



Dauerniederschläge und Weihnachtshochwasser im Winter 2023/24

*Jens Grieger^{1,♦}, Torben Kunz¹, Sebastian Buschow^{2,♦}, James Daniell³, Etor E. Lucio Eceiza⁴, Felix S. Fauer¹, Hendrik Feldmann^{5,♦}, Petra Friederichs^{2,♦}, Xiaoxiang Guan⁶, Frank Kaspar^{7,♦}, Johanna Knauf⁷, Frank Kreienkamp⁷, Michael Kunz^{3,5}, Philip Lorenz⁷, Bruno Merz⁶, Ralf Merz⁸, Susanna Mohr^{3,5}, Deborah Niermann^{7,♦}, Joaquim G. Pinto^{5,♦}, Oldrich Rakovec⁹, Luis Samaniego⁹, René Sauerbrei⁷, Andreas Schäfer³, Jonas Schröter⁷, Svenja Szemkus², Miriam Tivig⁷, Uwe Ulbrich^{1,♦}, and Sergiy Vorogushyn⁶

¹Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin

²Institut für Geowissenschaften, Universität Bonn

³Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

⁴Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

⁵Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

⁶Sektion Hydrologie, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

⁷Deutscher Wetterdienst (DWD)

⁸Department Catchment Hydrology, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ

⁹Department Hydrosystemmodellierung, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ

♦Mitglied des ClimXtreme-Lenkungsausschusses

14. Mai 2024

Zitervorschlag:

Grieger, J., Kunz, T., Buschow, S., Daniell, J., Lucio Eceiza, E. E., Fauer, F. S., Feldmann, H., Friederichs, P., Guan, X., Kaspar, F., Knauf, J., Kreienkamp, F., Kunz, M., Lorenz, P., Merz, B., Merz, R., Mohr, S., Niermann, D., Pinto, J. G., Rakovec, O., Samaniego, L., Sauerbrei, R., Schäfer, A., Schröter, J., Szemkus, S., Tivig, M., Ulbrich, U., Vorogushyn, S. (2024). Dauerniederschläge und Weihnachtshochwasser im Winter 2023/24. *Bericht des Forschungsnetzwerkes ClimXtreme*. <http://dx.doi.org/10.17169/refubium-43523>

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.



*Contact: jens.grieger@fu-berlin.de

Zusammenfassung

- Ab Weihnachten 2023 kam es zu einer Hochwassersituation vor allem im Bereich der Flüsse Ems, Weser und Elbe, welche bis in den Januar 2024 hinein zu einer angespannten Lage vor allem in weiten Teilen Nordwestdeutschlands führte.
- Dieses Winterhochwasser wurde ausgelöst durch großräumige Dauerniederschläge vor allem in Norddeutschland über Weihnachten 2023 (19.-25.12.2023) und verstärkt durch nachfolgende, wenn auch schwächere Niederschlagsereignisse bis Anfang Januar 2024, welche darüber hinaus auf bereits gesättigte Böden trafen.
- Die Ungewöhnlichkeit des Weihnachtsniederschlagsereignisses bestand in seiner großen räumlichen Ausdehnung und langen zeitlichen Andauer von sieben Tagen. Es hing zusammen mit einer Wetterlage (charakterisiert durch ein ausgedehntes Tiefdrucksystem mit Zentrum über Südkandinavien), welche an sich nicht außergewöhnlich war, jedoch extrem lange andauerte.
- Das spezifische räumliche Muster dieses einwöchigen Niederschlagsereignisses war auch in der Vergangenheit sowohl mit ergiebigen Dauerniederschlägen als auch mit der zuvor erwähnten Wetterlage assoziiert.
- Die nachfolgenden Niederschlagsereignisse Ende Dezember und Anfang Januar waren für sich betrachtet wesentlich schwächer. Deren zeitliches Zusammenspiel mit dem vorherigen Weihnachtsergebnis führte jedoch dazu, dass gebietsweise über lange Zeiträume von bis zu zweieinhalb Wochen extreme mittlere Niederschlagsintensitäten auftraten.
- Das Hochwasser als Auswirkung der Niederschläge war ebenfalls im Wesentlichen durch seine große räumliche Ausdehnung charakterisiert, nur vereinzelt wurden extreme Flusspegelstände gemessen. Unter allen Hochwassern in Deutschland seit 1955 (für welche die Abflüsse über zwei Wochen eine Wiederkehrzeit von mindestens 10 Jahren aufwiesen) rangiert die räumliche Ausdehnung des Weihnachtshochwassers 2023 mit gut 100.000 km² auf Platz 9. Die räumliche Ausdehnung ist hierbei nicht die Überflutungsfläche, sondern die Fläche, in der die Hochwasserabflüsse einen bestimmten Schwellenwert überschreiten.
- Die Überflutungsfläche selbst erreichte eine Ausdehnung von ca. 1000 km² und betraf mehr als 40 Landkreise, vor allem in Niedersachsen und Bremen, aber auch in Teilen Hessens und Nordrhein-Westfalens. Betroffen waren dabei, je nach Abschätzung, 18.000 bis 30.000 Personen, rund 2000 Gebäude, 4,6 km² bebaute Fläche und 470 km Straßen.
- Die im Dezember 2023 gemessene Monatsniederschlagssumme von 164 mm (über einem besonders von den Niederschlägen betroffenen Gebiet in Niedersachsen: 51,5°N – 53,5°N, 8,0°O – 11,0°O) tritt in den Wintermonaten im heutigen Klima durchschnittlich nur ca. alle 120 Jahre auf. Eine Attributionsstudie des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zeigt, dass sich die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis dieser Intensität aufgrund der bisherigen Klimaerwärmung von 1,2 °C (seit etwa 1900) um den Faktor 1,8 (Ergebnisspanne: 0,1 bis 140) erhöht hat, und dass sich diese Wahrscheinlichkeit im Falle eines 2 °C wärmeren Klimas, d.h. einer zusätzlichen Erwärmung um weitere 0,8 °C, nochmals erhöhen wird. Die Studie zeigt jedoch auch, dass diese Abschätzungen mit großen Unsicherheiten verbunden sind. Dennoch sind diese Abschätzungen konsistent mit den Ergebnissen verschiedener Studien, welche sowohl eine Zunahme des mittleren Winterniederschlags zeigen als auch eine Intensivierung extremer Niederschlagsereignisse im nördlichen Mitteleuropa.

1 Statistische Charakterisierung der Dauerniederschläge

Im Folgenden werden die Dauerniederschläge im Winter 2023/24 mithilfe statistischer Methoden charakterisiert, welche im Projekt ClimXtreme (weiter-) entwickelt wurden sowie für aktuelle Forschungsfragen verwendet werden. Eine Darstellung der synoptischen Entwicklung der Wetterlage, einschließlich Wetterkarten und einer hydro-klimatologischen Einordnung des Ereignisses, sind in den vom DWD verfassten Berichten zu finden (siehe [Kaspar et al., 2024](#); [Tivig et al., 2024](#)).

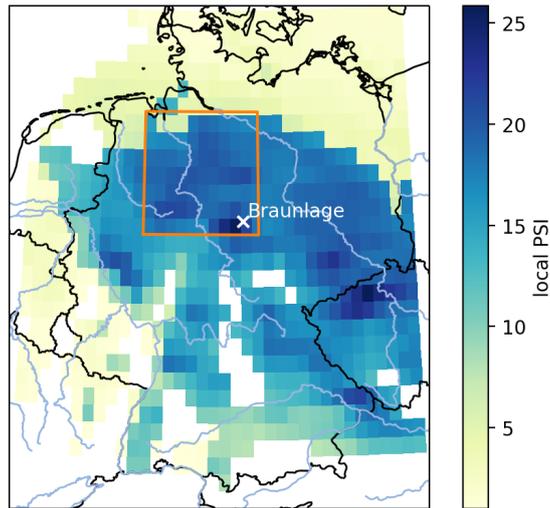


Abbildung 1: Lokaler Niederschlagsstärkeindex (PSI) für die 7-Tages-Periode vom 18.12. bis zum 24.12.2023 über Deutschland. Das weiße Kreuz markiert die geographische Lage der Wetterstation Braunlage (siehe Abschnitt 1.3) und das orange Rechteck das Untersuchungsgebiet einer Attributionsstudie des DWD (siehe Abschnitt 3.2).

1.1 Räumlich-zeitliche Ausdehnung der Niederschläge

Die räumlich-zeitliche Ausdehnung eines Niederschlagsereignisses kann mithilfe statistischer Indizes bestimmt werden. Im Folgenden verwenden wir hierzu den Niederschlagsstärkeindex (kurz: PSI, für "Precipitation Severity Index", siehe Caldas-Alvarez et al., 2023). Dieser kann für jeden Ort separat berechnet werden und hängt davon ab, über wie viele Tage ohne Unterbrechung und in welchem Ausmaß die tägliche Niederschlagssumme das lokale 80%-Quantil überschritten hat. Im Folgenden wird der PSI auf tägliche Niederschlagssummen im Winter (Dezember bis Februar) aus dem Reanalysedatensatz ERA5 (Hersbach et al., 2020) angewendet. Abbildung 1 zeigt die räumliche Verteilung des PSI über Deutschland für die 7-Tages-Periode bis zum 24. Dezember 2023. Besonders starke und/oder anhaltende Niederschläge (d.h. große PSI-Werte) traten demnach vor allem über weiten Teilen Niedersachsens auf, aber auch in den südlichen Teilen Ostdeutschlands bis hin nach Tschechien sowie gebietsweise in Teilen West- und Süddeutschlands.

