungsgrößen ist bis Ende des Jahrhunderts uneinheitlich (Abschnitt 4.7). Das Blitz- und Hagelpotential pro Tag nimmt stark ab. Das Sturzflutpotential nimmt dagegen in weiten Regionen stark (bis zu 50 %) zu. Die Anzahl konvektiver Niederschlagszellen pro konvektiv extremem Tag zeigt in ihrer Änderung einen ausgeprägten meridionalen Gradienten: starke Zunahme in den südlichen Landesteilen und starke Abnahme in den nördlichen Landesteilen (jeweils bis zu 50 %). Dies bedeutet nicht, dass sich bis Ende dieses Jahrhunderts die Gesamtzahl der konvektiven Zellen in den nördlichen Landesteilen verringert, da sich ja auch die Anzahl der konvektiven Tage mehr als verdoppelt.

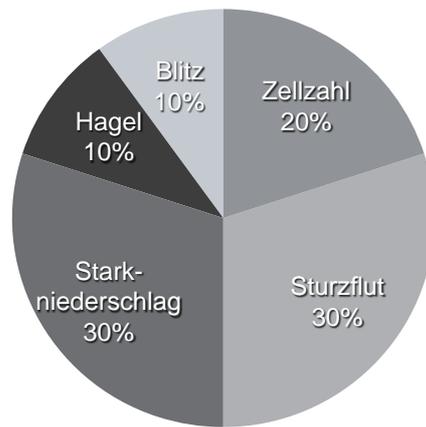


Abb. 20: Gewichte der Gefährdungsgrößen.

In die Berechnungsformel der Gefährdung müssen Gewichte für die verschiedenen Gefährdungsgrößen eingehen. In Abschnitt 4.6, Tab. 4 wurde abgeschätzt, dass die Berechnung der Größe Starkniederschlag 3-mal verlässlicher ist bei gegebenem geringen Stichprobenumfang der Extreme als Blitz- oder Hagelpotential. Diese Verlässlichkeit wurde für die Berechnungen der Gefährdung verwendet. Damit sind die Gewichte für die Gefährdungsgrößen Zellzahl, Starkniederschlags-, Sturzflut-, Blitz- und Hagelpotential 0.2, 0.3, 0.3, 0.1, 0.1, wie in der Abb. 20 graphisch dargestellt.

Die somit berechnete räumliche Verteilung und zeitliche Entwicklung der Gefährdung (mit Methode 3) ist in Abb. 21 gezeigt. Die berechnete Gefährdung in der Gegenwart ist am höchsten in einem breiten Streifen nordöstlich des Harzes (über Magdeburg bis Stendal) und in der hügeligen Grenzregion zu Thüringen.

