

Mostafa E. Hamouda, Christian Czakay, Cristina Primo, Amelie Hoff & Bodo Ahrens

Zu atmosphärischen Ursachen für extreme Hochwasserereignisse in Mitteleuropa

On Atmospheric Drivers for Central European Flood Events

Werden die Hochwasserereignisse in Mitteleuropa mit der weiteren globalen Erwärmung häufiger und intensiver? Dieser Beitrag berichtet zu dieser Fragestellung von Ergebnissen, die im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods) erzielt wurden. Wichtige großräumige Hochwasserextreme in Mitteleuropa sind auf sogenannte Vb-Niederschlagsereignisse im Sommerhalbjahr und Regen-auf-Schnee-Ereignisse im Winterhalbjahr zurückzuführen. Hier werden die atmosphärischen Ursachen solcher Hochwasserereignisse unter Klimaänderung untersucht. Die für diese Untersuchung geeigneten atmosphärischen Datensätze werden mit einem gekoppelten regionalen Klimamodell erzeugt. Außer einem verbesserten Prozessverständnis zeigen die Ergebnisse für ein zukünftiges Klima, dass konvektive Niederschlagsspitzen während Vb-Ereignissen häufiger und intensiver werden und damit auch Vb-Hochwasser extremer werden könnten. Die großräumigen Regen-auf-Schnee-Ereignisse zeigen eine multi-dekadische Variabilität, die sich teilweise durch zyklisch variierende Klimatreiber, wie die Nordatlantische Oszillation und das Skandinavische Hochdruckmuster erklären lassen. Für ein zukünftiges Klima zeigt sich aufgrund reduzierter mittlere Schneemengen eine Abnahme in der Häufigkeit und der mittleren Intensität.

Schlagwörter: Vb-Niederschlagsereignisse, Regen-auf-Schnee-Ereignisse, Klimaprojektionen, konvektiver Niederschlag, multi-dekadische Variabilität

With global warming, there is a concern about more frequent occurrences and increasing intensities of flood events in Central Europe. This paper reports results on this issue obtained within the framework of the DFG research group SPATE (Space-Time Dynamics of Extreme Floods). Important large-scale flood extremes in Central Europe are so-called Vb-precipitation events in summer and rain-on-snow events in winter. Here, the atmospheric causes of such flood events under climate change are investigated. The atmospheric datasets suitable for this study are generated using a state-of-the-art coupled regional climate model. In addition to an improved understanding of processes, results for a future climate indicate that convective precipitation peaks will become more frequent and intense during Vb-events, and thus Vb-floods will become more extreme. Large-scale rain-on-snow events show multi-decadal variability, which can be partially explained by cyclically varying climate drivers, such as the North Atlantic Oscillation and the Scandinavian Pattern. For a future climate, because of reduced average snow amounts a decrease in frequency and mean intensity is observed.

Keywords: Vb-precipitation events, rain-on-snow events, climate projections, convective precipitation, multi-decadal variability

1 Einleitung

Extremhochwasserereignisse im Klimawandel erhalten in letzter Zeit mehr Aufmerksamkeit. Wärmere Luftmassen können mehr Wasserdampf aufnehmen, wodurch hochwasserauslösende konvektive, orographische und frontale Niederschläge verstärkt werden. Hinzu kommt der Einfluss der Klimavariabilität auf die typischen Zugbahnen und Häufigkeit von Zyklonen.

In Mitteleuropa können Extremhochwasser durch eine Vielzahl atmosphärischer Situationen ausgelöst werden. Im Sommerhalbjahr haben Starkniederschläge durch sogenannte Vb-Zyklonen (nach VAN BEBBER, 1891) besondere Relevanz. Vb-Zyklonen entstehen im westlichen Mittelmeerraum und folgen einer Zugbahn Richtung Osten, die an der Ostflanke der Alpen in Richtung Nordosten abdreht und schließlich in Mitteleuropa für Niederschlag sorgt. NIESSEN et al. (2013) zeigen, dass bei ca. 40 % der Vb-Zyklonen das 95. Perzentil des Tagesniederschlags überschritten wird. Die geschätzte Häufigkeit von Vb-Zyklonen variiert stark mit der angewandten Diagnosemethode und der verwendeten Wetteranalyse. So verzeichneten HOFSTÄTTER & CHIMANI (2012) im Mittel 3,5 Vb-Ereignisse pro Jahr, MESSMER et al. (2015) hingegen nur 2,3 Ereignisse pro Jahr für den Zeitraum von 1979 bis 2013. Die Relevanz dieser Ereignisse motiviert eine robustere Identifikationsmethode und die Untersuchung für

die Gegenwart und eine projizierte Klimazukunft insbesondere bezüglich zukünftig verstärkter konvektiver Starkniederschläge.

