Analyse des Klimawandels für die Deutsche Bahn: Studie zur räumlichen Ausprägung in Deutschland

P. Hoffmann & A. Spekat

30. April 2021

Zusammenfassung

Einleitung und Hintergrund

Die Infrastrukturbetreiber (Schiene, Wasserstraße, Straße sowie Strom- und Wasserversorgungsnetze) sowie die Verkehrsunternehmen des Personen- und Güterverkehrs stehen angesichts des Klimawandels vor großen Herausforderungen. Die Erfahrung zeigt, dass Schäden, verursacht durch extreme Wetterereignisse und veränderte Klimabedingungen nicht nur zu erheblichen Reparaturkosten, sondern auch aufgrund von Folgestörungen zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten führen. Es müssen daher sowohl Anpassungsstrategien für die Verkehrsinfrastruktur als auch für Verkehrsunternehmen entwickelt werden, um mögliche Schäden und Folgen zu minimieren und die Resilienz der Verkehrssysteme zu erhöhen. Unter den Verkehrsinfrastruktursystemen ist der Schienenverkehr zwar vergleichsweise robust und resilient, dennoch bergen Störungen bedingt durch Extremwetterereignisse das Potenzial weitreichender Folgen für das Gesamtsystem. Deshalb ist es von großer Bedeutung, ein umfassenderes Bild von den Faktoren zu gewinnen, die einen besonderen Einfluss auf den Betriebsablauf im Schienenverkehr ausüben.

Der hier betrachtete externe Einflussfaktor für den Schienenverkehrssektor ist das Klima. Es steht für die langfristige Verteilung der Häufigkeit von wiederkehrenden Witterungsepisoden, welche durch verschiedene meteorologische Größen lokal und großräumig beschrieben werden. Extreme und die damit verbundenen kritischen Schwellen der Messgrößen sind dabei von besonderer Bedeutung. Welche großräumigen Strömungsmuster über Europa in welcher Jahreszeit zu Extremwetter neigen und somit das Potential für witterungsbedingte Störungen an der Schieneninfrastruktur tragen, soll in dieser Studie erstmals umfassend diagnostiziert werden.

Vor dem Hintergrund, dass der Klimawandel in seiner Wirkung am stärksten beim Auftreten von Extremereignissen spürbar wird, ist ein besseres Verständnis über die dynamische Ursache und Wirkung von witterungsbedingten Schäden erforderlich, um das Gesamtsystem langfristig betrachtet widerstandsfähiger auszubauen. Bereits jetzt ist durch Daten belegt, dass die Schwere von hydroklimatischen Extremereignissen in Mitteleuropa durch längere zeitliche Andauern verstärkt wird. Es ist eine Entwicklung, die in regionalen Klimaszenarien bislang eher unterschätzt wird.

Zielstellung

In dieser Studie wurde die Diagnose des regionalen Klimawandels in Deutschland verfeinert und mit möglichen Entwicklungsszenarien verknüpft. Die dafür betrachteten Zeiträume waren 1961-1990 (gestern),

1991-2020 (heute) und 2031-2060 (morgen).

Ergänzend lag der Fokus auf meteorologischen Einflussfaktoren bzw. Strömungsmustern über Europa, die zu extremen Temperaturen, hohen Windgeschwindigkeiten oder Starkniederschlag neigen und somit potentiell Störungen an der Schieneninfrastruktur der Deutschen Bahn verursachen können. Dazu wurden Klimaindikatoren abgeleitet, die sich an kritischen Schwellenwerten der bodennahen Luftschicht orientieren. Es erfolgte eine erste Zusammenhangsanalyse der Beziehungen zwischen Störungsmeldungen im Bahnbetrieb und extremen Klimaindikatoren. Dabei wurden die Meldungen aus den Gewerken Leit- und Sicherungstechnik (LST), Gleis (GL) und Oberleitung (OL) verwendet. Die Untersuchungen fanden auf der Ebene der Produktionsdurchführungen (PDen) statt. Als Datengrundlage wurden die Störungsmeldungen der Jahre 2015 bis 2019 verwendet. Es ist zu bedenken, dass dieser Zeitraum nicht repräsentativ ist, weil er nur einen Teil der möglichen Bandbreite des Witterungsgeschehens beinhaltet, was sonst in dem klimatologischen Zeitraum von 30 Jahren möglich wäre.

Vor diesem Hintergrund gibt eine Kritikalitätsbetrachtung nur erste Hinweise darauf, welche Ursachen (Strömungsmuster) jahreszeitlich betrachtet verstärkte Wirkungen (Extremwetterbedingungen) hervorrufen und somit Folgen (Störungen) für die Schieneninfrastruktur und den Bahnverkehr nachsichziehen. Durch den Klimawandel verändern sich sowohl die Häufigkeit und das zeitliche Andauern bestimmter Strömungsmuster als auch deren Ausprägung. Beides zusammen, kann die Wirkung und Folgen verstärken, wenn das Gesamtsystem nicht widerstandsfähiger gegenüber äußeren Witterungseinflüssen angepasst wird.

Datengrundlage

Die Tageswerte der meteorologischen Messstationen und Klimasimulationen wurden als Mittelwerte der 34 räumlichen Einheiten (PDen) der Deutschen Bahn zusammengefasst. Gebiete mit starken lokalen Unterschieden werden dadurch geglättet. Jedoch rücken regionale Unterschiede zwischen den einzelnen PDen und deren mögliche Verschiebungen deutlicher in den Vordergrund.

Beobachtungsdaten

Die meteorologische Datengrundlage für den Beobachtungszeitraum 1961-2019 sind Tageswerte von Stationsmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Es werden nur Stationen berücksichtigt, die über den Gesamtzeitraum zum Messnetz gehören. Dazu zählen ca. 250 Klimastationen und ca. 1000 Niederschlagsstationen. Mittels einer räumlichen Interpolation, werden in einem Folgeschritt für jeden Parameter die Stationsdaten auf ein Rasterformat von 12x12km überführt und später mit den Umrissen der PPDen der Deutschen Bahn verschnitten und aggregiert.

Szenariendaten

Die Modellierung des Klimas wird mit globalen Klimamodellen durchgeführt, in die für den europäischen Raum regionale Klimamodelle mit einer Auflösung von 12x12km eingebettet sind. Die Projektionen eines historischen und zukünftigen Klimas von 1971-2100 erfolgen dabei unter der Annahme von verschiedenen Entwicklungspfaden bezüglich der Treibhausgase. Betrachtet werden das *Weiter-wie-bisher* Szenario (RCP8.5[1]), das von einer ungebremsten Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre ausgeht und das *Klimaschutz*- Szenario (RCP2.6), in dem eine Welt beschrieben wird, in der die globale Mitteltemperatur auf einen Wert von 2 Grad oberhalb des vorindustriellen Zustands begrenzt wird.

[1] RCP steht für Representative Concentration Pathway, das sind repräsentative Entwicklungspfade des Erdsystems, aus denen spezifische Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre resultieren.

In der Studie wurde ein Ensemble von Klimamodellen eingesetzt, das 8 Globalmodelle und 5 Regionalmodelle umfasst (Tab.1). Da Klimamodellierungen sehr aufwändig sind, wurden nicht alle Kombinationen von den Modellierergruppen gerechnet. Das Ensemble umfasst 20 Modellkombinationen für das Szenario RCP8.5 und 6 Modellkombinationen für das Szenario RCP2.6.

Die modellierten klimatischen Entwicklungen werden mit zunehmendem Zeithorizont prägnanter. Das heißt, im *Weiter-wie-bisher*-Szenario werden die Entwicklungen zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zu heute deutlicher. In der nahen bis mittleren Zukunft heben sich viele Veränderungen noch nicht deutlich vom Zustand der Gegenwart ab. Im Fall des *Klimaschutz*-Szenarios sind die Änderungen gegenüber der Gegenwart vergleichsweise gering und bleiben auch in der fernen Zukunft auf einem ähnlichen Niveau.

Schwellwertkorrektur

Das Klima in Simulationen kann gegenüber dem beobachteten Klima im Vergleichszeitraum Verschiebungen aufweisen. Für Klimaindikatoren (z.B. Hitzetage), die auf festen Schwellen basieren (tmax>30°C) bedeutet dies, dass die Anzahl je Modell entweder zu hoch oder zu niedrig liegen kann. Eine Schwellwertkorrektur wurde angewendet und dient dem Zweck, dass im Vergleichszeitraum alle abgeleiteten Schwellwertindikatoren aus Simulationsdaten die gleiche Seltenheit aufweisen wie in den Beobachtungen.

Tabelle 1:

Die in der Studie benutzten Klimamodelle und die verfügbaren Szenario-Rechnungen. Zeilen: Globale Antriebsmodelle, Spalten: Regionale Klimamodelle: Verwendung der Treibhausgasszenarios RCP2.6 und RCP8.5 (⊗⊗); Verwendung von RCP8.5 (⊗).