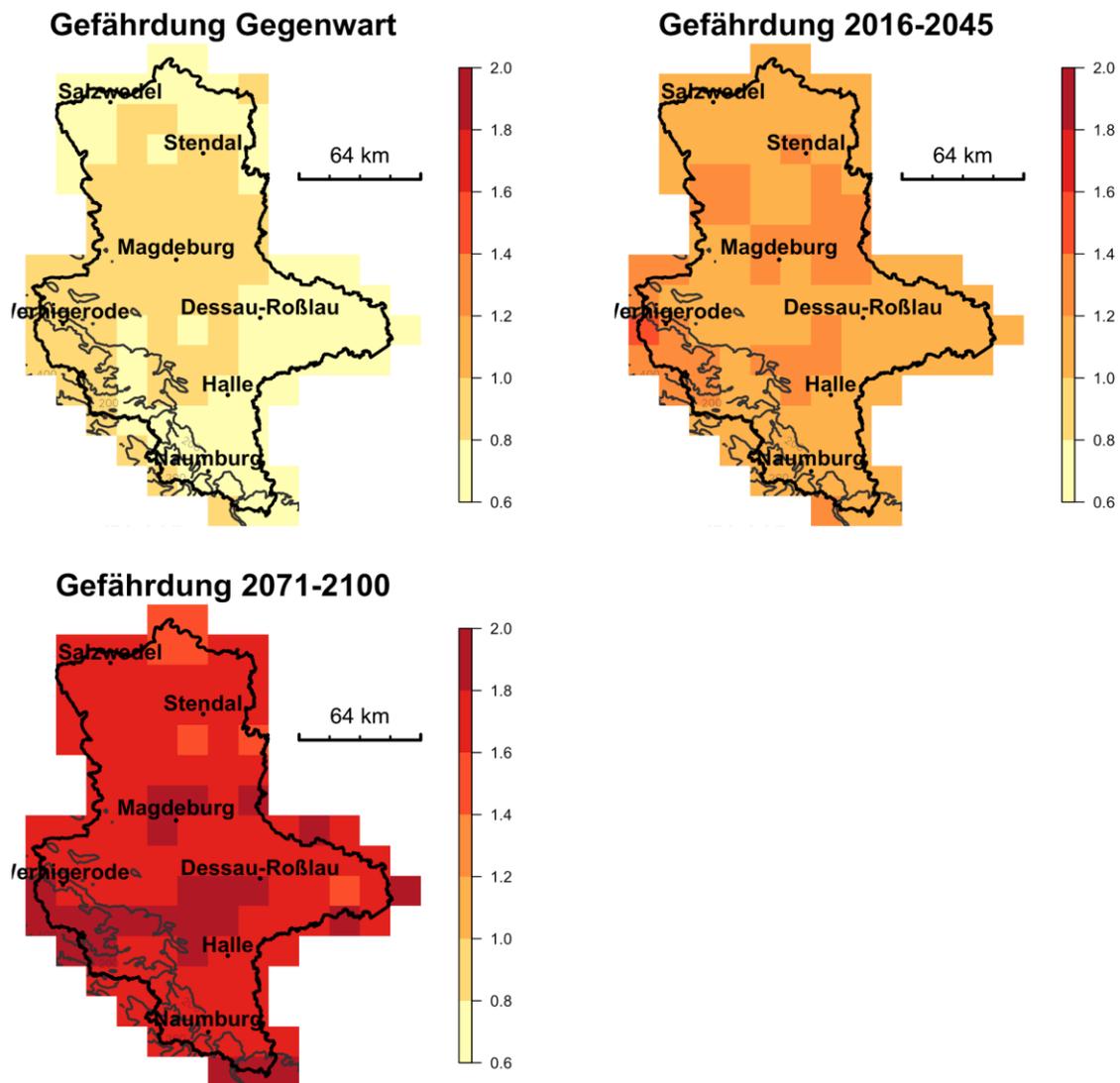


Abb. 21: Gefährdung in verschiedenen Klimaperioden (normiert auf die maximale Gefährdung in der Periode Gegenwart 1972 - 2005) unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5.

In allen Landesteilen wurde für die Zukunft eine markante Zunahme der konvektiven Gefährdung berechnet. Dies wird in Abb. 22, die die relative Änderung im Vergleich zur Gegenwart zeigt, deutlich. Für die Klimaperiode 2016 – 2045 muss in allen Landesteilen und insbesondere in den in der Gegenwart eher gering gefährdeten Regionen östlich von Dessau-Roßlau mit einer Zunahme bis zur Verdopplung gerechnet werden.

Bis in die Klimaperiode 2071 – 2100 ist nach den vorliegenden Ergebnissen mit bis zu einer Verdreifachung der Gefährdung durch konvektive Ereignisse zu rechnen. Besonders verstärkt ist die Gefährdung in den in der Gegenwart relativ ungefährdeten Regionen um Halle und östlich von Dessau-Roßlau. Hier nimmt vor allem auch die Sturzflutgefahr zu. Dies lässt sich mit einer Zunahme von langsam ziehenden Luftmassengewittern in antizyklonaler feuchter Südwestanströmung erklären. In den Regionen nördlich bis nordöstlich des Harzes ist immer noch mit einem Anstieg um 75 bis 100 % zu rechnen.

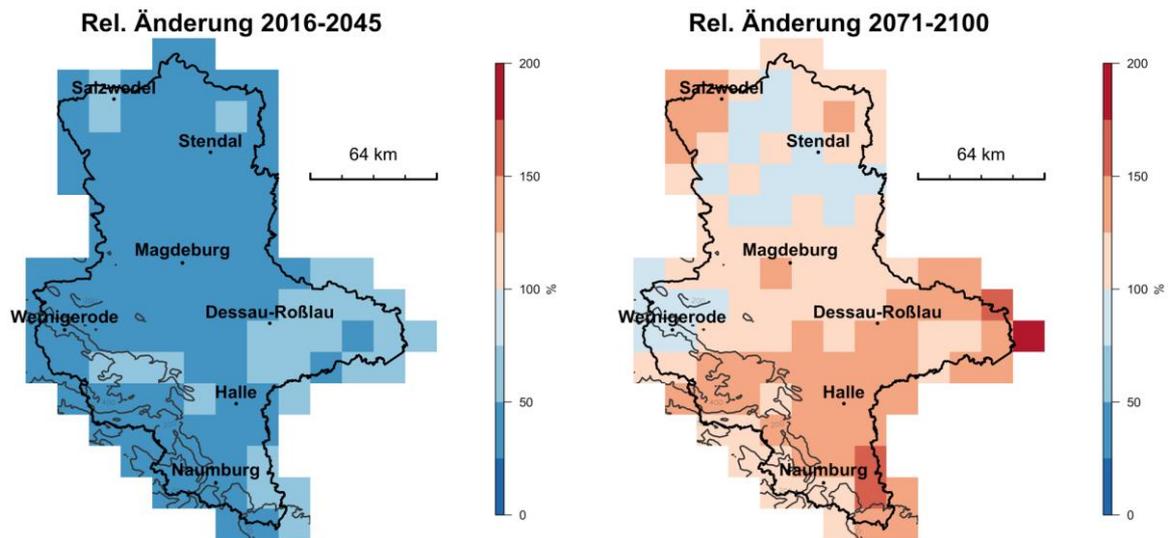


Abb. 22: Relative Gefährdungsänderung im Vergleich zur Gegenwart 1972 - 2005 (in Prozent; z.B. bedeutet 100 % eine Verdopplung der Gefährdung) unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5.