Wird der PSI räumlich integriert und das Enddatum der 7-Tages-Periode zeitlich verschoben, erhält man eine Zeitreihe des PSI, welcher nun die zeitliche und räumliche Ausdehnung der quantilüberschreitenden Niederschläge beschreibt. Abbildung 2 stellt die tägliche Zeitreihe des PSI für den Winter 2023/24 dar (links) und zusätzlich die Zeitreihe der Wintermaxima des PSI für die Periode 1940-2024 (rechts), räumlich integriert über das in Abbildung 1 dargestellte geographische Gebiet. Der größte PSI-Wert im Winter 2023/24 wurde für die 7-Tages-Periode bis zum 24. Dezember erreicht, ein sekundäres Maximum trat Anfang Januar 2024 auf (Abb. 2, links). Die PSI-Werte beider Niederschlagsereignisse überschritten das 99.5-Perzentil und gehören somit zu den größten 0.5% aller täglichen PSI-Winterwerte seit 1940 (für das hier gewählte geographische Gebiet und eine jeweils 7-tägige Berechnungsperiode). Die interannuale Zeitreihe (Abb. 2, rechts) zeigt, dass das PSI-Maximum des Winters 2023/24 seit 1940 nur dreimal übertroffen wurde: (i) Ende 1947 traten verbreitet kräftige Niederschläge und Überflutungen entlang des Mains und Neckars auf (DWD, 1947b,a), (ii) das PSI-Wintermaximum Ende 1978 repräsentiert die Niederschläge während der Schneekatastrophe 1978/79 (DWD, 1978), (iii) der größte aller Winter-PSI-Werte Anfang 1987 zeigt die Niederschlägen an, welche zusammen mit der Schmelze des zuvor gefallenen Schnees zu einer großräumigen Hochwasserlage vor allem in Norddeutschland führten (DWD, 1986, 1987). Eine weitergehende PSI-Analyse, die hier nicht explizit gezeigt wird, bestätigt, dass die großen PSI-Werte im Dezember 2023 primär durch die große räumlich-zeitliche Ausdehnung des Ereignisses zustande kamen und nur an wenigen Orten mit lokalen Niederschlagsextrema verbunden waren.

Da Winterdauerniederschläge mit großräumigen Wettersystemen zusammenhängen, stellt sich

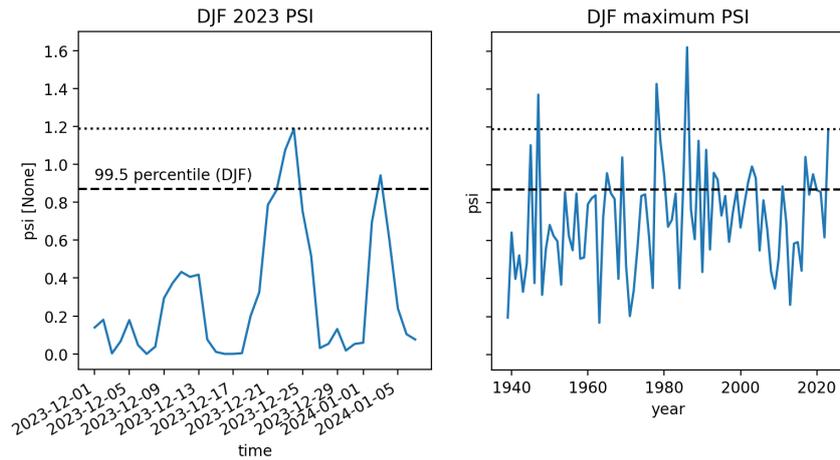


Abbildung 2: Links: Tägliche Zeitreihe des räumlich integrierten PSI für den Winter 2023/24 (der Zeitpunkt entspricht jeweils dem Ende der 7-Tages-Periode). Rechts: Zeitreihe der PSI-Wintermaxima (Dezember bis Februar) für die Periode 1940-2024.

die Frage, ob die lange Andauer des Niederschlagsereignisses zu Weihnachten 2023 durch eine besondere Wetterlage verursacht wurde. Um dies zu untersuchen, wurde ein statistisches Verfahren zur Wetterlagenklassifikation angewendet (eine sogenannte k-means-Cluster-Analyse, [Riebold et al., 2023](#), angewendet auf Felder des reduzierten Bodenluftdrucks über Europa und dem nordöstlichen Nordatlantik). Tatsächlich zeigt sich hierbei, dass die großräumige Wetterlage während des 7-tägigen Weihnachtsniederschlagsereignisses ungewöhnlicherweise ebenso lange durch ein ausgeprägtes Tiefdrucksystem mit Zentrum über Südkandinavien gekennzeichnet war. Diese Konfiguration des Luftdrucks tritt zwar grundsätzlich relativ häufig auf, doch nur in 3% der Fälle hat sie eine Andauer von 7 Tagen oder mehr. Eine statistische Analyse zeigt ferner, dass große PSI-Werte auch in der Vergangenheit bevorzugt unter dieser Wetterlage auftraten. Da diese Wetterlage ähnlich häufig auftritt wie alle anderen von der Cluster-Analyse identifizierten Wetterlagen, sind die ungewöhnlichen Dauerniederschläge im Dezember 2023 nicht auf eine ungewöhnliche Wetterlage zurückzuführen, sondern auf die ungewöhnlich lange Andauer einer gewöhnlichen Wetterlage.

1.2 Räumliche Muster der Niederschlagsextreme

Neben der räumlichen Ausdehnung können auch die spezifischen räumlichen Muster der Dauerniederschläge im Winter 2023/24 untersucht werden. Hierzu verwenden wir eine statistische Methode, welche die räumlichen Abhängigkeiten extremer Niederschläge charakterisiert, die sogenannte Eigenzerlegung der TPD-Matrix (kurz: TPDM, für "Tail Pairwise Dependence Matrix"). Die TPDM wird aus einer langen Zeitreihe räumlicher Niederschlagsfelder geschätzt, wobei jedes Matrix-Element ein bestimmtes Paar von Orten repräsentiert und Auskunft liefert über die Gleichzeitigkeit, mit der an diesen zwei Orten extreme Niederschlagsmengen beobachtet werden. Eine detaillierte Beschreibung der TPDM-Eigenzerlegung ist in [Cooley and Thibaud \(2019\)](#) und [Szemkus and Friederichs \(2024\)](#) zu finden. Als Ergebnis liefert die TPDM-Eigenzerlegung einerseits räumliche Muster (mathematisch gesprochen die Eigenvektoren der Matrix), welche anzeigen, in welchen geographischen Regionen typischerweise kohärente extreme Niederschläge auftreten. Jedem dieser Muster ist ein sogenannter Eigenwert zugeordnet, welcher ein Maß der Gesamtkohärenz innerhalb dieses Musters darstellt. Andererseits liefert die TPDM-Eigenzerlegung zu jedem Muster eine entsprechende Zeitreihe, die sogenannte Hauptkomponenten-Zeitreihe (kurz: PC-Zeitreihe, für "Principal Component"), welche zu jedem Zeitpunkt anzeigt, mit welcher Amplitude dieses Muster im aktuellen Niederschlagsfeld enthalten ist.

Für die Analyse der Dauerniederschläge im Winter 2023/24 verwenden wir Felder des Winterniederschlags (Dezember bis Februar) über Deutschland für die Periode 1940-2024, basierend auf ERA5-Reanalysedaten ([Hersbach et al., 2020](#)). Da der Fokus auf das Weihnachtsergebnis mit einer Dauer von sieben Tagen gerichtet ist, wird zunächst ein 7-tägiges gleitendes Mittel auf die

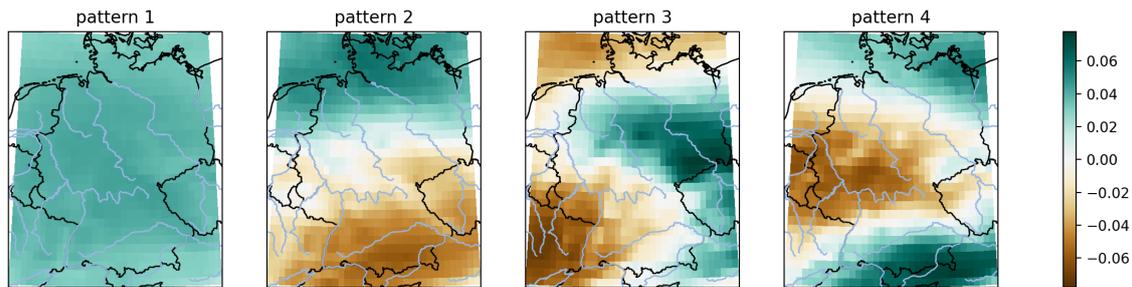


Abbildung 3: Die ersten vier räumlichen Muster (d.h. Eigenvektoren) der TPDM-Eigenzerlegung für 7-tägige Niederschlagssummen der Wintermonate (Dezember bis Februar) über Deutschland. Die Muster sind geordnet nach Eigenwerten in absteigender Reihenfolge. Die Muster zeigen an, dass extreme Niederschlagsmengen entweder innerhalb der grünen oder innerhalb der braunen Regionen kohärent auftreten.