GCM/RCM	CLM	REMO	RCA	HIR	WRF
CanESM	⊗	⊗			
CNRCM5	⊗	⊗	⊗		
ECEarth	⊗⊗	⊗	⊗⊗	⊗	
HadGEM		⊗	⊗⊗		⊗
IPSCM5A			⊗		
MIROC5		⊗			
MPI-ESM	⊗⊗	⊗⊗	⊗⊗		⊗
NorESM1				⊗	

Ergebnisse – Exposition bezüglich der Extreme

In der Studie wurden die 34 PDen als zusammenhängende regionale Flächeneinheiten definiert. Lokale Besonderheiten können aufgrund der räumlichen Mittelung nicht aufgelöst werden. Im Fokus der Analyse des Klimawandels stehen Verschiebungen von regionalen Mustern in Deutschland. In diesen Flächen hat sich bereits das beobachtete Klima deutschlandweit zwischen den Zeitbereichen 1961-1990 und 1991-2020 um 1 Grad erwärmt. Bis zur Mitte des Jahrhunderts (2031-2060) wird sehr wahrscheinlich ein weiterer Temperaturanstieg um 1 Grad dazukommen. Wie sich darüber hinaus Extreme in den einzelnen PDen verändert haben und was an zukünftigen Entwicklungen noch zu erwarten ist, wurde in Form von *Steckbriefen* und *sortierbaren Tabellen* zusammengestellt:

- **Steckbriefe:** http://www.pik-potsdam.de/~peterh/db2020/site1/steckbriefe/Duisburg/
- **sortierbare Tabelle:** http://www.pik-potsdam.de/~peterh/db2020/tab/tab.html

Hitze

Tage mit mehr als 30°C Höchsttemperatur bezeichnet man als *Hitzetage*. In Deutschland lag die mittlere Anzahl über alle PDen im Zeitraum 1961-1990 bei 3,6 Tagen. Heute, 1991-2020 liegt dieser Wert bei 8,1 Tagen und damit doppelt so hoch. Zur Mitte des Jahrhunderts 2031-2060 wird die Anzahl der Hitzetage weiter zunehmen. Das Ensemblemittel über 20 regionale Klimamodelle liegt dann bei 10,9 Tagen. Im RCP8.5 Szenario setzt sich diese Tendenz bis zum Ende des Jahrhunderts weiter fort. Extreme Hitzesommer der Gegenwart wie bspw. 2003 oder 2018 werden dann häufiger. Die Bandbreite ist gegenüber anderen Größen vergleichsweise gering und die regionalen Muster bleiben erhalten. Im Vergleichszeitraum von 1971-2020 eilen die beobachteten Entwicklungen denen in den Simulationen voraus.

Die *Hitzeintensität* beschreibt den Wert, welcher mit einer bestimmten Seltenheit verbunden ist. Hier ist es der dritthöchste Wert im Jahr. Dieser ist im Beobachtungszeitraum von 29,2°C (1961-1990) auf 31,0°C (1991-2020) angestiegen. Die Tendenz ist weiter steigend.

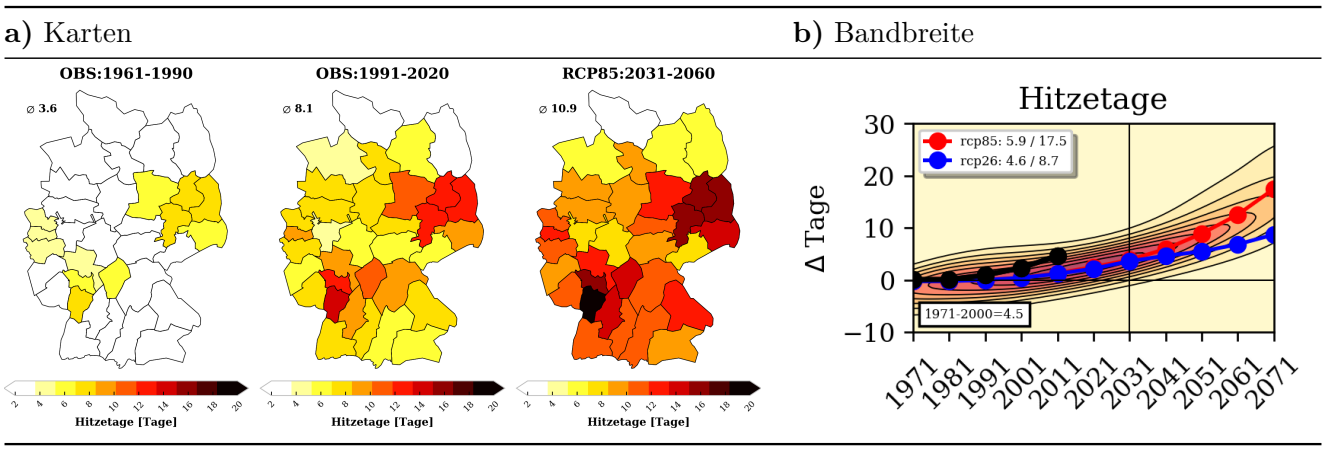


Abbildung 1:

a) *Karten zur Entwicklung der Anzahl von Hitzetagen in den 34 PDen: 1961-1990 (gestern), 1991-2020 (heute) und 2031-2060 (morgen, RCP8.5).* ***b)*** *Bandbreite der Entwicklung für Deutschland von 1971-2071 unter Annahme von RCP8.5: Ensemblemittel RCP2.6 (blau), RCP8.5 (rot) und Beobachtung (schwarz).*

Kälte

Tage mit weniger als 0°C Höchsttemperatur bezeichnet man als *Eistage*. In Deutschland lag die mittlere Anzahl über alle PDen im Zeitraum 1961-1990 bei 23,7 Tagen. Heute, 1991-2020, liegt dieser Wert bei 16,9 Tagen. Zur Mitte des Jahrhunderts 2031-2060 wird die Anzahl weiter abnehmen. Das Ensemblemittel über 20 regionale Klimamodelle liegt dann bei 8,1 Tagen. Im RCP8.5 Szenario setzt sich diese Tendenz bis zum Ende des Jahrhunderts weiter fort. Die Bandbreite ist gegenüber anderen Größen vergleichsweise gering. Im Vergleichszeitraum von 1971-2020 eilen die beobachteten Entwicklungen denen in den Simulationen voraus.

Die *Kälteintensität* beschreibt den Wert, welcher mit einer bestimmten Seltenheit verbunden ist. Hier ist es der drittniedrigste Wert im Jahr. Dieser ist im Beobachtungszeitraum von -4,2°C (1961-1990) auf -2,7°C (1991-2020) angestiegen. Die Tendenz ist weiter steigend.

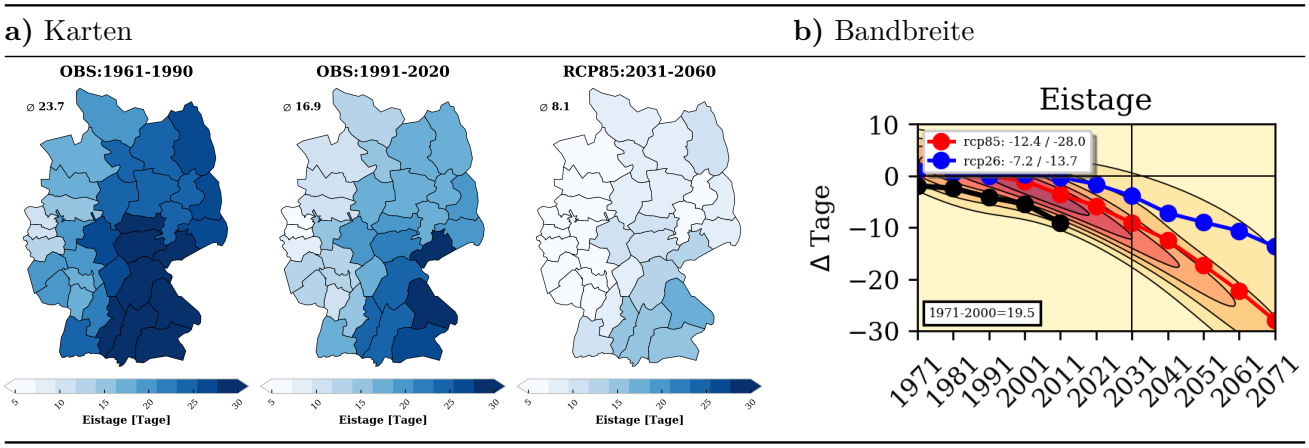


Abbildung 2:

a.) *Karten zur Entwicklung der Anzahl von Eistagen in den 34 PDen: 1961-1990 (gestern), 1991-2020 (heute) und 2031-2060 (morgen, RCP8.5).* ***b.)*** *Bandbreite der Entwicklung für Deutschland von 1971-2071 unter Annahme von RCP8.5: Ensemblemittel RCP2.6 (blau), RCP8.5 (rot) und Beobachtung (schwarz).*

Starkregen

Tage mit mehr als 20 mm Tagesniederschlag bezeichnet man als *Starkregentage*. Auf der Ebene der PDen umfasst dies Tage, an denen es im Schnitt mehr als die kritische Schwelle Niederschlag gab. In Deutschland lag die mittlere Anzahl über alle PDen im Zeitraum 1961-1990 bei 2,5 Tagen. Heute, 1991-2020 liegt dieser Wert bei 2.7 Tagen. Zur Mitte des Jahrhunderts 2031-2060 wird die Anzahl weiter zunehmen. Das Ensemblemittel über 20 regionale Klimamodelle liegt dann bei 3,3 Tagen. Im RCP8.5 Szenario setzt sich diese Tendenz bis zum Ende des Jahrhunderts weiter fort. Die Bandbreite ist gegenüber anderen Größen vergleichsweise gering.

Die *Regenintensität* beschreibt den Wert, welcher mit einer bestimmten Seltenheit verbunden ist. Hier ist es der dritthöchste Wert im Jahr. Dieser ist im Beobachtungszeitraum von 16,7 mm/Tag (1961-1990) auf 17,1 mm/Tag (1991-2020) angestiegen. Die Tendenz ist weiter steigend.

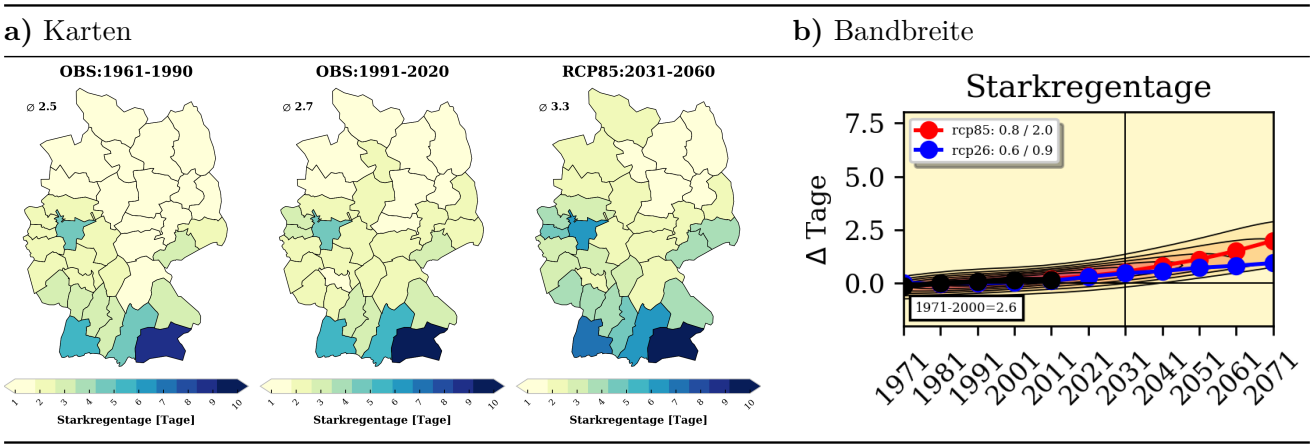


Abbildung 3:

a) *Karten zur Entwicklung der Anzahl von Starkregentagen in den 34 PDen: 1961-1990 (gestern), 1991-2020 (heute) und 2031-2060 (morgen, RCP8.5).* ***b)*** *Bandbreite der Entwicklung für Deutschland von 1971-2071 unter Annahme von RCP8.5: Ensemblemittel RCP2.6 (blau), RCP8.5 (rot) und Beobachtung*

(schwarz).