Die mittlere Gefährdung und die mittlere Gefährdungsänderung sind in der Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 5: Mittlere Gefährdung und Gefährdungsänderung relativ zur Gegenwart (1972 - 2005) unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5.

	Gegenwart	2016 - 2045	2071 - 2100
Mittlere Gefährdung	0.8	1.2	1.7
Gefährdungsänderung	0 %	50 %	120 %

Die obigen Ergebnisse sind mit der Methode 3 (Abschnitt 3.5) berechnet worden. Diese Methode ist die rechenintensivste und daher bei weitem aufwendigste Methode. In der Literatur wird die Veränderung der Gefährdung durch den Klimawandel gelegentlich aufgrund einer Veränderung der Wetterlagenhäufigkeit diskutiert. Dies entspricht der Methode 1 in Abschnitt 3.5. Diese Methode ist recht einfach mit Hilfe existierender globaler Klimaprojektionen anzuwenden, kann aber veränderte Luftmasseneigenschaften nicht berücksichtigen. Mit dieser einfachen Methode unterschätzt man die Veränderung bis Ende dieses Jahrhunderts deutlich: knapp 25 % statt 120 % mittlere Zunahme der Gefährdung. Berücksichtigt man die großskaligen Veränderungen der Luftmasse wie in Methode 3 beschrieben, vernachlässigt aber die regionalen und lokalen Veränderungen (z.B. den Rückgang der Anzahl konvektiver Zellen pro extremem Tag im nördlichen Sachsen-Anhalt), dann wird die Veränderung überschätzt: 133 % mittlere Zunahme der Gefährdung. Entsprechende Gefährdungskarten sind in Anhang B gezeigt. Für konvektive Extreme ist es daher notwendig, regionale und lokale Effekte zu berücksichtigen.

Obige Gefährdungen wurden unter Annahme des Treibhausgasszenarios RCP8.5 (mit einer projizierten globalen Temperaturerwärmung von etwa 4 °C zu Ende des Jahrhunderts im Vergleich zur jüngeren Vergangenheit) erstellt. Wird das deutlich optimistischere Szenario RCP2.6 zu Grunde gelegt (mit etwa 1 °C Erwärmung), dann ist bei Gefährdungsberechnung mit der Methode 2 eine mittlere Gefährdung von 1.1 für den Zeitraum 2016 – 2045 und 1.2 für den Zeitraum 2071 – 2100 zu erwarten. Da die Methode 2 die berechnete Gefährdung leicht überschätzt (s. Anhang B), ist also eine Gefährdungsverstärkung um 40 % bis knapp 50 % in der näheren bzw. fernerer Zukunft zu erwarten. Für das RCP2.6 Szenario zeigen die meisten Klimamodellsimulationen ab etwa 2050 keine weitere Erwärmung. Abbildung 23 zeigt die mit Methode 2 berechnete relative Gefährdungsänderung unter Annahme des Szenarios RCP2.6. Es ist zu beachten, dass auch die regionalen und lokalen Veränderungen mit Methode 2 nicht so realistisch dargestellt werden können wie in Methode 3. Daher sollte die räumliche Verteilung der Gefährdungsänderung in Abb. 23 nicht überinterpretiert werden.