Niederschlagsfelder angewendet. Anschließend wird die TPDM geschätzt (mit dem 98%-Quantil als Schwellwert für extremen Niederschlag) und ihre Eigenzerlegung durchgeführt. Die ersten vier Muster (d.h. Eigenvektoren, sortiert nach ihren Eigenwerten in absteigender Reihenfolge) sind in Abbildung 3 dargestellt. Da Muster-1 nahezu räumlich konstant ist, liefert dieses nur in Kombination mit weiteren Mustern Aussagen über spezifische räumliche Muster einzelner Extremniederschlagsereignisse.

Wie die PC-Zeitreihen in Abbildung 4 zeigen, ist das Weihnachtsereignis durch eine Kombination von Muster-1 mit Muster-3 charakterisiert, ein weiteres Ereignis Anfang Januar dagegen durch eine Kombination von Muster-1 mit Muster-2. Diese zwei Kombinationen von Mustern, den PC-Zeitreihen entsprechend gewichtet, sind für die jeweiligen Ereignisse in Abbildung 5 dargestellt. Beide Ereignisse sind durch die ersten drei Muster größtenteils charakterisiert. Dies bedeutet, dass die spezifischen räumlichen Muster der Dauerniederschläge im Winter 2023/24 nicht ungewöhnlich waren, in dem Sinne, dass auch in der Vergangenheit räumlich kohärente Extremniederschläge mit derselben geographischen Verteilung auftraten. Es sei angemerkt, dass die im vorherigen Abschnitt erwähnte Wetterlagenklassifikation zeigt, dass das Ereignis Anfang Januar tatsächlich unter einer anderen Wetterlage auftrat als das Weihnachtsereignis. Obwohl sich die Muster der zwei Ereignisse (Abb. 5) unterscheiden, so sind doch beide mit ergiebigen Niederschlägen über Niedersachsen verbunden, also gerade in jener Region, welche vom Hochwasser hauptsächlich betroffen war.

Des Weiteren kann ein Index berechnet werden, welcher auf einer normierten Summe aller

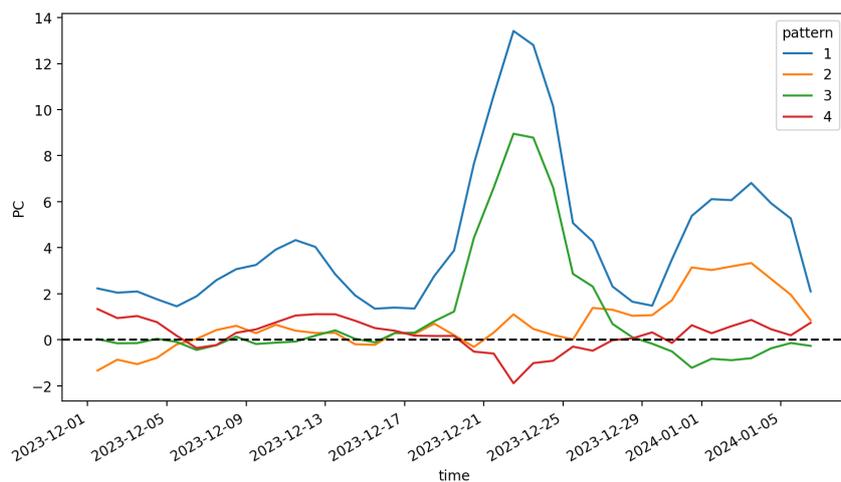


Abbildung 4: Die ersten vier PC-Zeitreihen der TPDM-Eigenzerlegung, hier gezeigt für die Periode vom 01.12.2023 bis zum 07.01.2024. Positive Werte zeigen positive Niederschlagsanomalien in den in Abbildung 3 grün eingefärbten Regionen an.

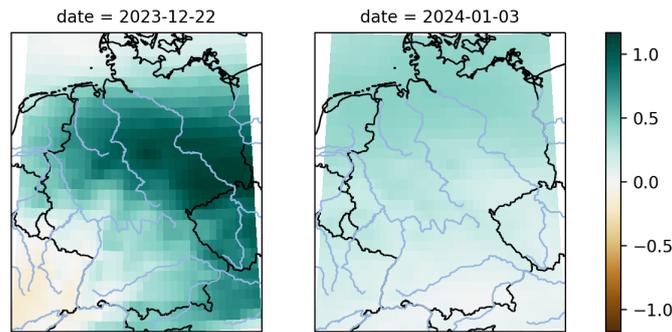


Abbildung 5: Links: Linearkombination aus Muster-1 und Muster-3 der TPDM-Eigenzerlegung (siehe Abb. 3), gewichtet mit den Werten der entsprechenden PC-Zeitreihen für die 7-Tages-Periode um den 22.12.2023, d.h. für das Weihnachtseignis. Rechts: Entsprechend gewichtete Linearkombination aus Muster-1 und Muster-2 für die 7-Tages-Periode um den 03.01.2024.

(hier: der ersten zehn) PC-Zeitreihen basiert und für jeden Zeitpunkt anzeigt, in welchem Ausmaß sämtliche Muster der räumlichen Abhängigkeiten extremer Niederschläge im aktuellen Niederschlagsfeld enthalten sind. Dieser sogenannte EP-Index (kurz: EPI, für "Extremal Pattern Index", Szemkus and Friederichs, 2024) wurde ebenfalls für alle Winter der Periode berechnet. Die jeweiligen Wintermaxima des EPI sind in Abbildung 6 dargestellt. Es zeigt sich, dass der EPI im Winter 2023/24 zwar groß war, jedoch nicht außergewöhnlich, in dem Sinne, dass das aktuelle Wintermaximum seit 1940 bisher bereits zehnmal übertroffen wurde. Das Wintermaximum der dritten PC-Zeitreihe, welche das Weihnachtseignis charakterisiert, ist jedoch außergewöhnlich und wurde seit 1940 bisher nur einmal übertroffen, und zwar im bereits erwähnten Winter 1986/87, in welchem auch das bisher größte PSI-Wintermaximum aufgetreten war (siehe Abschnitt 1.1). Muster-3 ist somit zwar das drittkohärenteste aller Muster extremer einwöchiger Niederschläge über Deutschland, trat aber nur sehr selten so stark allein hervor. Schließlich sei angemerkt, dass die Zeitreihen der EPI-Wintermaxima und der PSI-Wintermaxima von 1940 bis 2024 eine Korrelation von 0.83 aufweisen. Beide Indizes zeigen also verlässlich Winterdauerniederschlagsextreme über Deutschland an.

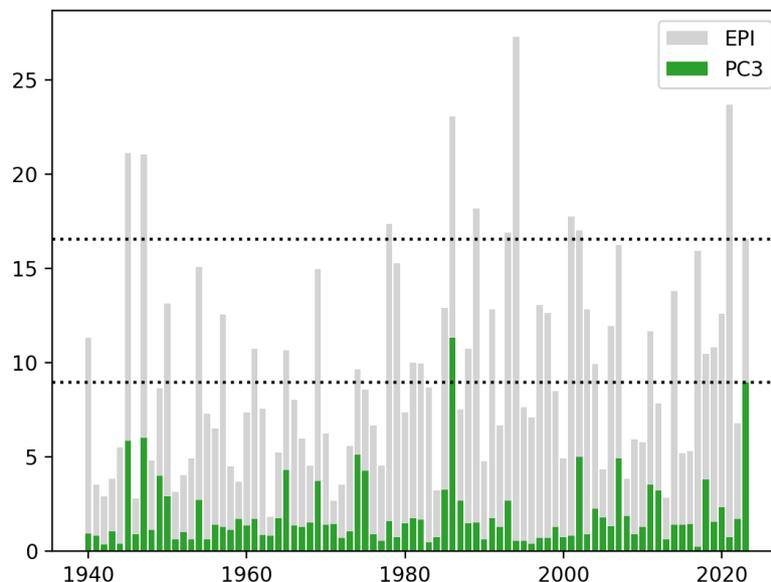


Abbildung 6: Zeitreihe der Wintermaxima des EPI und der dritten PC-Zeitreihe seit 1940. Die gestrichelten Linien markieren die entsprechenden Maxima des Winters 2023/24.