Sturm

Tage mit mehr als 17 m/s Spitzenwind (Windstärke 8) bezeichnet man als *Sturmtage*. *Schwerer Sturm* herrscht ab Windspitzen von mehr als 25 m/s (Windstärke 10). In Deutschland lag die mittlere Anzahl an *Sturmtagen* über alle PDen im Zeitraum 1961-1990 bei 27,4 Tagen. Heute, 1991-2020, liegt dieser Wert bei 20,6 Tagen. Zur Mitte des Jahrhunderts 2031-2060 könnte die Anzahl wieder etwas ansteigen. Inwieweit der Rückgang der beobachteten Anzahl der *Sturmtage* auf Veränderungen von Strömungsmustern zurückzuführen ist, kann zu diesem Zeitpunkt nicht abschließend diagnostiziert werden. Das Ensemblemittel über 20 regionale Klimamodelle lasst tendenziell eher eine Abnahme der *Sturmtage* und eine Zunahme der *schweren Sturmtage* erahnen. Zwischen den beobachteten und projizierten Entwicklungen zeichnen sich größere Unstimmigkeiten ab, die es weiter zu beobachten gilt. Die Analyse der Kritikalität von Großwetterlagen über Europa geht dabei in diese Richtung.

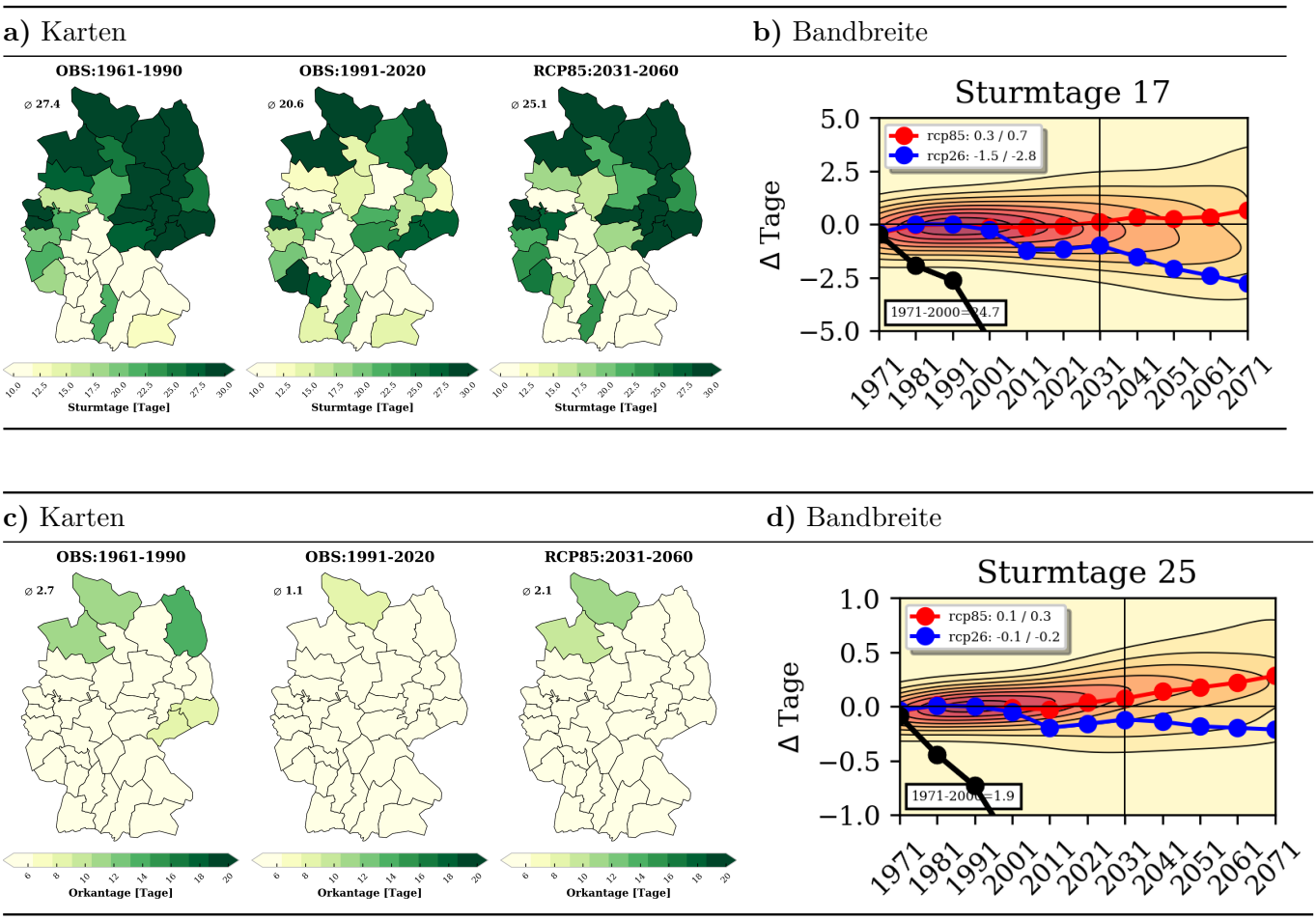


Abbildung 4:

a) *Karten zur Entwicklung der Anzahl von Sturmtage in den 34 PDen: 1961-1990 (gestern), 1991-2020 (heute) und 2031-2060 (morgen, RCP8.5).* ***b)*** *Bandbreite der Entwicklung für Deutschland von 1971-2071 unter Annahme von RCP8.5: Ensemblemittel RCP2.6 (blau), RCP8.5 (rot) und Beobachtung (schwarz). Das Gleiche für schwere Sturmtage (**c**,**d**).*

Ensemblebandbreite

Unter Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios (RCP8.5) zeigt jedes Ensemblemitglied eine andere Reaktion hinsichtlich der Änderungssignale für ausgewählte Klimaindikatoren. Abbildung 5 illustriert in einer Übersicht die Vielfalt der Modellergebnisse für verschiedene Kategorien von Extremen. Für die Mehrheit der Indikatoren herrscht eine hohe Richtungseinigkeit bezüglich der zukünftigen Zunahme/Abnahme bis 2061-2090 gegenüber 1971-2000 (z.B. Hitze, Kälte, Starkregen). Die Stärke der Wirkung hängt maßgeblich davon ab, ob sich das mittlere Temperaturniveau um weitere 2, 3 oder 4 Grad erhöht. Bereits in der Gegenwart (1991-2010) und nahen Zukunft (2031-2060) zeichnen sich Entwicklung ab, die dann in der fernen Zukunft (2061-2090) an Deutlichkeit zunehmen.

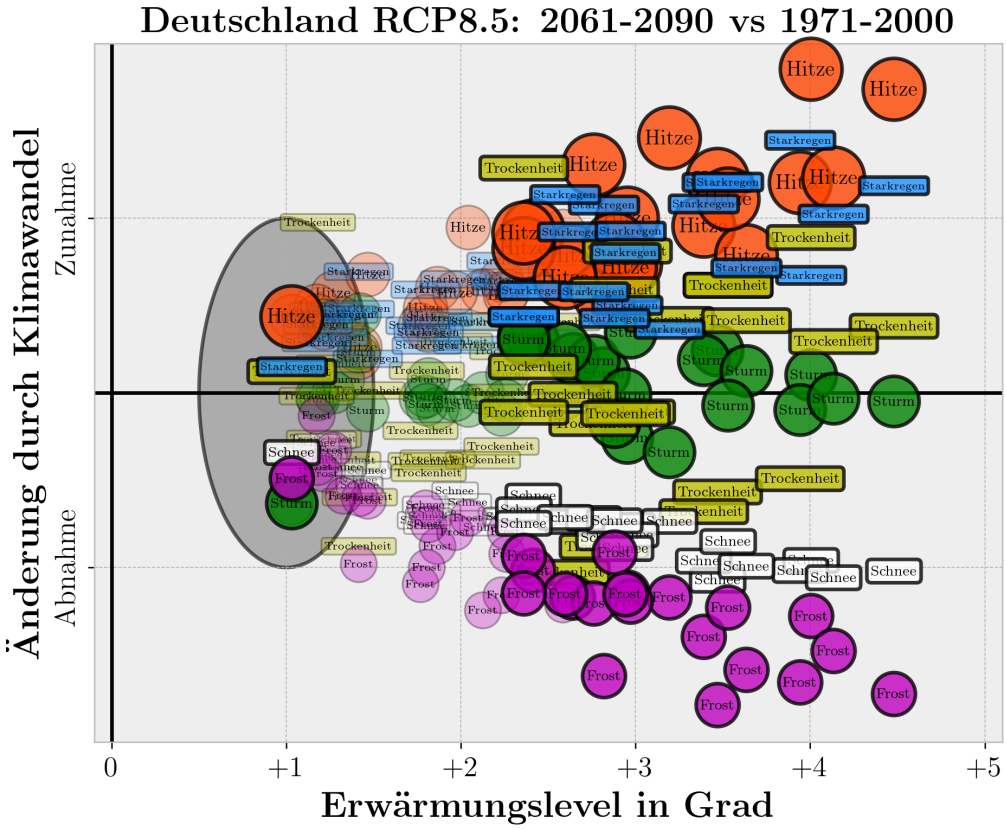


Abbildung 5:

Projizierte Änderungen von Klimaextremen in Deutschland durch ein Modellensemble (siehe Tab.1) für die nahe und ferne Zukunft (2031-2060 und 2061-2090) mit Bezug zur Periode 1971–2000 für das RCP8.5 Szenario: Hitze (orange), Kälte (lila), Starkregen (blau) und Sturm (grün).