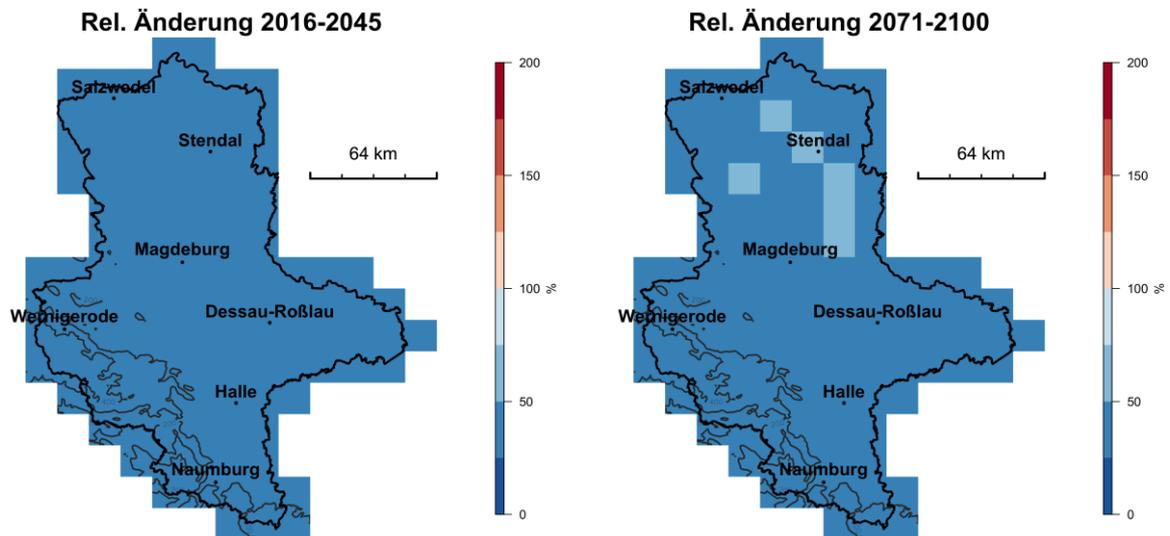


Abb. 23: Relative Gefährdungsänderung berechnet mit Methode 2 im Vergleich zur Gegenwart 1972 - 2005 (in Prozent; z.B. bedeutet 100 % eine Verdopplung der Gefährdung) unter Annahme des Klimaszenarios RCP2.6.

Danksagung

Zu allererst gilt unser Dank dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie Sachsen-Anhalt (MULE) für die Ermöglichung des Projekts.

Dem projektbegleitenden Arbeitskreis bestehend aus MULE, Deutschem Wetterdienst, Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt und Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt unter Leitung des Landesamtes für Umweltschutz sei für die Beschaffung essentieller Daten und die gute Zusammenarbeit gedankt. Insbesondere geht unser Dank an Elmar Weigl für die Kooperation und die Bereitstellung der Radardaten.

Nicht zuletzt danken wir Christoph Brendel. Dessen Vorarbeiten und Erklärungen erlaubten erst eine erfolgreiche Bearbeitung des Projekts. Wir danken auch den engagierten Kolleginnen und Kollegen, die an und mit dem COSMO-CLM arbeiten und die die Statistiksoftware R (<http://r-project.org>) weiterentwickeln. Die Berechnungen wurden zum Großteil am Rechner LOEWE CSC (<https://csc.uni-frankfurt.de>) durchgeführt.

Literaturverzeichnis

BISSOLLI, P., 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, Nr. 4, 253-260.

BRENDEL, C.; BRISSON, E.; HEYNER, F.; WEIGL, E.; AHRENS, B., 2014. (Hrsg.: Deutscher Wetterdienst): Bestimmung des atmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. 72 pp. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 244)

BRENDEL, C., 2009: Konvektion im Taunus und Umgebung: Verteilung und Zugbahnen. *Diplomarbeit*, Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 154 pp.

BRISSON E., C. BRENDEL, S. HERZOG, B. AHRENS (2016) Lagrangian evaluation of convective shower dynamics in a convection permitting model. *Meteorologische Zeitschrift*. Eingereicht.

BRISSON, E., N. LEPS, B. AHRENS, 2017: Konvektionserlaubende Klimamodellierung. *PROMET*. In rev.

DEE, D. P., and 35 co-authors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, Nr. 656, 553-597. DOI: 10.1002/qj.828.

GIORGETTA, M. A., JUNGCLAUS, J. et al., 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 5, Nr. 3, 572-597.

HAZELEGER, W., WANG, X. et al. , 2012: EC-Earth V2.2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate Dynamics* 39, 2611-2629.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution to the Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Cambridge University Press*, Cambridge, 1005 pp.

JOHNSON, R. H., MAPES, B. E., 2001: Mesoscale Processes and Severe Convective Weather. In: DOSWELL III, C. A. (Hrsg.): Severe Convective Storms. *Meteorological Monographs* 28, Nr. 50, American Meteorological Society, Boston, 71-122.

WEIGL, E., 2008: Radarniederschlag - Prinzip der Niederschlagsbestimmung mit Radar. Version 1.0, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 6 pp.

WINTERRATH, T., BRENDEL, C., SCHMITT, A., 2015: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. (Hrsg.): Deutscher Wetterdienst, Offenbach. Nr. **3**, 22pp.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R. et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* **77**, Nr. **3**, 437-471.

OLBRÜCK, G., 1975: Das Wetterradar. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst **7**, *Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst*, Selbstverlage des Deutscher Wetterdienstes, Offenbach, 60 pp.

R CORE TEAM., 2016: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

SAUVAGEOT, H., 1992: Radar Meteorology. *Artech House Publishers*, Boston, 384 pp.

SEIFERT, A., & Beheng, K. D., 2006: A two-moment cloud microphysics parameterization for mixed-phase clouds. Part 2: Maritime vs. continental deep convective storms. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **92**(1-2), pp67-82.