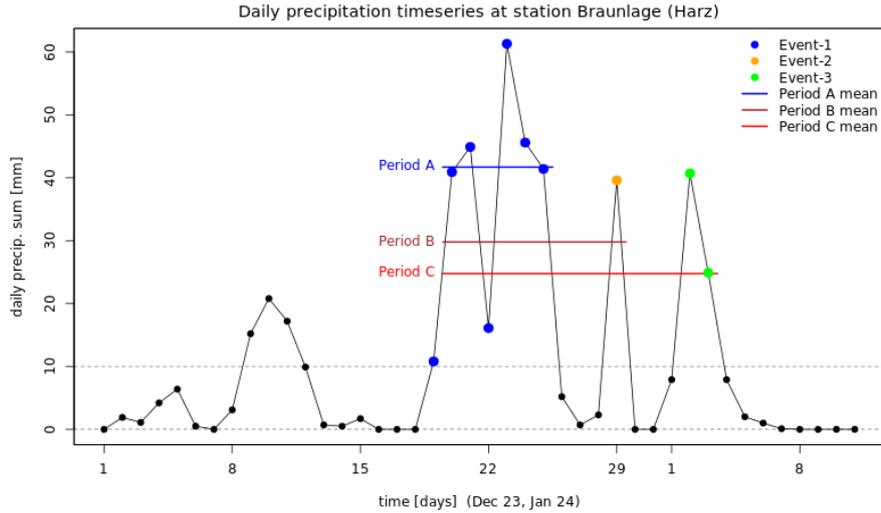


Abbildung 7: Zeitreihe der täglichen Niederschlagssummen, gemessen an der DWD-Messstation Braunlage, während der Periode 01.12.2023 bis 11.01.2024. Die farbigen Punkte markieren die verschiedenen Ereignisse (1-3), die farbigen Linien markieren die Perioden A bis C und deren mittlere Niederschlagsintensitäten (siehe Abb. 8).

1.3 Zeitliches Zusammenspiel mehrerer Niederschlagsereignisse

Ausgelöst wurde die Hochwassersituation durch das 7-tägige Niederschlagsereignis zu Weihnachten 2023. Dennoch traten auch anschließend weitere Dauerniederschlagsereignisse auf, welche das Abklingen des Hochwassers verzögerten und somit dessen Andauer verlängerten. Auch wenn die weiteren Ereignisse für sich betrachtet nicht außergewöhnlich waren, so besteht dennoch die Möglichkeit, dass deren Kombination mit dem vorherigen Weihnachtsergebnis aufgrund des zeitlichen Zusammenspiels von außergewöhnlicher Seltenheit gekennzeichnet war. Die folgende Analyse zeigt, beispielhaft anhand der täglichen Niederschlagszeitreihe der DWD-Messstation Braunlage (Harz), dass dies tatsächlich der Fall war.

Die Zeitreihe (Abb. 7) zeigt für die Zeit ab Mitte Dezember 2023 drei Niederschlagsereignisse, (i) das 7-tägige Weihnachtsergebnis (blau), (ii) ein eintägiges Ereignis am 29. Dezember (orange), und (iii) ein etwa zweitägiges Ereignis Anfang Januar 2024 (grün). Um die Seltenheit dieser Ereignisse sowie ihrer Kombinationen zu ermitteln, führen wir eine extremwertstatistische Analyse durch. Hierzu wird die tägliche Zeitreihe derselben Station, beginnend im Jahr 1931, verwendet, um eine verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV-Verteilung) an diese Daten anzupassen, welche es ermöglicht, die statistisch zu erwartenden (d.h. durchschnittlichen) Wiederkehrzeiten von Niederschlagsereignissen bestimmter Intensität und Dauer abzuschätzen. Das Besondere an der verwendeten Methode ist, dass die GEV-Verteilung für einen Bereich von Dauerstufen (1-30 Tage) gleichzeitig, d.h. konsistent, an die Daten angepasst wird (Fauer et al., 2021; Koutsoyiannis et al., 1998).

Die so abgeschätzten Wiederkehrzeiten sind in Abbildung 8 dargestellt (schwarze Linien), zusammen mit den drei Ereignissen im Dezember 2023 und Januar 2024 (blau, orange, grün) sowie deren Kombinationen (braun, rot). Es zeigt sich, dass bereits das Weihnachtsergebnis (blau) mit einer Dauer von 6-7 Tagen eine Wiederkehrzeit von etwas mehr als 100 Jahren besitzt und somit als Jahrhundertereignis bezeichnet werden kann. Dies ist konsistent mit den Ergebnissen von Kaspar et al. (2024), welche ebenfalls 100-jährige Wiederkehrzeiten im Bereich des Harzes zeigen. Die zwei folgenden Ereignisse (orange, grün) dagegen besitzen wesentlich kürzere Wiederkehrzeiten und sind somit für sich betrachtet keineswegs ungewöhnlich. Die Kombination des Weihnachtsergebnisses mit dem zweiten Ereignis (braun) bzw. mit dem zweiten und dritten Ereignis (rot) jedoch besitzt wiederum eine hundertjährige Wiederkehrzeit. Die zeitliche Abfolge der Ereignisse hat also dazu geführt, dass sogar über eine Dauer von ca. zweieinhalb Wochen die mittlere Niederschlags-

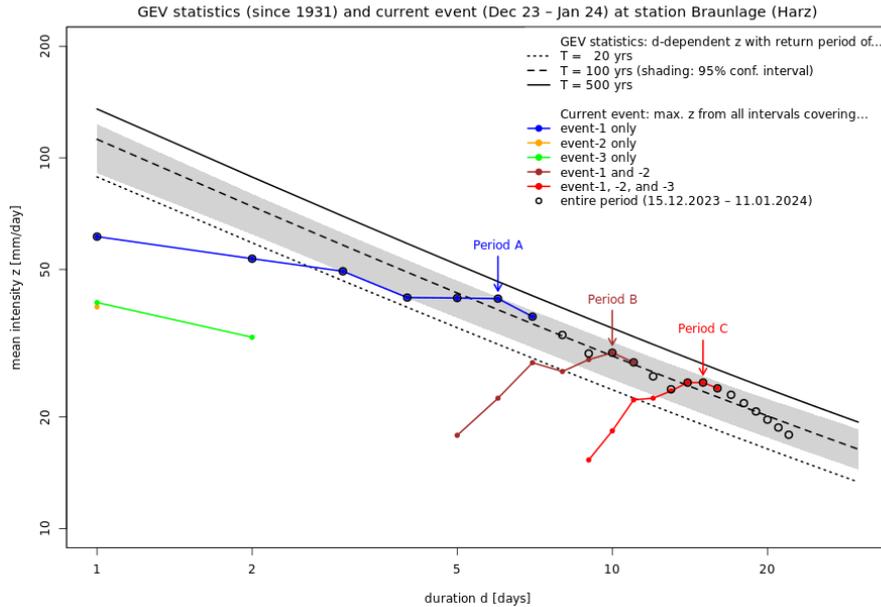


Abbildung 8: Die statistisch zu erwartenden (d.h. durchschnittlichen) Wiederkehrzeiten der dauerabhängigen mittleren Niederschlagsintensität an der DWD-Messstation Braunlage (schwarze Linien), und die dauerabhängigen mittleren Intensitäten der aktuellen Niederschlagsereignisse im Dezember 2023 und Januar 2024 (schwarze Kreise und farbige Linien und Punkte).

intensität einen Wert erreicht hat, welcher über diese Dauer im Durchschnitt nur etwa einmal in hundert Jahren auftritt.

Es sei angemerkt, dass das Weihnachtseignis in Norddeutschland, und selbst in Niedersachsen, nur an wenigen Orten Wiederkehrzeiten von nahe 100 Jahren erreicht hat, wie die Ergebnisse von [Kaspar et al. \(2024\)](#) zeigen (in weiten Bereichen Niedersachsens traten Niederschlagssummen mit Wiederkehrzeiten von 20 bis 50 Jahren auf). Dennoch illustriert die obige Analyse, dass die Dauerniederschläge im Winter 2023/24 nicht nur durch die lange Andauer des Weihnachtseignisses charakterisiert waren, sondern ebenfalls durch das zeitliche Zusammenspiel mit nachfolgenden, wenn auch schwächeren Niederschlagsereignissen Ende Dezember und Anfang Januar.

2 Weihnachtshochwasser und dessen Auswirkungen

Als Folge der Dauerniederschläge kam es in Teilen Nordwestdeutschlands zu einer Hochwassersituation. Im Folgenden wird zunächst die räumliche Ausdehnung dieses Hochwassers mithilfe eines hydrologischen Abflussmodells untersucht und mit früheren Hochwasserereignissen in Deutschland verglichen. Anschließend wird ein kurzer Überblick über die räumliche Verteilung der hochwasserbedingten Auswirkungen gegeben.