Ergebnisse – Kritikalität

Für den Zeitraum von 2015-2019 liegen tägliche Störmeldungen an der Schieneninfrastruktur der Deutschen Bahn je PD vor. Grundsätzlich ist der Betrachtungszeitraum zu kurzgefasst, da innerhalb von 5 Jahren in der Regel nicht die gesamte Bandbreite von möglichen Witterungsextremen auftritt. Einen groben Überblick über bestehende Zusammenhänge erhält man, wenn man die verschiedenen Daten eines Tages parallel aufträgt und filtert. Abbildung 6 zeigt, dass hohe Temperaturen und hohe Windgeschwindigkeiten mit überdurchschnittlich vielen Störmeldungen verknüpft sind. Die regionalen Muster unter Vorgabe von bestimmten Schwellwerten zeigen die weiteren Abbildungen 7, 8, 9 und 10. Dabei wurde geschaut, ob es beim Überschreiten mehr Störmeldungen gab als im Mittel. Die sich ergebenden regionalen Muster geben Hinweise auf eine höhere Kritikalität gegenüber bestimmten Extremen.

Aus Zusammenhängen zwischen dem Störgeschehen infolge extremer Witterung in der beobachteten Vergangenheit lassen sich Regeln ableiten, wie das System reagiert, wenn sich zukünftig an der Häufigkeit und Intensität kritischer Parameter etwas grundlegend ändert. Das Lernen aus Daten ist dabei ein zentrales Werkzeug, um zukünftige Szenarien auch hinsichtlich ihrer möglichen Wirkungen gegenüberzustellen.

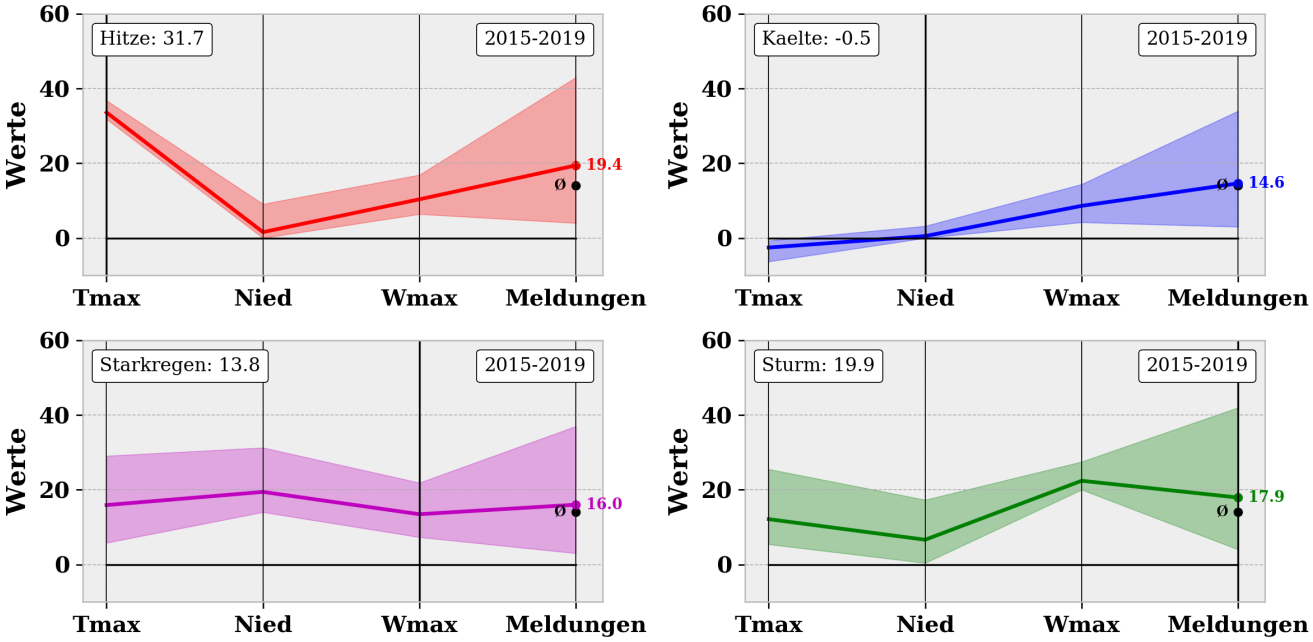


Abbildung 6:

Zusammenhang zwischen Temperatur (Tmax), Niederschlag (Nied), Windgeschwindigkeit (Wmax) und Störmeldungen über alle PDen: Filter hohe Temperaturen (rot) - überdurchschnittliche Meldungen, Filter kalte Temperaturen (blau), Filter hohe Niederschläge (lila) und Filter hohe Windgeschwindigkeiten (grün) - überdurchschnittliche Meldungen.

Hitze

An Tagen mit hohen Temperaturen von über 30°C verzeichnet die Schieneninfrastruktur der Deutschen Bahn im Schnitt 4,1 Störmeldungen je PD mehr als im Mittel von 15,1. In fast allen PDen liegen die Werte über dem Durchschnitt. Sie steigen noch etwas auf 5,1 Störmeldungen, wenn die Temperaturschwelle 32°C erreicht. Insgesamt sind keine besonderen regionalen Muster zu erkennen.

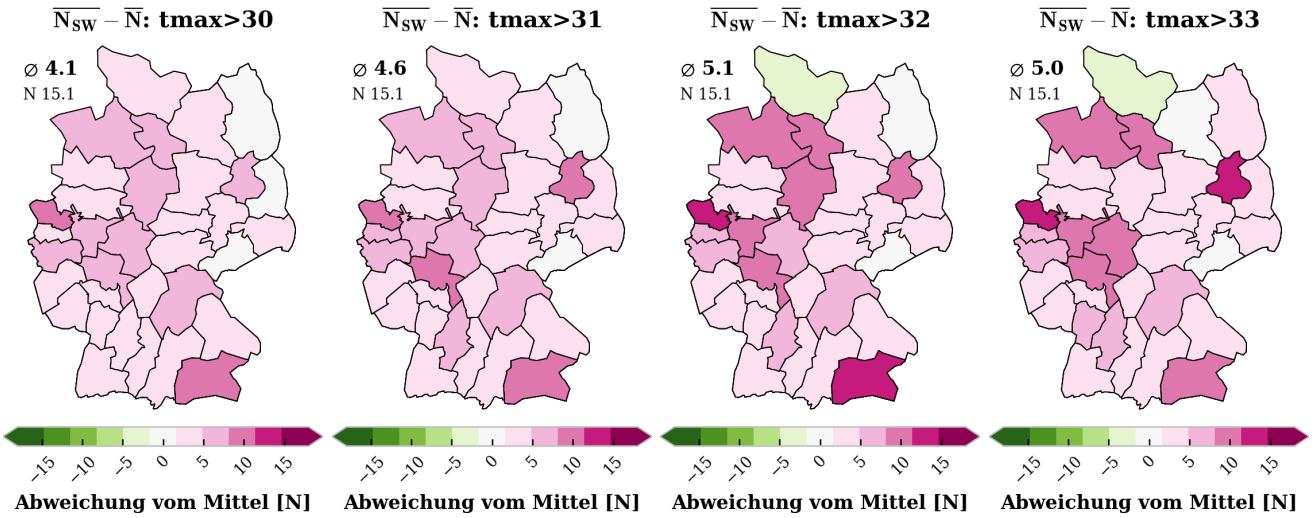


Abbildung 7:

Die Abweichungshäufigkeiten von Störmeldungen auf der Ebene der PDen für verschiedene Extremstufen der Maximumtemperatur (tmax) im Vergleich zum Mittel über alle PDen. N ist die mittlere Meldungszahl und N_{SW} ist die Zahl der Meldungen unter Berücksichtigung der Schwelle der Tageshöchsttemperatur von 30°C bis 33°C.

Kälte

An Tagen mit Dauerfrost, gibt es vor allem in den westlichen PDen etwas überdurchschnittlich viele Störmeldungen. Insgesamt sind es 1,9 Störmeldungen mehr als im Schnitt. Bleibt das Tagesmaximum der Temperatur unter -4°C verlagert sich das Störgeschehen eher in die südlichen PDen. Dann sind es deutschlandweit 4,9 Störmeldungen mehr als im Durchschnitt. Es ist jedoch anzumerken, dass die Muster teilweise aus Einzelereignissen resultieren und einige der westlichen PDen diese kritischen Temperaturbereiche innerhalb der Jahre 2015 bis 2019 nicht erreicht haben. Der Zusammenhang mit Schneefall wurde hierbei nicht berücksichtigt.