STEINACKER, R., DORNINGER, M., WÖLFELMAIER, F., KRENNERT, T., 2000: Automatic Tracking of Convective Cells and Cell Complexes from Lightning and Radar Data. *Meteorology and Atmospheric* **72**, 101-110.

WAGNER, A. J. SELTMANN, H. KUNSTMANN, 2015: 5 year radar-based rainfall statistics: disturbances analysis and development of a post-correction scheme for the German radar composite. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **12**, 1765-1808.

Anhang A: Kennzahlen und Kennungen der 40 objektiven Wetterlagen

NR	KENNUNG	ANSTRÖMRICHTUNG	ZYKLONALITÄT IN 950 HPA	ZYKLONALITÄT IN 500 HPA	FEUCHTE
1	XXAAT	nicht definiert	antizyklonal	antizyklonal	trocken
2	NOAAT	Nordost	antizyklonal	antizyklonal	trocken
3	SOAAT	Südost	antizyklonal	antizyklonal	trocken
4	SWAAT	Südwest	antizyklonal	antizyklonal	trocken
5	NWAAT	Nordwest	antizyklonal	antizyklonal	trocken
6	XXAAF	nicht definiert	antizyklonal	antizyklonal	feucht
7	NOAAF	Nordost	antizyklonal	antizyklonal	feucht
8	SOAAF	Südost	antizyklonal	antizyklonal	feucht
9	SWAAF	Südwest	antizyklonal	antizyklonal	feucht
10	NWAAF	Nordwest	antizyklonal	antizyklonal	feucht
11	XXAZT	nicht definiert	antizyklonal	zyklonal	trocken
12	NOAZT	Nordost	antizyklonal	zyklonal	trocken
13	SOAZT	Südost	antizyklonal	zyklonal	trocken
14	SWAZT	Südwest	antizyklonal	zyklonal	trocken
15	NWAZT	Nordwest	antizyklonal	zyklonal	trocken
16	XXAZF	nicht definiert	antizyklonal	zyklonal	feucht
17	NOAZF	Nordost	antizyklonal	zyklonal	feucht
18	SOAZF	Südost	antizyklonal	zyklonal	feucht
19	SWAZF	Südwest	antizyklonal	zyklonal	feucht
20	NWAZF	Nordwest	antizyklonal	zyklonal	feucht
21	XXZAT	nicht definiert	zyklonal	antizyklonal	trocken
22	NOZAT	Nordost	zyklonal	antizyklonal	trocken
23	SOZAT	Südost	zyklonal	antizyklonal	trocken
24	SWZAT	Südwest	zyklonal	antizyklonal	trocken
25	NWZAT	Nordwest	zyklonal	antizyklonal	trocken
26	XXZAF	nicht definiert	zyklonal	antizyklonal	feucht
27	NOZAF	Nordost	zyklonal	antizyklonal	feucht
28	SOZAF	Südost	zyklonal	antizyklonal	feucht
29	SWZAF	Südwest	zyklonal	antizyklonal	feucht
30	NWZAF	Nordwest	zyklonal	antizyklonal	feucht
31	XXZZT	nicht definiert	zyklonal	zyklonal	trocken
32	NOZZT	Nordost	zyklonal	zyklonal	trocken
33	SOZZT	Südost	zyklonal	zyklonal	trocken
34	SWZZT	Südwest	zyklonal	zyklonal	trocken
35	NWZZT	Nordwest	zyklonal	zyklonal	trocken
36	XXZZF	nicht definiert	zyklonal	zyklonal	feucht
37	NOZZF	Nordost	zyklonal	zyklonal	feucht
38	SOZZF	Südost	zyklonal	zyklonal	feucht
39	SWZZF	Südwest	zyklonal	zyklonal	feucht
40	NWZZF	Nordwest	zyklonal	zyklonal	feucht

Quelle:

https://www.dwd.de/DE/leistungen/wetterlagenklassifikation/kennzahlen_kennungen.html;jsessionid=A50345B3C70FC22F91B75DDA72AD74FC.live21064?nn=16102&lsblid=375412

Anhang B: Aspekte der Berechnung der Gefährdungskarten

Die Berechnung der Gefährdung im Abschnitt 4.8 basiert auf der Verwendung einer globalen Klimasimulation mit dem Modell EC-Earth. Für die Gegenwart kann auch die Reanalyse ERA-Interim verwendet werden, die den globalen atmosphärischen Zustand besser abbildet. In der Abb. B1 und der Tab. B1 wird die berechnete Gefährdung mit EC-Earth bzw. ERA-Interim verglichen. Der Vergleich zeigt, dass die globalen Klimadaten in der Berechnung der Gefährdung für die Gegenwart weitgehend austauschbar sind.