2.1 Räumliche Ausdehnung und hydrologische Abflussmodellierung

Die in Teilen extremen Niederschläge im Dezember 2023 und Januar 2024 trafen auf einen gesättigten Boden und führten zu einer Abflussreaktion und ansteigenden Wasserständen in Flüssen und Bächen. Betroffen waren in erster Linie die Einzugsgebiete im Nordwesten Deutschlands, allen voran das Weser-Einzugsgebiet mit den Zuflüssen Aller und Leine. Eine starke hydrologische Reaktion zeigten aber auch die westlichen Kopfgebiete und Zuflüsse in die Elbe, die im Harz entspringen. Erhöhte Abflussspitzen wurden auch in Oberläufen des Rheins und in Donauzuflüssen wie dem Main beobachtet. Obwohl nur einzelne Pegel Rekordhochwasser gemessen haben (allen voran im Aller/Leine-Einzugsgebiet) und einzelne Ortschaften von Überschwemmungen stark betroffen waren (z.B. im Ostharz), waren im Großteil der betroffenen Flüsse keine extremen Hochwasserabflüsse

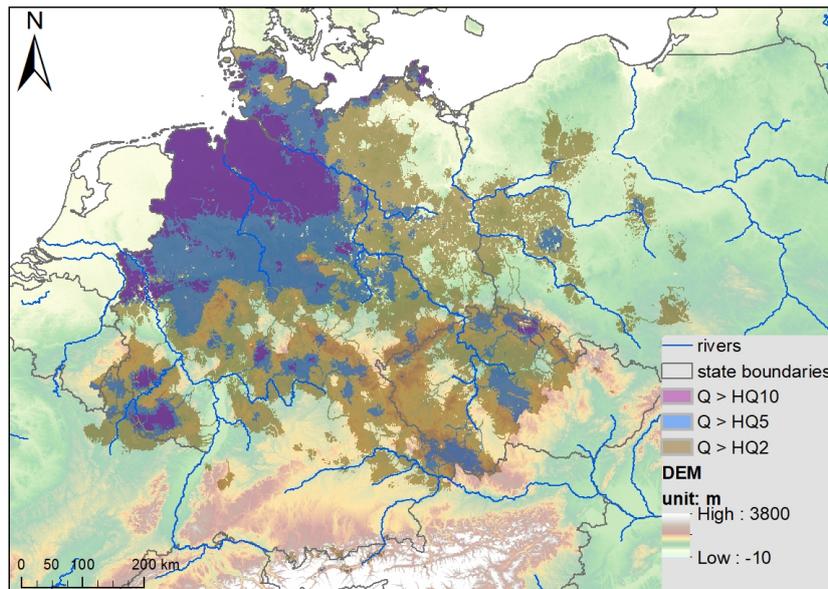


Abbildung 9: Räumliche Ausdehnung des Winterhochwassers 2023/24. In den eingefärbten Bereichen überstiegen die Abflussspitzen im Zeitraum von 14 Tagen um den 25. Dezember 2023 die Schwellenwerte der Wiederkehrzeiten von 2, 5 und 10 Jahren (HQ2, HQ5, HQ10; siehe Farbkodierung). Die Ergebnisse basieren auf der Modellrechnung mit dem hydrologischen Modell **mHM**, angetrieben mit täglichen E-OBS-Beobachtungsdaten von Niederschlag und Temperatur.

zu beobachten. Vielmehr stellte die große räumliche Ausdehnung des Winterhochwassers die Einsatzkräfte des Katastrophenschutzes vor eine große Herausforderung. Unter der räumlichen Ausdehnung verstehen wir in diesem Fall nicht die Größe der Überflutungsflächen bei Ausuferungen, sondern die Fläche, in der gemessene (oder modellierte) Hochwasserabflüsse bestimmte Schwellenwerte überschreiten. Wir adressieren im Folgenden die Frage: Wie groß und wie ungewöhnlich war die räumliche Ausdehnung des Winterhochwassers 2023/24, und wie ist diese im Vergleich zu anderen Hochwassern in der Vergangenheit einzuordnen?

Im ersten Schritt wurde eine räumlich konsistente Reanalyse des Abflusses mit Hilfe des rasterbasierten hydrologischen Modells **mHM** am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig durchgeführt. Das kalibrierte **mHM**-Modell wurde mit den rasterbasierten täglichen Niederschlags- und Temperaturdaten aus dem E-OBS-Datensatz mit einer Auflösung von $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ im Zeitraum vom 01.01.1955 bis zum 31.01.2024 angetrieben. Als Output lieferte das Modell die täglichen Abflüsse in einer Auflösung von ca. $0.016^\circ \times 0.016^\circ$, was in etwa $1.7 \text{ km} \times 1.7 \text{ km}$ entspricht. Die täglichen Abflüsse wurden flächendeckend für sechs große Einzugsgebiete Deutschlands – Elbe, Rhein, Donau, Weser, Ems und Oder, inklusive der Oberläufe in den Nachbarländern – gerechnet. Die modellierten Abflüsse stellen die Summe der Oberflächenabflüsse, der Abflüsse im Untergrund und der Abflüsse in Flüssen und Bächen in jeder Rasterzelle dar. Für jede Rasterzelle wurden aus der Zeitreihe täglicher Abflüsse die Jahresmaxima extrahiert und diesen empirische Weibull-Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Die extrahierten Abflusswerte, die den Wiederkehrperioden von 2, 5 und 10 Jahren entsprechen, bilden die Schwellenwerte (im Folgenden als HQ2, HQ5 und HQ10 bezeichnet), die für die Identifikation von Hochwasserereignissen und deren räumlicher Ausdehnung genutzt werden. Bei der Überschreitung des HQ2-Schwellenwerts im Fluss kann von einer Ausuferung bzw. der Überschreitung des sogenannten bordvollen Abflusses gesprochen werden. In der Regel führt diese Ausuferung aber noch zu keinen Überflutungen von besiedelten Gebieten und Hochwasserschäden. Für jeden Tag wurde die Anzahl der Zellen aufsummiert, die den jeweiligen Schwellenwert übersteigen. Um die Dauer der Hochwasserereignisse zu berücksichtigen, wurde die Summe aller Zellen über dem Schwellenwert im 15-Tagesfenster um den Tag mit maximaler jährlicher Ausdehnung gebildet. Abbildung 9 zeigt die räumliche Ausdehnung des Winterhochwassers 2023/24 bei der Überschreitung des jeweiligen Schwellenwerts. Über die Hälfte des Bundesgebiets war von Ausuferungen ($Q > HQ2$) betroffen, während der Nordwesten Deutschlands groß-

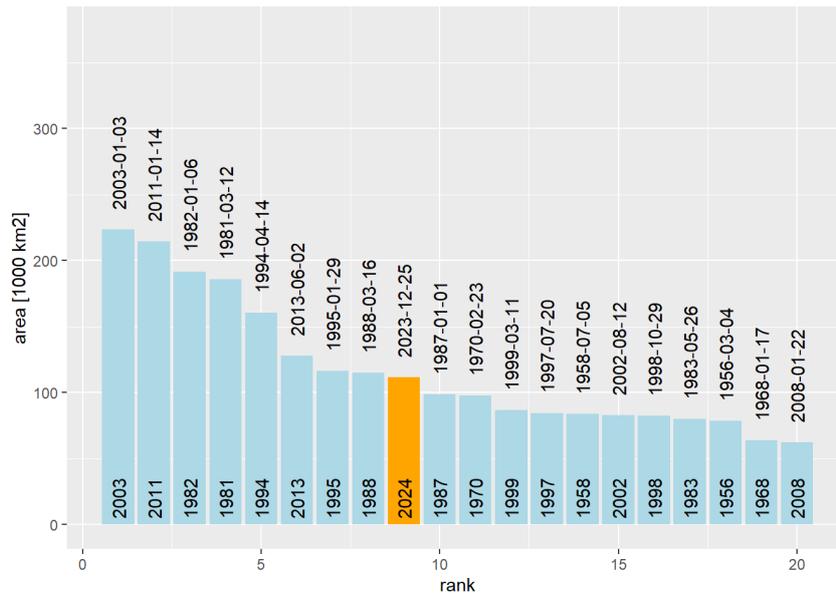


Abbildung 10: Räumliche Ausdehnung vergangener Hochwasser in Deutschland (mit $Q > HQ_{10}$) in absteigender Reihenfolge.

flächlich (und zusätzlich einige wenige kleine Regionen z.B. in Nordrhein-Westfalen und Thüringen) von Überschreitungen des 10-jährigen Abfluss-Schwellenwerts HQ_{10} betroffen war ($Q > HQ_{10}$).

Das Winter-Hochwasser 2023/24 wurde in die Reihe der größten Hochwasser in Deutschland im Hinblick auf die räumliche Ausdehnung eingeordnet. Abbildung 10 zeigt, dass dieses Hochwasser mit gut 100.000 km^2 auf Rang 9 der größten Hochwasser in Deutschland bei der Überschreitung des HQ_{10} -Schwellenwerts steht, wenn man die Zeitspanne von ± 7 Tagen um den 25. Dezember 2023 betrachtet. Die räumliche Ausdehnung für die Überschreitung des HQ_2 - und des HQ_5 -Schwellenwerts ergab die Ränge 23 bzw. 17. Das Diagramm in Abbildung 10 zeigt, dass mit Ausnahme des großen Sommerhochwassers im Juni 2013, welches aufgrund der hohen Bodenvorfeuchte ebenfalls eine große räumliche Ausdehnung hatte (Schröter et al., 2015), alle größeren Hochwasser im Winterhalbjahr aufgetreten sind. Das aktuelle Ereignis scheint nicht das größte bisher aufgetretene Ereignis zu sein, rangiert aber unter den oberen 10 Hochwassern. Das letzte zuvor aufgetretene großräumige Winterhochwasser im Januar 2011 liegt bereits über 12 Jahre zurück (Rang 2) und war mit über 200.000 km^2 fast doppelt so groß wie das aktuelle Ereignis. Das großräumigste Ereignis wurde jedoch im Januar 2003 detektiert. Dieses Ereignis stand allerdings im Schatten des verheerenden Hochwassers im August 2002, welches zu dem Zeitpunkt zwar das schadensträchtigste Hochwasserereignis in Deutschland gewesen war, bezüglich seiner räumlichen Ausdehnung aber nur Rang 15 erreicht.