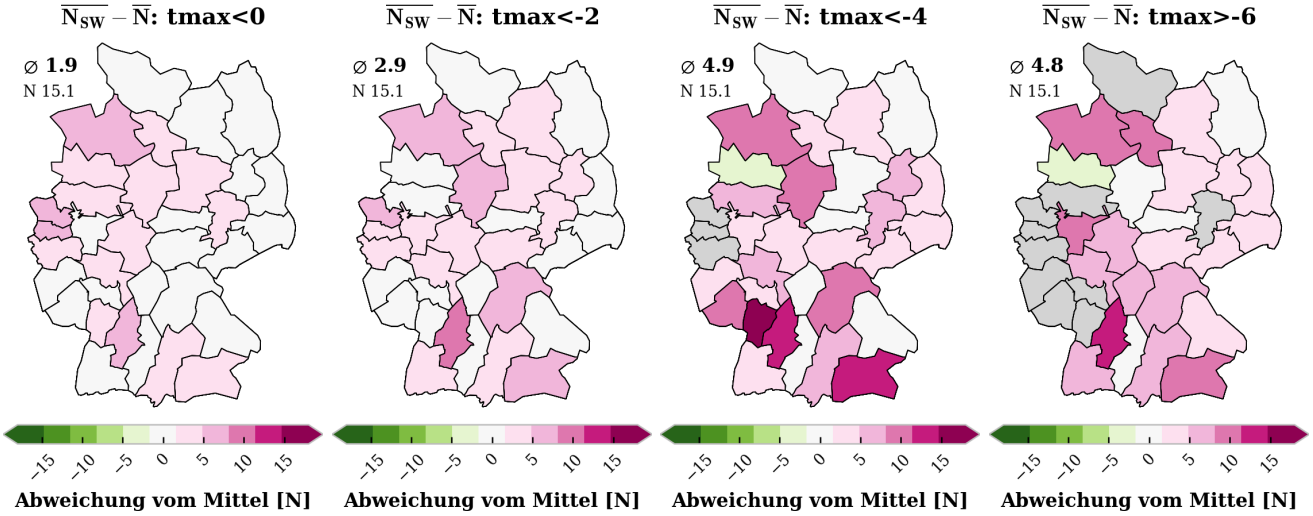


Abbildung 8:

Die Abweichungshäufigkeiten von Störmeldungen auf der Ebene der PDen für verschiedene Extremstufen der Maximumtemperatur (tmax) im Vergleich zum Mittel über alle PDen. N ist die mittlere Meldungszahl und N_{SW} ist die Zahl der Meldungen unter Berücksichtigung der Schwelle der Tageshöchsttemperatur von 0°C bis -6°C.

Starkregen

Das Muster der Störmeldung infolge kritischer Niederschlagsschwellen ist recht heterogen. Klar ist, dass Ballungszentren wie Berlin und Frankfurt gegenüber örtlichen Starkregenereignissen stärker verwundbar sind als das flache Land. Kleine Störungen können sich rasant bis auf das Gesamtsystem übertragen. Die Daten der Jahre 2015-2019 geben jedoch nur einen ersten Eindruck über die Ursache-Wirkung von Starkregenereignissen auf das Störgeschehen der Schieneninfrastruktur. An Tagen mit mehr als 20 mm gibt es im Schnitt 2,3 Störmeldungen mehr pro PD. Diese steigen bis auf 4,7 bei einer Schwelle von über 30 mm. Die resultierenden Muster sind dafür jedoch noch nicht repräsentativ, da die Datengrundlage sehr begrenzt ist.

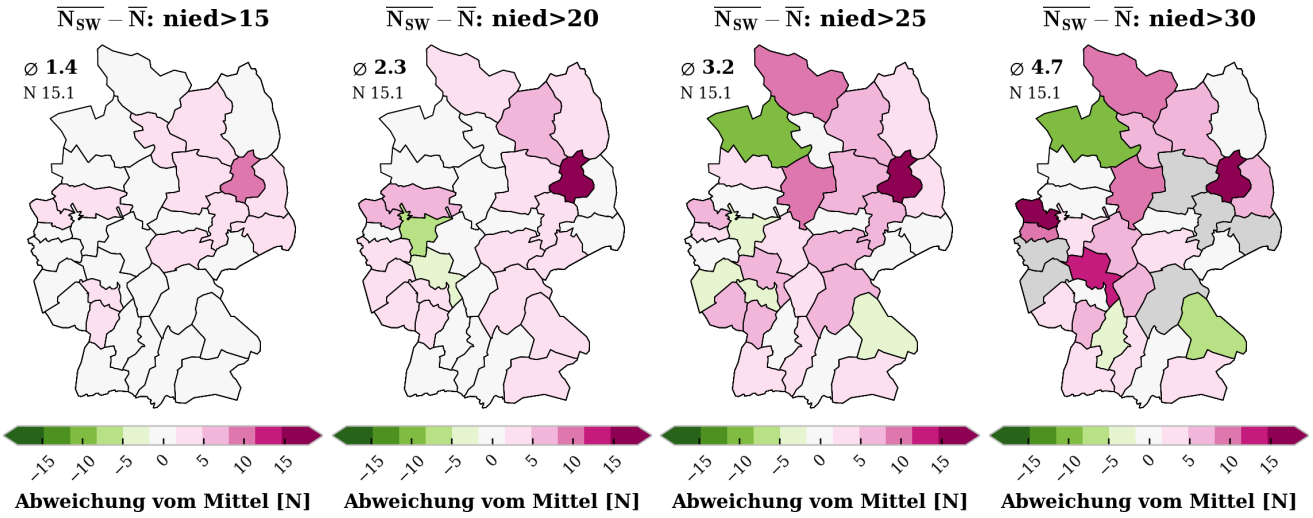


Abbildung 9:

Die Abweichungshäufigkeiten von Störmeldungen auf der Ebene der PDen für verschiedene Extremstufen des Niederschlags (nied) im Vergleich zum Mittel über alle PDen. N ist die mittlere Meldungszahl und N_{SW} ist die Zahl der Meldungen unter Berücksichtigung der Schwelle der Tagessumme des Niederschlags von 15mm bis 30mm.

Sturm

Das Störgeschehen nimmt exponentiell mit der Windgeschwindigkeit zu. Liegt das Störgeschehen an *Sturmtagen* (>17m/s) im Schnitt bei 1,5 Störmeldungen je PD höher, sind es an Tagen mit *schwerem Sturm* (>23m/s) 8,6 Störmeldungen mehr. Das sind deutschlandweit 50% mehr als an normalen Tagen. Vorallem die geographische Mitte Deutschlands verzeichnete in den Jahren 2015-2019 die meisten sturmbedingten Störmeldungen.

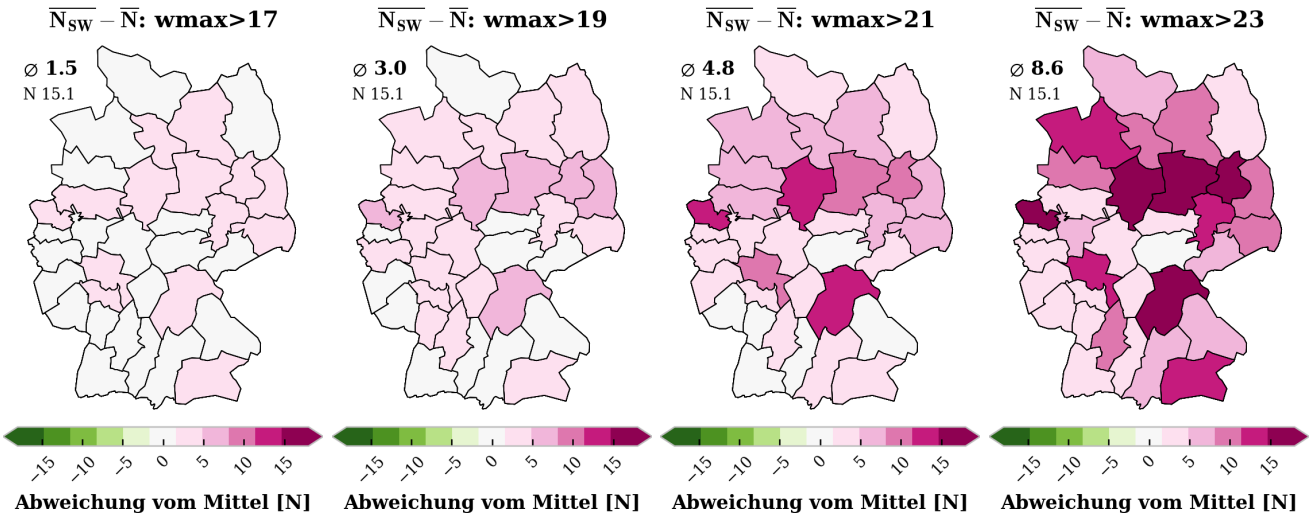


Abbildung 10:

Die Abweichungshäufigkeiten von Störmeldungen auf der Ebene der PDen für verschiedene Extremstufen der maximalen Windgeschwindigkeit (wmax) im Vergleich zum Mittel über alle PDen. N ist die mittlere Meldungszahl und N_{SW} ist die Zahl der Meldungen unter Berücksichtigung der Schwelle der maximalen Windgeschwindigkeit eines Tages von 17m/s bis 23m/s.

Ergebnisse – Bezug zu Großwetterlagen

Die Nutzung von Großwetterlagen ist für die Ursachenanalyse von Extremen und deren Entwicklung eine weitere zusätzliche Informationsquelle, da sie die wiederkehrenden großräumigen Strömungsmuster der Atmosphäre über Europa in systematischer Form berücksichtigt. Die tägliche Klassifizierung nach 30 verschiedenen Typen erfolgt operationell durch den Deutschen Wetterdienst (https://www.dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/grosswetterlage.html) und reicht bis in die 50er Jahre zurück. Abbildung 8 illustriert die verschiedenen Formen der Strömungssituationen im Mittel für 30 verschiedene Typen von Großwetterlagen über Europa. Allein die oberste Reihe zeigt die dominanten Strömungsmuster, die knapp die Hälfte der Wettervariabilität erklären. Durch den Klimawandel kommt es zu Verschiebungen von dominanten Strömungsmustern. In der Folge kann es die Kritikalität maßgeblich mitbestimmen.