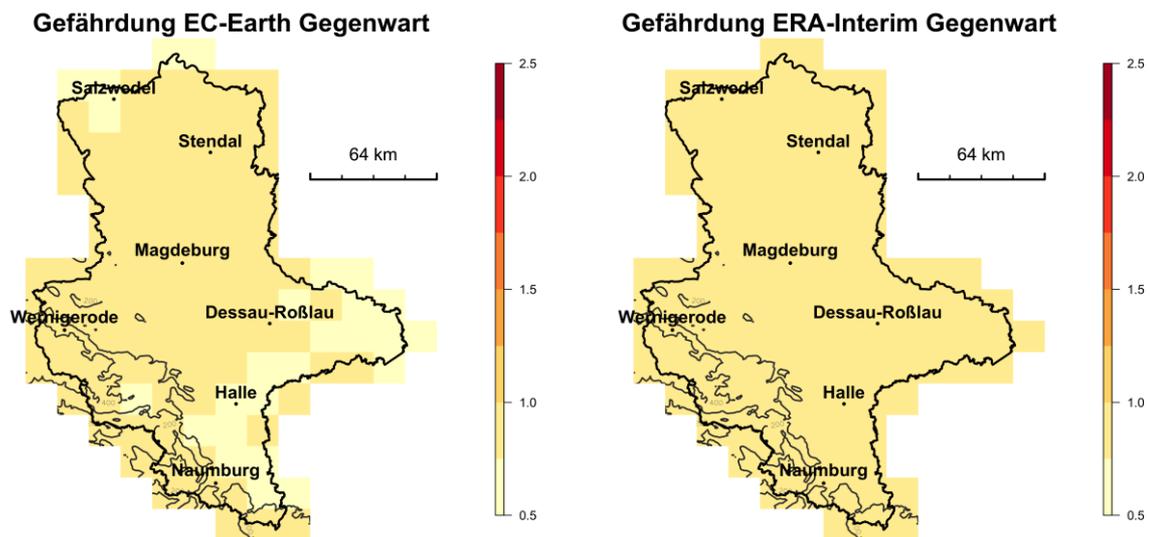


Abb. B1: Gefährdung für die Gegenwart berechnet auf Basis des globalen Datensatzes EC-Earth (links; Zeitraum 1979 bis 2014) und dem globalen Datensatz ERA-Interim (rechts; Zeitraum 1972 bis 2005). Im Vgl. zu Abb. 21 geänderte Farbtabelle.

Tab. B1: Mittlere Gefährdung berechnet mit Methode 1/2/3 unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 und berechnet mit Methode 1/2 unter Annahme des Klimaszenarios RCP2.6. Die Werte der Gegenwart berechneten sich aus den Jahren 1979 – 2014 für ERA-Interim und aus den Jahren 1972 - 2005 für die Projektionen mit EC-Earth und MPI-ESM.

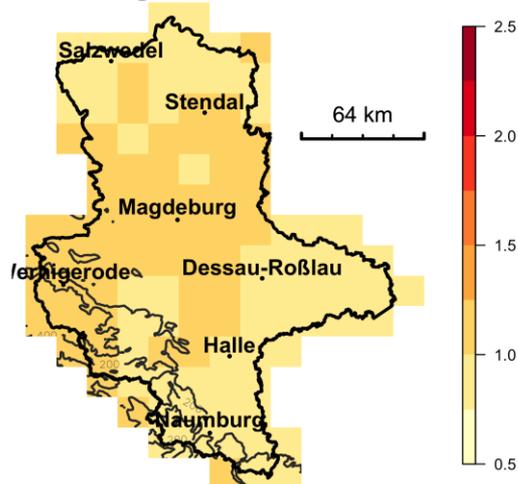
	Gegenwart	2016 - 2045		2071 - 2100	
ERA-Interim	0.8/0.8/0.8				
		RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
EC-Earth	0.8/0.8/0.8	0.9/1.1	0.9/1.2/1.2	0.9/1.2	1.0/1.9/1.7
MPI-ESM	0.8/0.8/0.8	0.9/0.9	0.9/1.0/1.0	1.0/1.0	1.1/1.2/1.1

In Tab. B1 werden die mittleren Gefährdungen für die Berechnung mit den globalen Klimasimulationen der Modelle EC-Earth und MPI-ESM verglichen. Dabei wurden für MPI-ESM mit Szenario RCP8.5 mit Berechnungsmethode 3 allerdings die Werte der Gefährdungsgrößen pro konvektiv extremem Tag aus den COSMO-CLM Simulation mit EC-Earth Antrieb verwendet. Die Werte der Gefährdungen zeigen, dass bei Verwendung von Methode 1, d.h. bei alleiniger Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung der