2.2 Betroffene Fläche, Personen und Gebäude

Das durch die Dauerniederschläge verursachte Hochwasser hatte Auswirkungen in weiten Teilen Norddeutschlands, insbesondere in Niedersachsen und Bremen, aber auch in Hessen und in Nordrhein-Westfalen. Im Folgenden werden mithilfe von Satellitendaten des Europäischen Copernicus-Dienstes für Katastrophen- und Krisenmanagement (Emergency Management Service, EMS; EMSR712) die Auswirkungen der Überflutung an den Flüssen Hase, Hunte, Weser, Aller, Leine-Rhume, Innerste, Fuhse, Oker-Schunter und Berga analysiert. Diese Flüsse fließen hauptsächlich durch Niedersachsen und Bremen. Neben der überfluteten Fläche selbst kann unter Verwendung einer Bevölkerungskarte (Schiavina et al., 2023) und aktuellen Daten von OpenStreetMap sowohl die Anzahl (potentiell) betroffener Personen als auch die Anzahl betroffener Gebäude abgeschätzt werden.

Die Überflutung der betrachteten Flüsse betrifft mehr als 40 Landkreise. Betroffen ist eine Fläche von ca. 1000 km^2 . Dabei sind schätzungsweise 25.000 bis 30.000 Personen (potentiell) be-

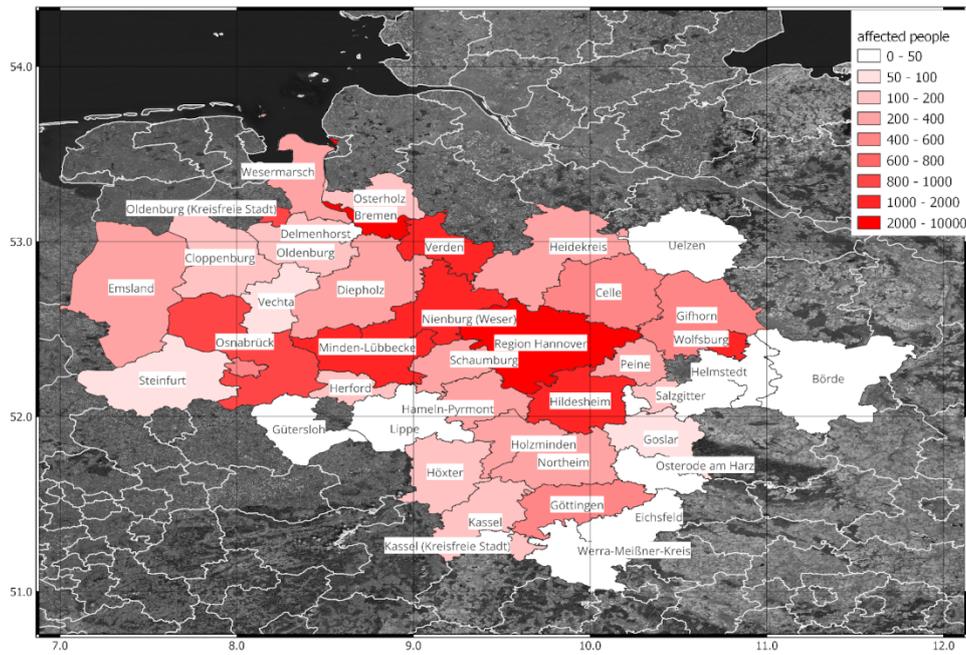


Abbildung 11: Anzahl (potentiell) betroffener Personen pro Landkreis, basierend auf Satellitendaten des EMS und GHS-POP-Bevölkerungskarten (Schiavina et al., 2023).

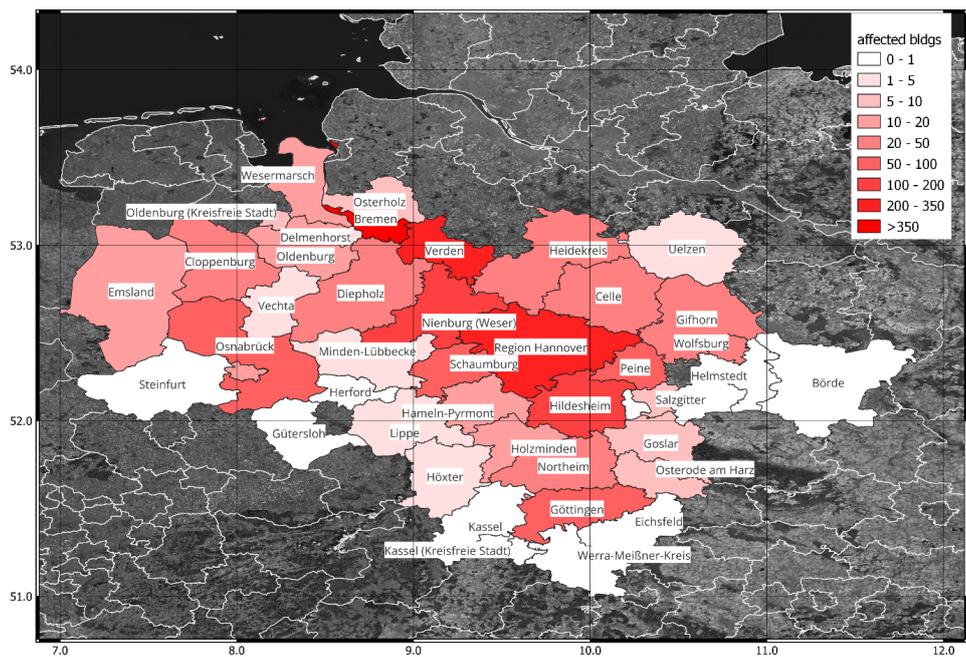


Abbildung 12: Anzahl betroffener Gebäude pro Landkreis, basierend auf Satellitendaten des EMS und Daten von OpenStreetMap.

treffen sowie rund 2000 Gebäude. Abbildung 11 zeigt die betroffenen Landkreise inklusive der Abschätzung betroffener Personen je Landkreis, Abbildung 12 entsprechend die Abschätzung betroffener Gebäude. Eine Übersicht für die einzelnen Landkreise, basierend auf der Kombination der genannten Datensätze, ist in Tabelle 1 zu finden. Eine alternative Abschätzung des EMS selbst ergibt dagegen einen geringeren Wert von ca. 18.000 betroffenen Personen, und darüber hinaus ca. 4,6 km² betroffener bebauter Fläche und 470 km betroffener Straßen.

Landkreis	Bundesland	Area [km ²]	Population (GHSL)	Buildings (OSM)
Bremen	Bremen	43.14	9100	411
Kassel	Hessen	4.83	200	1
Celle	Niedersachsen	69.68	600	49
Cloppenburg	Niedersachsen	20.69	100	32
Diepholz	Niedersachsen	57.76	400	36
Emsland	Niedersachsen	34.52	300	12
Gifhorn	Niedersachsen	47.02	500	34
Goslar	Niedersachsen	5.41	100	8
Göttingen	Niedersachsen	6.81	400	67
Hameln-Pyrmont	Niedersachsen	16.17	400	20
Heidekreis	Niedersachsen	80.05	300	36
Hildesheim	Niedersachsen	39.41	1100	102
Holz Minden	Niedersachsen	9.88	200	18
Nienburg (Weser)	Niedersachsen	104.12	1100	193
Northeim	Niedersachsen	27.13	300	39
Oldenburg	Niedersachsen	18.79	100	17
Oldenburg (Kreisfreie Stadt)	Niedersachsen	6.98	800	9
Osnabrück	Niedersachsen	43.10	800	85
Osnabrück (Kreisfreie Stadt)	Niedersachsen	1.75	500	17
Osterholz	Niedersachsen	7.91	100	8
Peine	Niedersachsen	13.33	400	66
Region Hannover	Niedersachsen	84.79	4300	227
Salzgitter	Niedersachsen	2.96	100	6
Schaumburg	Niedersachsen	15.90	300	74
Vechta	Niedersachsen	20.59	100	5
Verden	Niedersachsen	105.88	1100	345
Wesermarsch	Niedersachsen	10.20	400	13
Wolfsburg	Niedersachsen	14.26	1400	32
Herford	Nordrhein-Westfalen	1.88	200	0
Höxter	Nordrhein-Westfalen	9.55	200	2
Minden-Lübbecke	Nordrhein-Westfalen	54.79	1700	5
Steinfurt	Nordrhein-Westfalen	2.86	100	1
Total		982 km²	27700	1970

Tabelle 1: Überflutungs-Statistik (betroffene Fläche, potentiell betroffene Personen und betroffene Gebäude), basierend auf Satellitendaten des EMS, GHS-POP-Bevölkerungskarten (Schiavina et al., 2023) und Daten von OpenStreetMap.