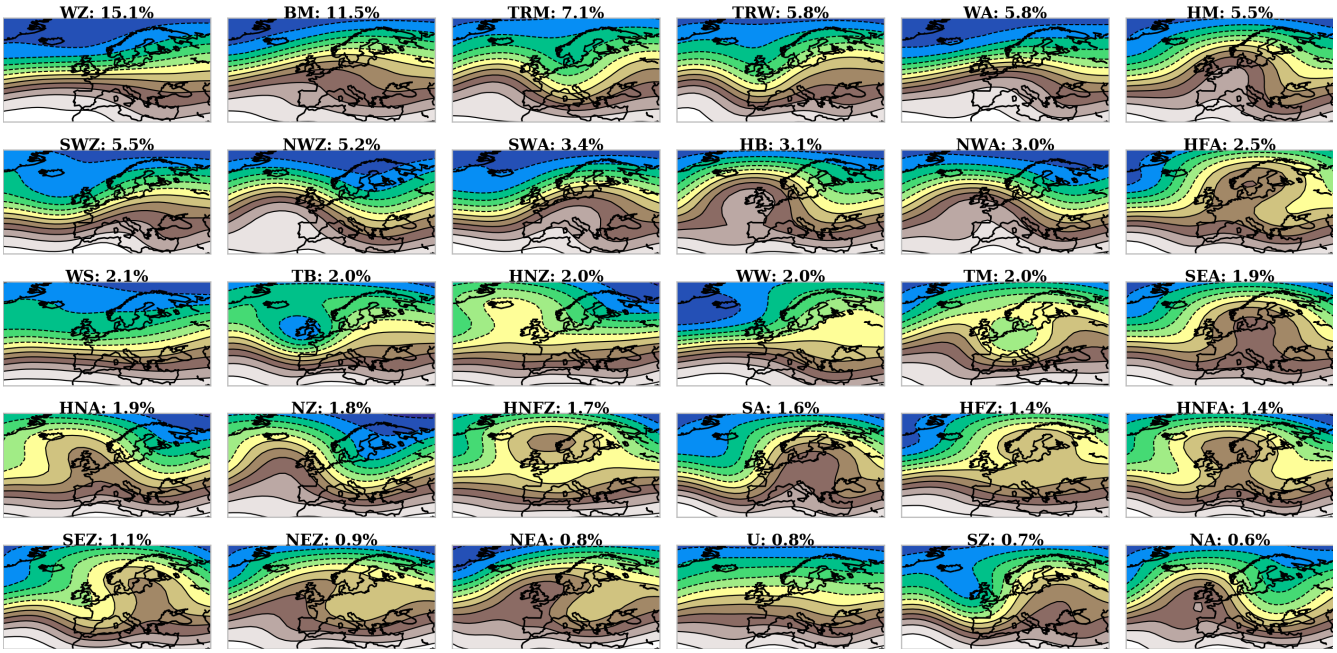


Abbildung 11:

Mittlere Formen der Strömungsmuster für die 30 verschiedenen Typen von Großwetterlagen über Europa. Die Häufigsten beginnen oben links: WZ (West Zyklonal), BM (Hochdruckrücken Mitteleuropa), TRM (Trog Mitteleuropa), usw..

Hitze - Kälte - Starkregen - Sturm - Störmeldungen

Durch die Kombination von lokalen Tageswerten der meteorologischen Messdaten je PD (Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit) sowie die Anzahl an Störmeldungen und den großräumigen Strömungsbedingungen können kritische Großwetterlagen identifiziert werden, die zu extremen Witterungsbedingungen neigen. Abbildung 12 zeigt Verteilungen von beitragenden Großwetterlagen je Wertebereich einer Größe am Beispiel der PD Berlin. An den rechten Rändern liegen die Extreme und die Verteilung klingt ab. Nur noch wenige kritische Strömungsmuster können überhaupt extreme Witterung auslösen. Dabei sind kleinere regionale Unterschiede möglich. In Tabelle 2 sind für verschiedene PDen die kritischen Großwetterlagen aufgeführt, die das Überschreiten von kritischen Schwellen lokal begünstigen. Die jeweilige Form des Strömungsmusters lässt sich dann aus Abbildung 12 zuordnen. Über allen PDen hinweg begünstigt die Großwetterlage *Hochdruckrücken ü. Mitteleuropa*(BM) Hitzeextreme, die Großwetterlage *Tief ü. Mitteleuropa* (TM) Starkregen und die Großwetterlage *West Zyklonal* (WZ) Starkwind. An Tagen mit diesen Typen von Großwetterlagen herrscht jahreszeitlich eine höhere Neigung zu extremer Witterung.

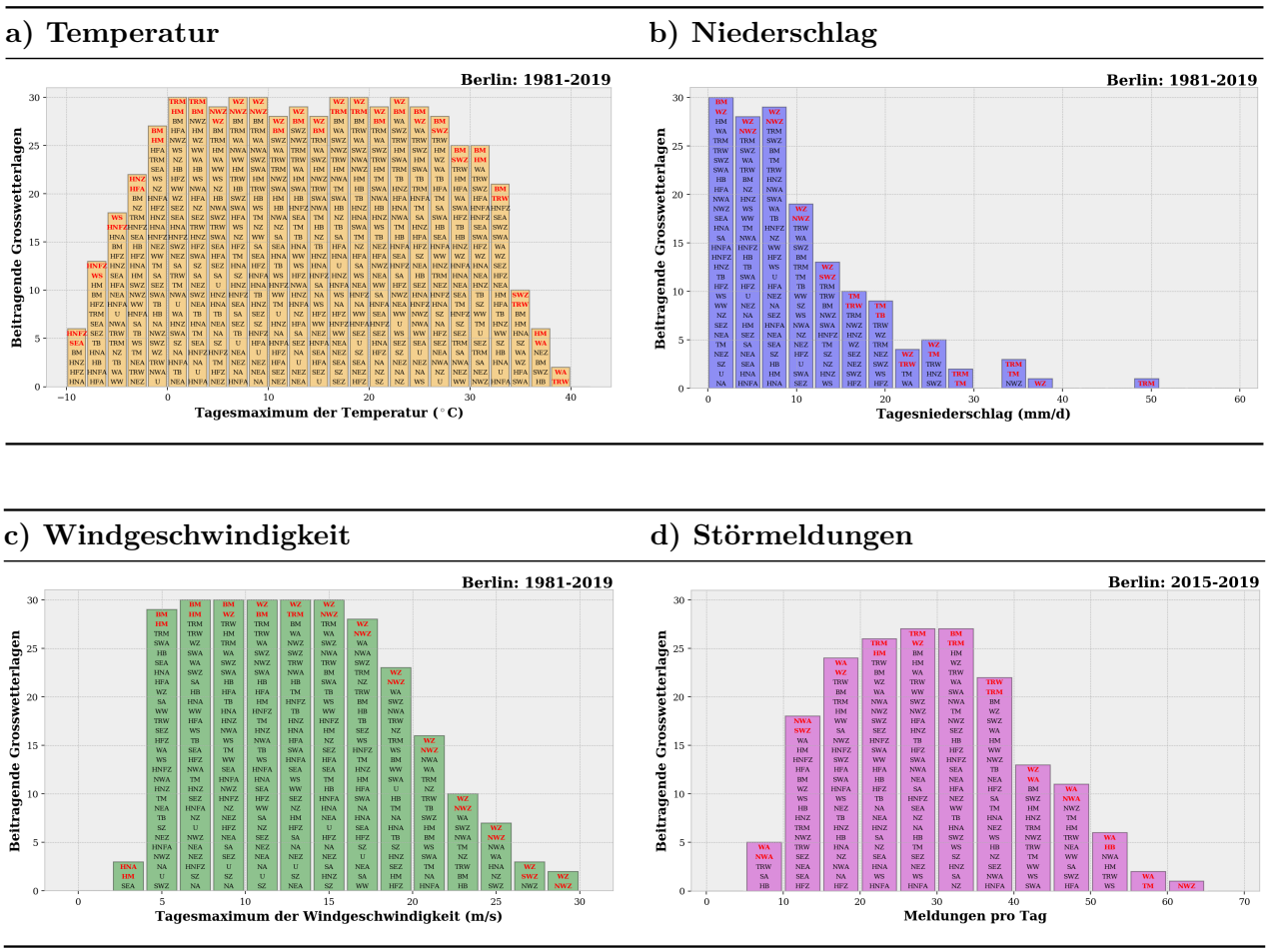


Abbildung 12:

Verteilung der beitragenden Großwetterlagen (gemäß Abbildung 11) für verschiedene Wertebereiche am Beispiel der PD Berlin: Temperatur (a), Niederschlag (b), Windgeschwindigkeit (c) und Störmeldungen (d).

Tabelle 2:

Großwetterlagen gemäß Abbildung 11, die sowohl zu Störungen als auch Extremwetter neigen: Bsp. PD Berlin.

Parameter	Temperatur	Niederschlag	Windgeschwindigkeit	Störmeldungen
Schwelle	>34°C	>20 mm	>23 m/s	>50
Berlin	WA, SWZ, HM, **BM**	TRM, **TM**, WZ, TRW	**WZ**, NWZ	NWZ, TM, WA
Kiel	**BH**, HM, TRW, SWZ	NWZ, WZ, **TM**	**WZ**, NWZ	HM, NWZ
Karlsruhe	HFA, HNA, **BM**, WA	WZ, TRM, WS, **TM**	SWZ, **WZ**, NWZ	WA, TRM
Regensburg	HNA, WA, SWZ, **BM**	TRM, WZ, **TM**	**WZ**, SWZ, NWZ	HM, TRM, WA

Wie Tabelle 2 zeigt, gibt es Großwetterlagen gemäß Abbildung 11, die in der Mehrheit der PDen für bestimmte Extreme verantwortlich sind. Abbildung 13 macht das für kritische Großwetterlagen nochmal deutlich. Das Maß dafür ist die Anzahl der betroffenen PDen, bei denen im Zusammenhang mit einer bestimmten Großwetterlage kritische Schwellen von Temperatur, Niederschlag oder Wind überschritten

wurden. Ein *Tief über Mitteleuropa* (TM) bspw. zeigt in ca. 28 der 34 PDen eine hohe Neigung zu Starkregen. Alle anderen Extreme sind in dem Zusammenhang weniger relevant. Ein *Trog über Westeuropa* (TRW) dagegen neigt sowohl zu Starkregen als auch Hitze und das für 75% der PDen.