Im Winter bzw. Frühjahr sind Regen-auf-Schnee-Ereignisse (VORMOOR et al., 2016; LI et al., 2019) relevant. So kann ein starkes Tiefdruckgebiet über dem Westatlantik für Advektion warmer und feuchter Luft nach Mitteleuropa und in Folge für große Regenmengen sorgen. Insbesondere nach vorhergegangenen Schneefällen kann dies mit durch den Regen verstärkt einsetzender Schneeschmelze und hohen Abflussbeiwerten zu sogenannten Regen-auf-Schnee-Ereignissen (rain-on-snow, ROS) führen und weiträumige Extremhochwasser auslösen (JACOBEIT et al., 2010). In Mitteleuropa treten ROS-Ereignisse hauptsächlich von Ende Dezember bis in den Frühling auf, wobei vor allem Regionen ab einer Höhe von 400 m über dem Meeresspiegel betroffen sind (SUI, 1998; SUI & KOEHLER, 2001). In einem sich erwärmenden Klima könnten sich die typischen ROS-Ereignisse im Frühling allerdings früher ins Jahr verschieben (BLÖSCHL et al., 2017; DONG & MENZEL, 2020). Des Weiteren bleibt zu klären, inwieweit sich die Häufigkeit und Intensität der Ereignisse verändern wird.

Um diese komplexen Extremwettersituationen detailliert untersuchen zu können, wird eine gute Kenntnis des Atmosphärenzustandes benötigt. Dies ist auf großen Skalen durch die Verwendung moderner Wetteranalysen gewährleistet. Die für die

Extremereignisse notwendige räumlich und zeitlich detailliertere Kenntnis des Atmosphärenzustandes wird durch eine Verfeinerung der Wetteranalysen mittels regionaler Klimasimulationen erreicht. Regionale Klimaprojektionen in die Zukunft erlauben außerdem eine Betrachtung zukünftiger Extreme. Diese Methodik wird im nächsten Abschnitt näher beschrieben. Daraufhin werden in weiteren Kapiteln Vb- und ROS-Ereignisse in Gegenwart und Zukunft diskutiert. Dabei greifen wir hier auch im Sinne einer Zusammenfassung auf bereits im Rahmen von der Forschungsgruppe SPATE publizierte Ergebnisse der Koautoren zurück.

2 Hocho aufgelöster atmosphärischer Klimadaten-satz für 1901 – 2100

In diesem Kapitel wird das regionale Atmosphäre-Ozean-Klimamodellsystem beschrieben, das eine dynamische Verfeinerung, also das Erstellen einer hocho aufgelösten, physikalisch konsistenten Darstellung des atmosphärischen Zustands für die historische Periode und in einer Klimazukunft, ermöglicht.

Das verwendete System besteht aus dem dreidimensionalen, nicht-hydrostatischen, regionalen Atmosphärenmodell in der Klimaversion COSMO-CLM (CCLM; ROCKEL et al., 2008). Um interaktive Prozesse zwischen Atmosphäre und Ozean zu ermöglichen, wurde das Atmosphärenmodell CCLM mit dem Ozeanmodell "Nucleus for European Modelling of the Ocean" (NEMO)

gekoppelt. Das gekoppelte Modellsystem kann als vielseitiges Werkzeug zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre über weite Raum- und Zeitskalen verwendet werden (PHAM et al., 2017; KELEMEN et al., 2019; PRIMO et al., 2019).

Das Modellsystem wird hier mit einem horizontalen Gitterpunkt- abstand von 12 km bzw. 0,11° betrieben und an den Rändern mit verschiedenen Wetteranalysen, d. h. beobachtungs-basierten Schätzungen des vierdimensionalen atmosphärischen Zustandes, und globalen Klimamodellsimulationen angetrieben. Diese haben eine geringere räumliche Auflösung und werden durch die Anwendung des Modellsystems, das kleinskalige Prozesse wie beispielsweise Land-See-Wind-Zirkulation, Orographie und Hebungsniederschläge besser auflösen kann, auf die Zielauf- lösung verfeinert.