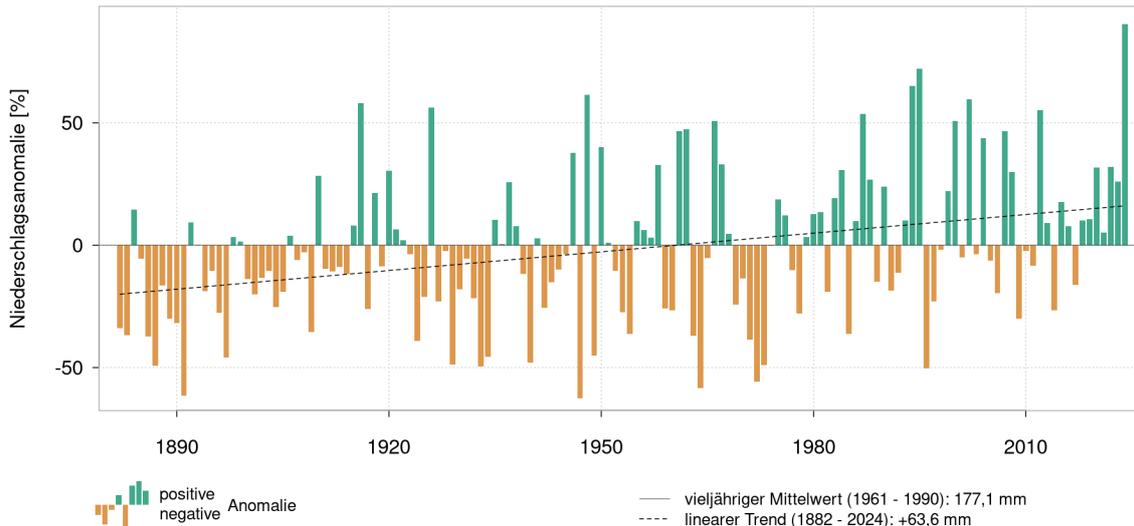


Abbildung 13: Relative Anomalien des Winterniederschlags (Dezember bis Februar), gemittelt über das Gebiet Niedersachsen, Bremen und Hamburg, seit 1882 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 (basierend auf Monatsdaten der Nationalen Klimaüberwachung, DWD (Kaspar et al., 2013), abgerufen unter <https://www.dwd.de/zeitreihen>, am 13.05.2024, genutzt unter CC BY 4.0).

3 Zusammenhang mit anthropogener Klimaerwärmung

Um abzuschätzen, ob das Auftreten von Niederschlagsereignissen wie jenes im Dezember 2023 durch die anthropogene Klimaerwärmung begünstigt wird, hat der DWD eine entsprechende Attributionsstudie durchgeführt (Tivig et al., 2024, im Folgenden als DWD-Attributionsstudie bezeichnet). Betrachtet wurden hierfür winterliche Niederschlagssummen im Nordwesten Deutschlands.

3.1 Langfristiger Trend des mittleren Winterniederschlags

Zunächst kann untersucht werden, inwieweit sich die winterlichen Niederschlagssummen in der Vergangenheit allgemein geändert haben. Abbildung 13 zeigt, dass diese für das Gebietsmittel über Niedersachsen, Bremen und Hamburg von 1882 bis 2024 um 36% zugenommen haben, relativ zum Mittelwert von 177,1 mm in der Referenzperiode 1961-1990. Dieser positive Trend der winterlichen Niederschlagssumme über die vergangenen 142 Jahre mag als ein erster Hinweis darauf gelten, dass der Winterniederschlag im betrachteten Gebiet im Zuge der Klimaerwärmung zugenommen hat und in Verbindung damit möglicherweise auch extreme Dauerniederschläge im Winter wahrscheinlicher geworden sein könnten.

Aktuelle globale Klimamodelle (CMIP6) zeigen in Zukunftsprojektionen mit einem global wärmeren Klima eine Zunahme der Intensität extremer Niederschläge (max. 1-tägiger und max. 5-tägiger Niederschlag) in weiten Teilen der mittleren Breiten (Chao et al., 2021). Im sechsten Sachstandsbericht des IPCC wird auf die regionalen Unterschiede in Europa bezüglich der Änderung extremer Niederschläge hingewiesen. Während im südlichen Teil, wie z.B. dem Mittelmeerraum, teilweise Abnahmen oder keine Änderungen projiziert werden, gibt es robuste Hinweise auf Zunahmen in Nord- und Mitteleuropa (Seneviratne et al., 2021, Kapitel 11.4.5, Tabelle 11.17).

Für eine quantitative Abschätzung des Einflusses der Klimaerwärmung auf das aktuelle Ereignis im Speziellen ist jedoch eine gezielte statistische Untersuchung nötig. Diese ist Kern der DWD-Attributionsstudie und wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

3.2 Einfluss der Klimaerwärmung auf das aktuelle Ereignis

Die in der DWD-Attributionsstudie durchgeführte Analyse basiert auf jährlichen Zeitreihen der maximalen Monatsniederschlagssumme pro Winter (November bis Januar), gemittelt über das in

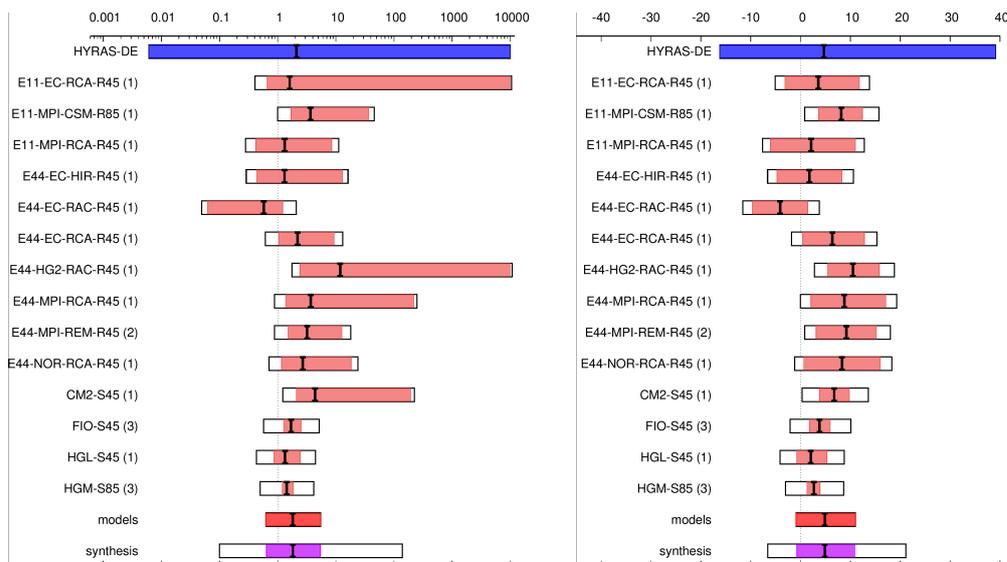


Abbildung 14: Graphische Zusammenfassung der Ergebnisse der DWD-Attributionsstudie. (Links) Wahrscheinlichkeitsverhältnis und (rechts) relative Intensitätsveränderung (in %) für eine maximale Monatsniederschlagssumme pro Winter (November bis Januar) mit einer Wiederkehrzeit von 120 Jahren im aktuellen Klima, im Vergleich zu einem 1,2 °C kälteren Klima (um 1900). Dargestellt sind die Ergebnisse aus Beobachtungsdaten (blau), aus Daten der einzelnen Klimamodelle (hellrot), die gewichtete Synthese der Klimamodelle (dunkelrot) und die Gesamtsynthese aus Beobachtungen und Modellen (violett). Die Unsicherheiten ergeben sich aus einem 1000-fachen Bootstrap (farbig) und einer weiteren Modellkorrektur (weiß). (Übernommen von [Tivig et al., 2024](#))