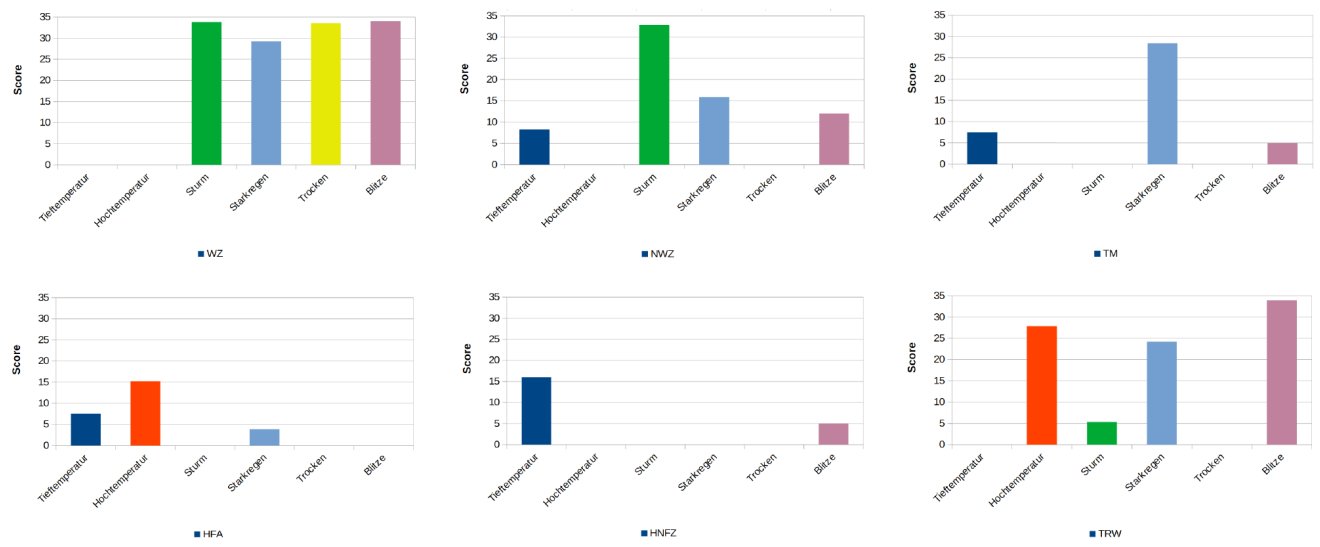
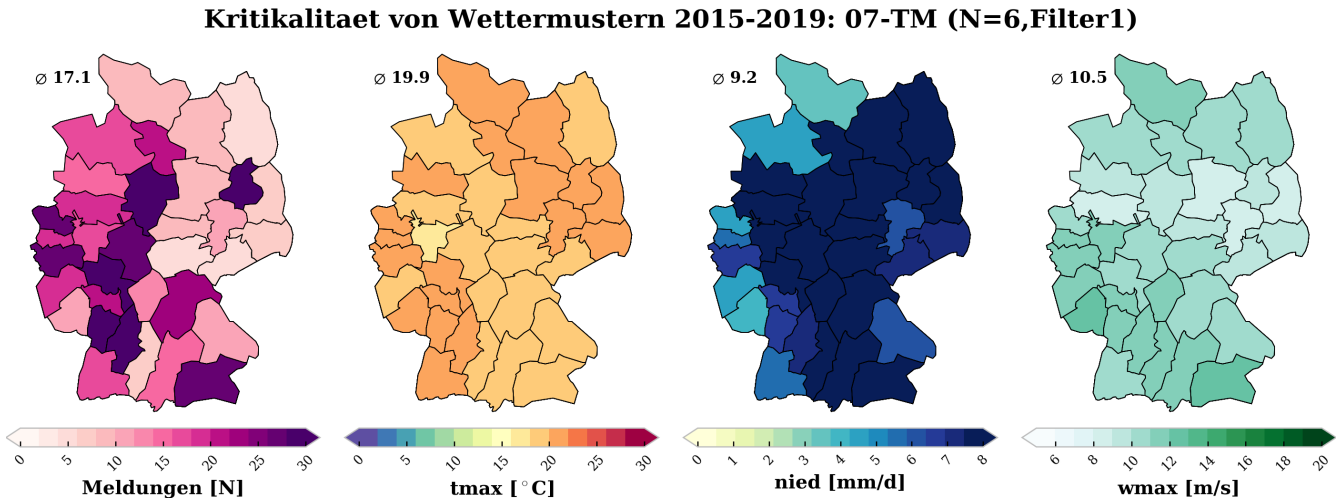


Abbildung 13:

Relevanz ausgewählter Großwetterlagen für das Auftreten von Extremen in sechs Kategorien. Beurteilungszeitraum: 1961-2019.

Auf den Datengrundlagen von 2015 bis 2019 wurden mittlere Kartenmuster je Monat und Großwetterlage dargestellt. Ein kleine Auswahl mit prägnanten Mustern ist in Abbildung 14 gezeigt. Sie stellen das räumliche Muster des Störgeschehens den meteorologischen Messgrößen für eine Großwetterlage und Monat gegenüber. So ist die Großwetterlage *Tief über Mitteleuropa* (TM) im Juli zumeist mit Starkregen verbunden und kann infolgedessen vermehrt Störungen verursachen. Eine *Nord-West Zyklonale* (NWZ) Großwetterlage im Oktober begünstigt überdurchschnittliche Windgeschwindigkeiten mit bis zu 17 m/s (Windstärke 8) im Mittel. Einige der erfassten Störmeldungen können eine Folge der hohen Windgeschwindigkeiten sein. Je mehr Daten den Mustern zugrunde liegen, desto repräsentativer sind die Muster und die Schlussfolgerungen, die sich daraus ableiten lassen.



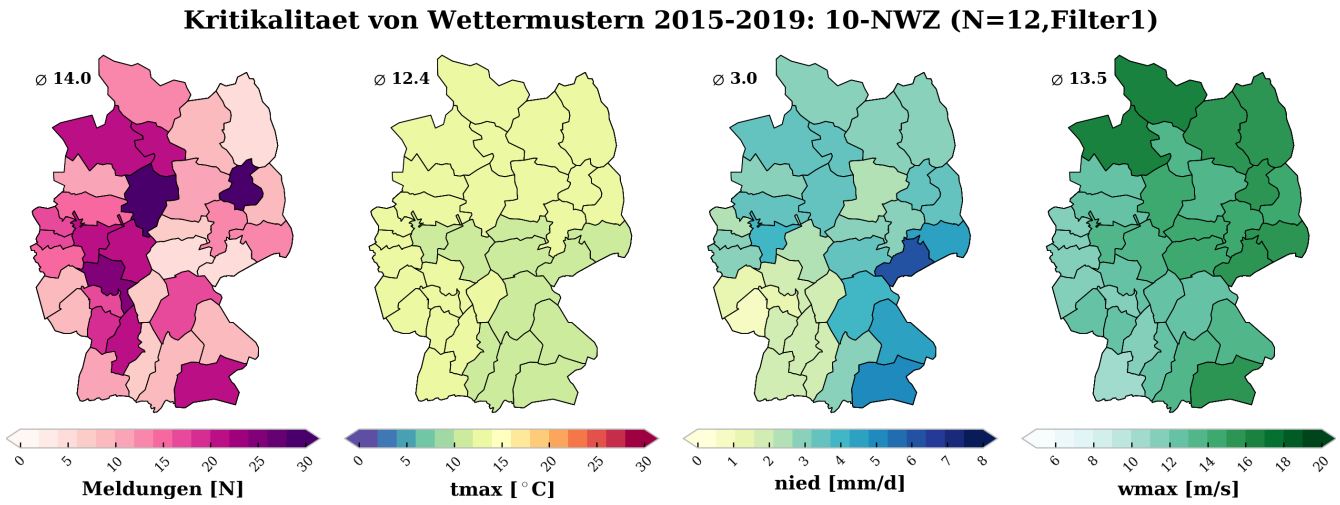


Abbildung 14:

Mittlere räumliche Muster von Störmeldungen, Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit je Monat und Großwetterlage: Juli (TM) und Oktober (NWZ).

Großräumige Strömungsmuster über Europa lassen sich auch aus Klimamodellen ableiten. Mittels eines strukturellen Bildvergleichsverfahrens wurden beobachtete und simulierte Atmosphärenfelder miteinander verglichen, um jedem Tag im Klimamodell dem ähnlichsten Tag in den Beobachtungen zuzuordnen. Diesem Tag wird die gleiche Großwetterlage zugeordnet.

Die Abbildung 15 gibt wieder, wie sich die Häufigkeiten der identifizierten Großwetterlagen in einem kleineren Klimaensemble verändern. Dabei zeigen die dominanten Großwetterlagen (WZ & BM) die stärksten Änderungssignale über das Gesamtjahr. Jahreszeitlich betrachtet kann es Verschiebungen geben. Es ist festzuhalten, dass kritische Großwetterlagen, die in der Vergangenheit mit Extremwetter und Störungen verbunden waren, eher dominanter werden und das Witterungsgeschehen in Deutschland stärker bestimmen werden.

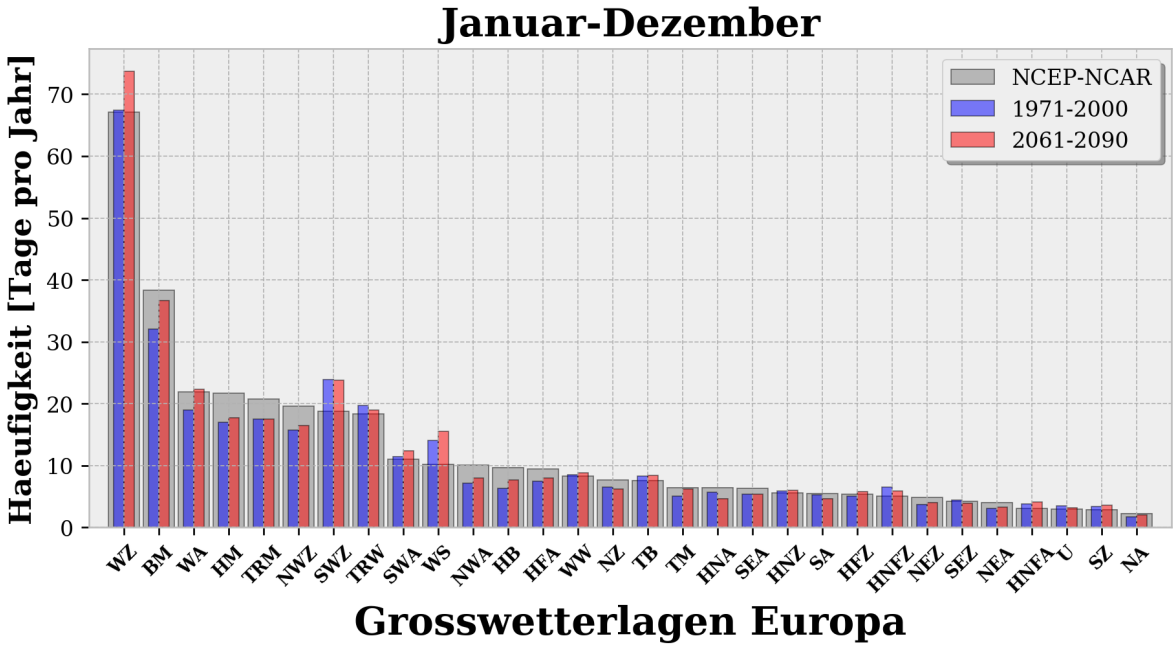


Abbildung 15:

Häufigkeit der Großwetterlagen für verschiedenen Zeiträume: Blau: ermittelt aus manuellen Analysen für den Zeitraum 1971–2000; grau: mit Bilderkennung ermittelt aus einer Klimatologie der gesamten Atmosphäre (Reanalysedaten) für den Zeitraum 1971–2000; rot: mit Bilderkennung ermittelt aus Klimaprojektionen von 5 Globalmodellen für den Zeitraum 2061–2090.