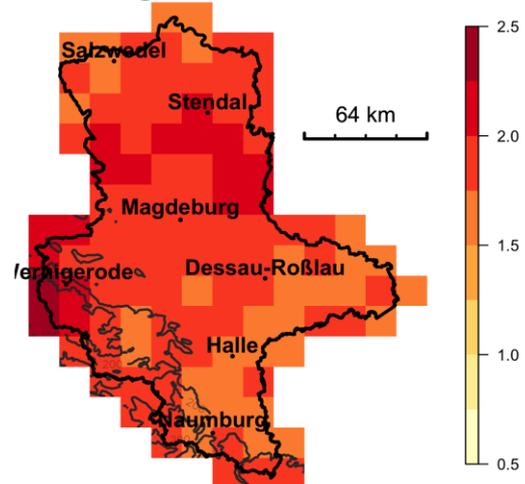
Großwetterlagen, ein geringer Unterschied durch die globalen Simulationen resultierte. Deutlich kleiner berechnete MPI-ESM die Veränderung der Gefährdung aber mit Methode 2 bzw. 3, da in diese Methoden die Anzahl der konvektiv extremen Tage eingeht (im Zeitraum 2071 – 2100 609 Tage für EC-Earth, aber nur 377 für MPI-ESM, s. Tab. 2).

Der Einfluss der Berechnungsmethode wird auch nochmal in Abb. B2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Berechnungsmethode auch einen Einfluss auf die Gefährdungsmuster hat. Methode 3 ist die einzige der drei Varianten, die in der Lage ist, veränderte regionale und lokale Rückkopplungen zu berücksichtigen. Methode 1 ist zu verwerfen, da sie die Gefährdungsänderung deutlich unterschätzt. Die Methode 2 überschätzt die Veränderung leicht und hat auch ein anderes Gefährdungsmuster als Methode 3, aber hat den Vorteil, dass keine teuren speicher- und rechenintensiven Simulationen mit COSMO-CLM mit 1-km Gitterdistanz für die Zukunft durchgeführt werden müssen.

Gefährdung 2071-2100 Methode 1



Gefährdung 2071-2100 Methode 2



Gefährdung 2071-2100 Methode 3

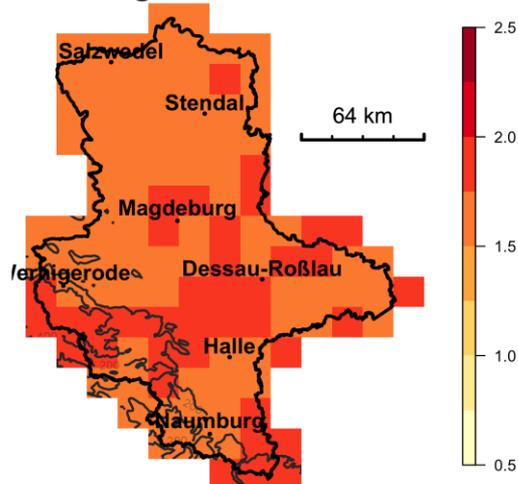


Abb. B2: Gefährdung für die Klimaperiode 2071-2100 mit den Methoden 1, 2 und 3 (wie in Abb. 21, aber mit anderer Farbskala) unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5.

Die Abb. B3 zeigt im Vergleich die für die Klimaperiode 2071-2100 berechnete Gefährdung unter Annahme des Klimaszenarios RCP2.6. Methode 3 konnte für dieses Szenario nicht berechnet werden. Es ist aber zu beachten, dass Methode 3 leicht unterschiedliche Gefährdungsmuster ergeben würde (s. Abb. B2). Die insgesamt geringere zukünftige Gefährdung unter dem optimistischen Szenario RCP2.6 im Vergleich zur Gefährdung unter RCP8.5 zeigt sich aber deutlich.