Als Referenz für den Zustand der Atmosphäre wurden Reana- lyse-getriebene Simulationen für den Zeitraum ab 1901 über Europa durchgeführt. Die langen konsistenten hocho aufgelösten Simulationen erlauben die statistische Betrachtung seltener Extremereignisse. Die Abbildung 1 zeigt exemplarisch mit der Reanalyse NOAA/NCEP-20CRv2 (COMPO et al., 2011) angetrie- bene Simulationsergebnisse für die Oberflächentem- peraturen europäischer Randmeere, die bei hochwassererzeu- genden Feuchtetransporten eine weiter unten näher gezeigte Rolle spielen. Die Atmosphäre-Ozean-Kopplung wurde bei den

drei Randmeeren (Mittelmeer, Nord- und Ostsee) angewendet (PRIMO et al., 2019). Die simulierten Meeresoberflächentempe- raturen weisen generell eine gute Korrelation zu den Beobachtungen auf, haben aber gleich- zeitig einen deutlichen Kältebias. Dadurch können auch atmosphärische Prozesse be- einflusst werden, die dann möglicherweise nicht korrekt dargestellt sind. Dies muss in der nachfolgenden Diskussion berücksich- tigt werden. Die gekoppelte Simulation folgt dem Ensemblemittel der globalen CMIP5- Klimasimulationen besser und berücksichtigt interaktiv die Atmosphäre-Randmeerwech- selwirkung. Daher ist für eine konsistente Klimaprojektion die gekoppelte Simulation, angetrieben durch globale Klimaprojek- tion, besser geeignet als eine ungekoppelte Simulation. Ebenfalls verfeinert wurde die Reanalyse des 20sten Jahrhunderts ERA-20C (POLI et al., 2016). Im Text werden auch wei- tere Reanalyseprodukte wie beispielsweise ERA5 (verfügbar ab dem Jahr 1950 mit einer Gitterdistanz von 30 km; HERBACH et al., 2020) verwendet.

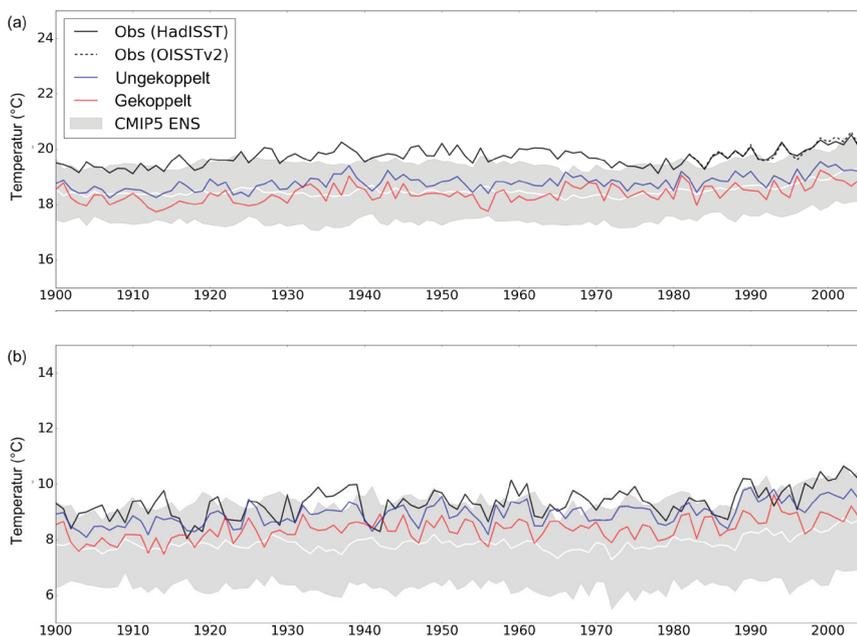


Abbildung 1

Jährliche Mittelwerte der Meeresoberflächentemperatur von 1900 bis 2005 über den Rand- meeren, (a) Mittelmeer und (b) Nord- und Ostsee, in der gekoppelten Simulation des 20. Jahrhunderts (Gekoppelt) im Vergleich zu Beobachtungen (HadISST und OISSTv2), mit einer rein atmosphärischen CCLM-Simulation (Ungekoppelt, mit interpolierten Reanalysetemperaturen) und mit einem Ensemble von Meeresoberflächentemperaturen aus globalen CMIP5 Klimasim- ulationen (CMIP5-ENS). Angepasst aus PRIMO et al. (2019).