Inwieweit gegenwärtig verbreitet genutzte Klimamodelle die Veränderung von dynamischen Faktoren eher unterschätzen ist aktueller Forschungsgegenstand. Denn damit verbunden steht die Frage, wie sich Regenmuster zukünftig verschieben werden. Bislang bleiben extreme Trockenjahre wie 2018 auch in Zukunftsprojektionen die Ausnahme.

Fazit

Die Ergebnisse der Studie illustrieren, wie sich das regionale Klima in Deutschland in den letzten Jahrzehnten bereits verändert hat und sich zukünftig weiter verändern wird. Dabei wurden die klimatischen Entwicklungen und mögliche Zusammenhänge zum witterungsbedingten Störgeschehen an 34 PDen untersucht und kritische Wettermuster identifiziert.

Die Art der Großwetterlage über Europa und die damit verbundenen Strömungsbedingungen bestimmen maßgeblich, ob eine Neigung zu extremen Wetterbedingungen vor Ort möglich ist. Aus langen verfügbaren Datenreihen wurde ein Zusammenhang abgeleitet, welcher Typ von Großwetterlage in welchem Monat Hitze, Starkregen oder Sturm überdurchschnittlich stark begünstigt.

Vor dem Hintergrund, dass der Klimawandel auch die Veränderung der Häufigkeit, Andauer und Abfolge von Großwetterlagen hervorruft, ist diese Herangehensweise ein erforderlicher Weg, um die Ursache und Wirkung von Extremwetter mit Folgen auf das Störgeschehen in einen kausalen Zusammenhang zu stellen und fortlaufend neu zu bewerten.

Treten kritische Wettermuster zukünftig häufiger auf oder halten länger an, die schon in der Vergangenheit Störungen an der Schieneninfrastruktur ausgelöst haben, dann wird es ohne Anpassungsmaßnahmen zu mehr Störmeldungen kommen. Erste Tendenzen von kritischen Strömungsmustern konnten exemplarisch aufgezeigt werden.

Beispiel: Hitze

Im Zeitraum von 2015-2019 gab es im Schnitt 15,1 Störmeldungen pro Tag und PD. An Tagen mit über 30°C lag der Wert um 4,1 Störmeldungen über dem Durchschnitt pro PD. Bis zu 5,0 steigt der Wert bei Temperaturen über 33°C. *Was sind das für Tage?* Das können Tage sein, bei denen das Muster der Großwetterlage über Europa eine *Südwest-Strömung* (SWZ), ein *Hoch über Mitteleuropa* (HM, BM) oder eine *Omega-Lage* (HFA, HNA) aufweist. Sie besitzen im Sommerhalbjahr eine höhere Neigung zu hohen Temperaturen. Es ist zu erwarten, dass diese Typen von Strömungsmuster zukünftig länger zeitlich andauern und ihren Witterungscharakter hinsichtlich der Temperatur weiter verstärken.

Beispiel: Sturm

Im Zeitraum von 2015-2019 gab es im Schnitt 15,1 Störmeldungen pro Tag und PD. An Tagen mit über 17m/s maximaler Windgeschwindigkeit lag der Wert um 1,5 Störmeldungen über dem Durchschnitt pro PD. Bis zu 8,6 steigt der Wert bei Windspitzen von über 23m/s. *Was sind das für Tage?* Das sind in der Regel Tage mit einem *westlichen* (WZ) bis *nordwestlichen* (NWZ) Strömungsmuster über Europa. In wenigen Fällen kann sich aus einer solchen Lage auch ein schwerer Sturm entwickeln. Es ist zu erwarten, dass diese Typen von Strömungsmuster zukünftig im Winterhalbjahr wetterbestimmender werden.

In Form von *Steckbriefen* und *sortierbaren Tabellen* (Abb.16) wurden die Ergebnisse gebündelt. Sie dienen der groben Orientierung und Einordnung der Entwicklung von Klimarisiken und soll Abwägungsentscheidungen unterstützen. Nicht das einzelne Störgeschehen an einem bestimmten Streckenabschnitt, sondern die Summe der Wirkungen und regionalen Unterschiede, die mit der großräumigen Kritikalität von Wettermustern verknüpft ist, stand im Vordergrund der Studie.

a) Lage

b) klimatische Entwicklung

Indikator	Einheit	1961-1990	1991-2020	2031-2060	Richtung ±5%
Jahresmitteltemperatur	°C	9.0	10.0	11.1	↑ ↑
Hitzetage	Tage	7.3	12.8	16.0	↑ ↑
Eistage	Tage	24.6	17.5	7.1	↓ ↓
Starkregentage	Tage	1.0	1.7	1.6	↑ ↓
Trockentage	Tage	277.5	277.6	276.1	→ →
Niederschlagsmenge an Eistagen	mm	18.3	9.8	0.6	↓ ↓
Sturmtage	Tage	37.9	20.0	34.6	↓ ↑

c) Tabelle

Sortierbare Tabelle:

Parameter		Jahresmitteltemperatur			Hitzetage			Hitzeintensität			Eistage			Kälteintensität		
Einheit		[GradC]			[Tage]			[GradC]			[Tage]			[GradC]		
PD	GP	Mittelwert 1961-1990	Mittelwert 1991-2020	Mittelwert 2031-2060	Mittelwert 1961-1990	Mittelwert 1991-2020	Mittelwert 2031-2060	Mittelwert 1961-1990	Mittelwert 1991-2020	Mittelwert 2031-2060	Mittelwert 1961-1990	Mittelwert 1991-2020	Mittelwert 2031-2060	Mittelwert 1961-1990	Mittelwert 1991-2020	Mittelwert 2031-2060
Karlsruhe	62	9.6	10.8	11.7	7.0	13.6	19.2	30.6	32.5	33.3	17.7	11.3	6.0	-3.2	-1.6	-0.2
Leipzig	87	9.0	10.0	11.1	7.4	13.0	16.1	30.7	32.2	33.1	23.9	17.3	7.3	-4.7	-3.4	-1.5
Berlin	75	9.0	10.0	11.1	7.3	13.0	16.0	30.7	32.1	32.9	24.6	17.8	7.1	-4.8	-3.5	-1.7
Cottbus	101	8.7	9.9	10.9	7.1	12.7	15.6	30.8	32.1	32.9	25.6	18.9	8.1	-5.1	-3.8	-1.9
Mainz	48	9.4	10.5	11.4	6.0	12.1	16.6	30.3	32.3	32.9	17.8	12.2	5.1	-3.3	-1.8	-0.3
Würzburg	81	8.4	9.4	10.5	5.5	11.7	14.6	30.0	31.9	32.5	25.5	17.0	8.8	-4.6	-2.9	-1.4
Magdeburg	158	8.6	9.7	10.7	5.4	10.9	12.8	30.0	31.7	32.4	24.1	17.3	7.5	-4.6	-3.2	-1.5
Dresden	103	8.6	9.5	10.6	5.4	9.9	13.6	30.1	31.5	32.4	27.0	20.6	8.4	-5.2	-3.9	-2.0
Stuttgart	94	8.5	9.7	10.7	3.5	9.7	13.6	29.5	31.7	32.2	22.7	16.2	8.8	-4.1	-2.6	-1.1
Frankfurt	91	8.6	9.6	10.6	3.9	9.3	12.6	29.4	31.6	32.0	20.5	13.8	5.5	-3.7	-2.3	-0.7
Düsseldorf	34	10.0	10.8	11.9	4.9	9.2	13.2	29.9	31.6	32.4	10.4	6.1	0.6	-1.8	-0.1	1.0
Nürnberg	170	7.6	8.7	9.7	3.1	8.8	11.3	29.2	31.3	31.8	32.6	23.3	12.9	-5.3	-3.7	-2.0
Duisburg	44	9.9	10.8	11.9	4.1	8.2	11.8	29.3	31.3	31.8	11.0	6.4	1.5	-1.8	-0.3	0.9
Regensburg	166	7.2	8.5	9.4	2.7	8.2	12.1	29.1	30.8	31.6	38.6	28.2	17.6	-6.0	-4.3	-2.7

Abbildung 16:

Auszug aus dem Steckbrief für die PD Berlin: klimatische Entwicklung (a,b). Auszug aus der sortierbaren Tabelle, in der alle Informationen für die PDen, Klimaindikatoren und Zeiträume zusammengestellt sind (c).

In den kommenden Jahren wird sich die Datenbasis der Störmeldungen verbessern, die Methoden der Klimadiagnostik weiterentwickeln und eine neue Generation von Klimaszenarien wird die alten Szenarien ablösen. Ein dynamischer Prozess, der immer wieder Neubewertungen erfordert und den Prozess des Wandels begleitet.