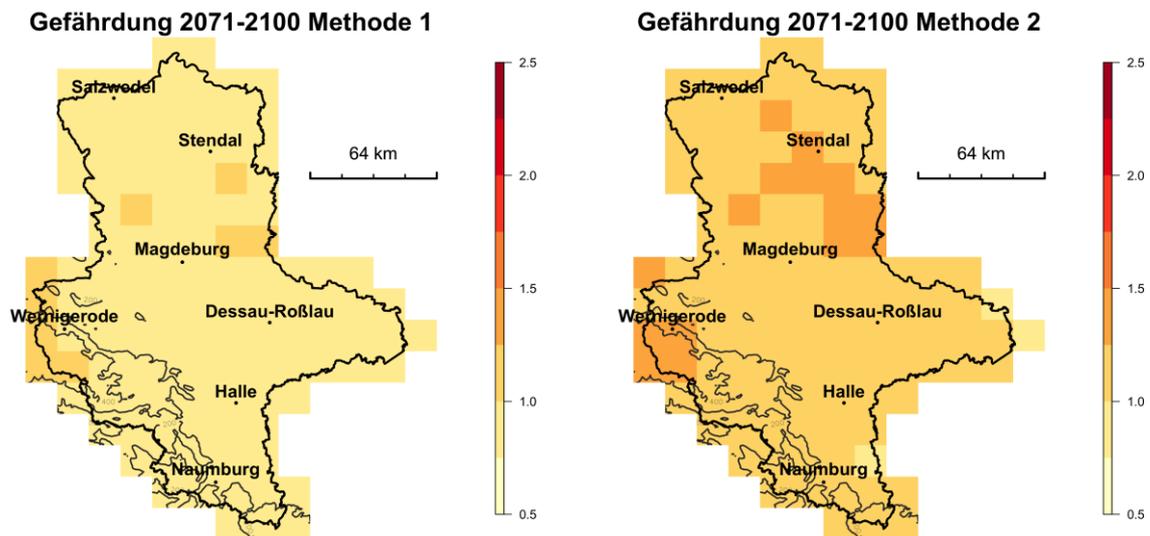


Abb. B3: Gefährdung für die Klimaperiode 2071-2100 mit den Methoden 1 und 2 unter Annahme des Klimaszenarios RCP2.6.

Anhang C: CO₂-Emissionen

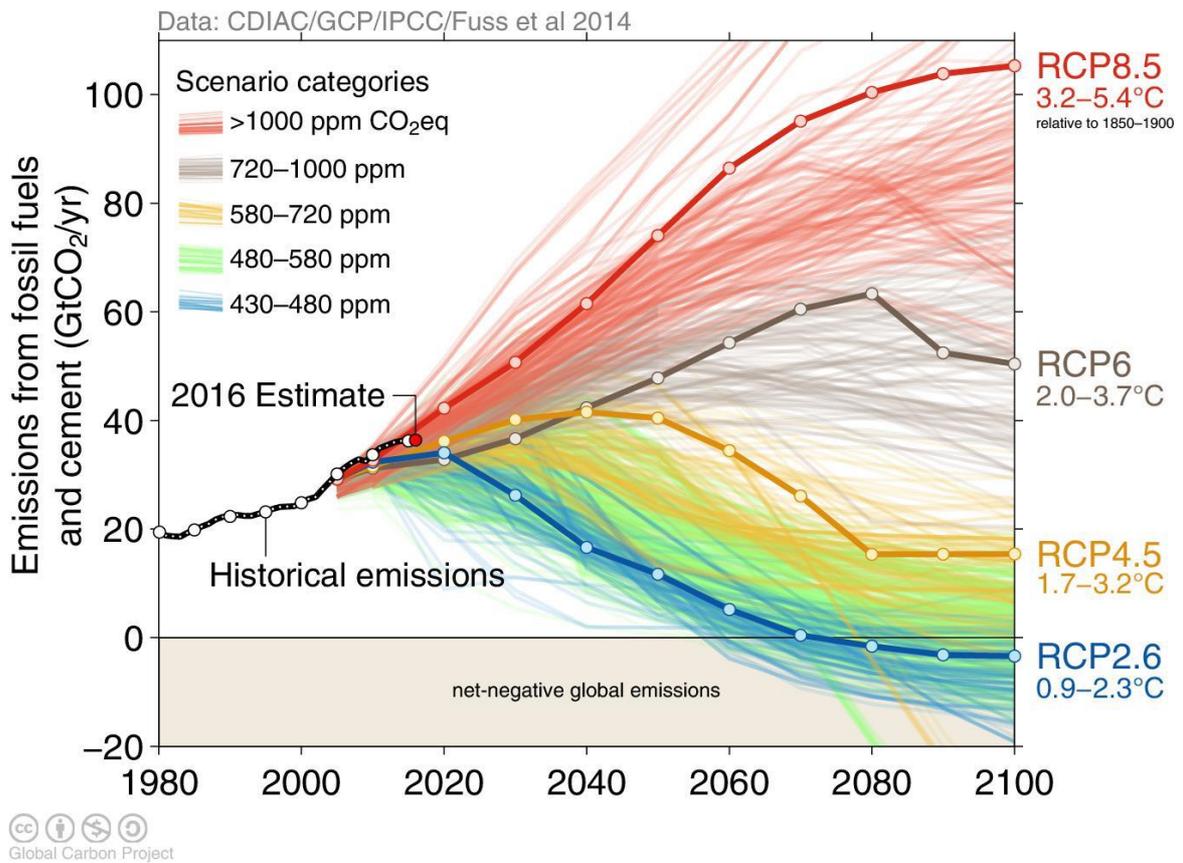


Abb. C1: RCP Emissionsszenarien, die den Klimaprojektionen des letzten Sachstandberichts des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ zugrunde lagen, und historische Emissionen (<http://www.globalcarbonproject.org>, Stand 28. Nov. 2016). Die Temperaturbänder geben die Bandbreite der projizierten Temperaturänderungen bei gegebenen Szenarien zum Ende dieses Jahrhunderts an.