Abbildung 1 eingezeichnete geographische Gebiet im Nordwesten Deutschlands (51,5°N – 53,5°N, 8,0°O – 11,0°O). Verwendet wurden sowohl Beobachtungsdaten (d.h. der Rasterdatensatz HYRAS-DE-PRE für die Periode 11/1930 – 12/2023, siehe: [Rauthe et al., 2013](#)) als auch Daten verschiedener Klimamodelle (CMIP6 und EURO-CORDEX, siehe: [Eyring et al., 2016](#); [Jacob et al., 2014](#)). Für jeden einzelnen Datensatz wird an die entsprechende jährliche Zeitreihe eine verallgemeinerte Extremwert-Verteilung angepasst, welche jedoch zusätzlich von der (global gemittelten und über vier Jahre tiefpassgefilterten) Temperaturzeitreihe als Kovariate abhängig gemacht wird ([Tivig et al., 2024](#)). Dieser Ansatz ermöglicht es, die zu erwartende (d.h. durchschnittliche) Wiederkehrzeit der im Dezember 2023 aufgetretenen Monatsniederschlagssumme zu ermitteln. Aus den Beobachtungsdaten ging dabei hervor, dass es sich bei dem Ereignis mit einer monatlich gemittelten Intensität von 5,3 mm/Tag um ein Ereignis mit einer Wiederkehrzeit von ungefähr 120 Jahren (95%-Konfidenzintervall: 17 Jahre – ∞) im aktuellen Klima handelt ([Tivig et al., 2024](#)). Weiterhin kann mit diesem Ansatz untersucht werden, inwiefern die Wiederkehrstatistik von der Temperatur abhängt. Das folgende Zitat aus der Kurzzusammenfassung der DWD-Attributionsstudie gibt deren wesentliche Ergebnisse wieder ([Tivig et al., 2024](#)):

”[...] Die Studie zeigt, dass sich durch den bisherigen Klimawandel die Intensität des größten Monatsniederschlages im Winter in der betroffenen Region in Niedersachsen im Vergleich zu einem globalen Klima, das 1,2°C kühler ist als heute, um 5% erhöht hat. Die Modellergebnisse zeigen hier jedoch insgesamt eine Spanne von -7% bis +21%. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches einmonatiges Niederschlagsereignis auftritt, hat sich um einen Faktor 1,8 erhöht, wobei auch hier die Ergebnisspanne recht groß ist (0,1 bis 140). Dies bedeutet, dass sich nicht alle Modelle über Ausmaß und Richtung des klimawandelbedingten Einflusses auf die gemittelten Monatsniederschläge einig sind. Die meisten zeigen jedoch eine Zunahme der Intensität und Wahrscheinlichkeit.

In einem Klima, das 2°C wärmer ist als das Klima um 1900 – das bedeutet weitere 0,8°C wärmer als heute – zeigen die Modelle eine zusätzliche Verstärkung der Intensität dieses Monatsereignisses um 3% (-0,5% bis 7%). Für einen Dauerregen wie diesen ist eine weitere Erhöhung der Wahrscheinlichkeit um einen Faktor von 1,5 (0,95 bis 2,5) zu erwarten. [...]”

In den Abbildungen 14 und 15 sind diese Ergebnisse graphisch dargestellt. Durch die getrennte

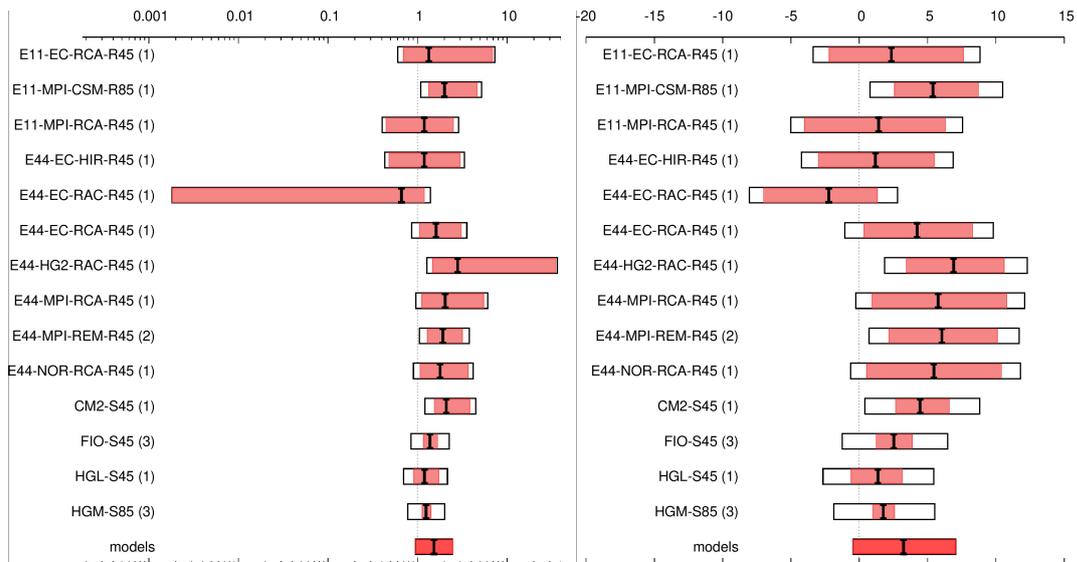


Abbildung 15: Wie in Abbildung 14, aber für ein 0,8 °C wärmeres Klima, im Vergleich zum aktuellen Klima. Da es sich um ein Zukunftsszenario handelt, können hier keine Ergebnisse aus Beobachtungsdaten dargestellt werden.

Darstellung von Beobachtungen und einzelnen Klimamodellen veranschaulichen diese Abbildungen auch gut die bestehenden Unsicherheiten.

Literatur

- Caldas-Alvarez, A., Feldmann, H., Lucio-Eceiza, E., and Pinto, J. G. (2023). Convection-parameterized and convection-permitting modelling of heavy precipitation in decadal simulations of the greater Alpine region with COSMO-CLM. *Weather and Climate Dynamics*, 4(2):543–565. <https://wcd.copernicus.org/articles/4/543/2023/>.
- Chao, L., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., and Wehner, M. (2021). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 Models. *Journal of Climate*, 34(9):3441 – 3460. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/34/9/JCLI-D-19-1013.1.xml>.
- Cooley, D. and Thibaud, E. (2019). Decompositions of dependence for high-dimensional extremes. *Biometrika*, 106:587–604. <https://academic.oup.com/biomet/article/106/3/587/5520556/>.
- DWD (1947a). Deutsches Meteorologisches Jahrbuch US-Zone 1947. *Bad Kissingen*.
- DWD (1947b). Monatlicher Witterungsbericht. *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes*, 12.
- DWD (1978). Monatlicher Witterungsbericht. *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes*, 12.
- DWD (1986). Monatlicher Witterungsbericht. *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes*, 12.
- DWD (1987). Monatlicher Witterungsbericht. *Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes*, 1.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9:1937–1958. <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/>.
- Fauer, F. S., Ulrich, J., Jurado, O. E., and Rust, H. W. (2021). Flexible and consistent quantile estimation for intensity–duration–frequency curves. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(12):6479–6494. <https://hess.copernicus.org/articles/25/6479/2021/>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G. D., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146:1999–2049. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803>.
- Jacob, D., Petersen, J., and et al., B. E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*, 14:563–578. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., and Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research*, 10(1):99–106. <https://asr.copernicus.org/articles/10/99/2013/>.
- Kaspar, F., Rauthe, M., Brendel, C., Junghänel, T., Rauthe-Schöch, A., Ostermüller, J., Kunert, L., Drüke, M., Deutschländer, T., Ziese, M., Rustemeier, E., Schirmeister, Z., Breidenbach, J. N., Zepperitz, M., Schröter, J., Tivig, M., Lorenz, P., Sauerbrei, R., Krienkamp, F., Bissolli, P., van der Linden, R., Friedrich, K., Leppelt, T., Kratzsch, T., and Ullrich, R. (2024). Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands vom 19. Dezember 2023 bis 5. Januar 2024. *Deutscher Wetterdienst*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20240116_dauerniederschlaege_2023-2024.html.

- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., and Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206(1-2):118–135. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169498000973?via%3Dihub>.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., and Gratzki, A. (2013). A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorol. Zeitschrift*, 22:235–256. https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/81060/A_Central_European_precipitation_climatology_Part_?af=crossref.
- Riebold, J., Richling, A., Ulbrich, U., Rust, H., Semmler, T., and Handorf, D. (2023). On the linkage between future Arctic sea ice retreat, Euro-Atlantic circulation regimes and temperature extremes over Europe. *Weather and Climate Dynamics*, 4(3):663–682. <https://wcd.copernicus.org/articles/4/663/2023/>.
- Schiavina, M., Freire, S., Alessandra, C., and MacManus, K. (2023). GHS-POP R2023A – GHS population grid multitemporal (1975-2030). <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/2ff68a52-5b5b-4a22-8f40-c41da8332cfe>.
- Schröter, K., Kunz, M., Elmer, F., Mühr, B., and Merz, B. (2015). What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19:309–327. <https://hess.copernicus.org/articles/19/309/2015/>.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S., Wehner, M., and Zhou, B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chapter Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate, page 1513–1766. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/weather-and-climate-extreme-events-in-a-changing-climate/5BCB24C5699F1D42B2DE379BDD4E2119>.
- Szemkus, S. and Friederichs, P. (2024). Spatial patterns and indices for heat waves and droughts over Europe using a decomposition of extremal dependency. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 10(1):29–49. <https://ascmo.copernicus.org/articles/10/29/2024/>.
- Tivig, M., Schröter, J., Lorenz, P., Sauerbrei, R., Knauf, J., and Kreienkamp, F. (2024). Attributionstudie zu den Niederschlagsereignissen in Niedersachsen Dezember 2023 - Januar 2024. *Bericht des Deutschen Wetterdienstes*. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/spez_themen/attributionen/links/2023_studie.html.