Sea surface temperature annual means over the marginal seas, (a) Mediterranean Sea and (b) Baltic and North Sea, in our 20th century coupled simulation (Gekoppelt) between 1900 and 2005 com- pared to observations (HadISST and OISSTv2), to the atmosphere-only CCLM simulation (Ungekop- pelt, interpolated reanalysis temperatures), and an ensemble mean (white line) and spread (shaded area) from CMIP5 global climate simulations. Adapted from PRIMO et al. (2019).

Um mögliche künftige Veränderungen bei Hochwasserereignissen zu untersuchen, wurden zwei globale Simulationen des globalen Klimamodells EC-Earth regional verfeinert. Diese EC-Earth-Simulationen ent- standen im Rahmen des "Coupled Model Inter- comparison Projects" CMIP (Phasen 5 und 6) mit den jeweils aktuellen Modellversionen EC-Earth2 und EC-Earth3 bei Verwendung

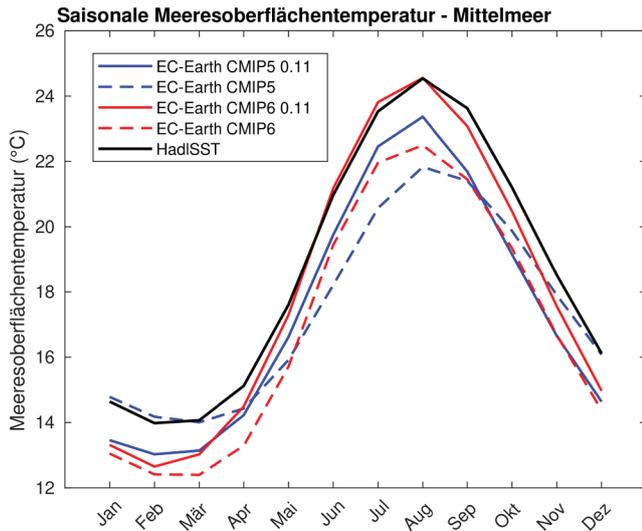


Abbildung 2
Mittlerer Jahresgang der Meeresoberflächentemperatur im Mittelmeerraum unter Verwendung der EC-Earth2- und EC-Earth3-Simulationen im Zeitraum 1950 bis 2005 mit und ohne Verfeinerung (mit/ohne "0.11" in Legende). Als Referenz dient der Beobachtungsdatensatz HadISST. *Seasonal cycle of sea surface temperature in the Mediterranean using EC-Earth2 and EC-Earth3 simulations for the period 1950 to 2005 with and without downscaling (named with/without "0.11"). The observational reference dataset is HadISST.*

der wärmeren Zukunftsszenarien (RCP8.5 bzw. SSP5-8.5). Die entsprechenden Simulationen werden im folgenden EC-Earth2 bzw. EC-Earth3 genannt. Die regionale Verfeinerung wurde für den Zeitraum 1950 bis 2100 mit dem regionalen Klimamodellsystem CCLM-NEMO durchgeführt. Die Abbildung 2 zeigt den Jahresgang der Meeresoberflächentemperatur im Mittelmeer vor und nach Verfeinerung im Vergleich zu Beobachtungen. Die Abbildung veranschaulicht, wie der Simulationsfehler durch regionale Verfeinerung verringert wird. Vor allem in für Vb-Hochwasser wichtigen Sommerhalbjahr führt die Verfeinerung und neue Klimamodellgeneration CMIP6 zu sehr guten Ergebnissen.

3 Vb-Zyklonen

3.1 Feuchtequellregionen

Die von VAN BEBBER (1891) definierte, meridionale Zugbahn von Vb-Zyklonen vom Mittelmeer nach Mitteleuropa legt die Erwartung nahe, dass das Mittelmeer die dominierende Feuchtigkeitsquelle für Vb-Niederschläge darstellt. Höhere Temperaturen im Sommer erhöhen den Gesamtwassergehalt (HOFSTÄTTER & CHIMANI, 2012) und damit den Feuchtetransport in der Atmosphäre. Dies wiederum verringert die atmosphärische Stabilität und begünstigt Hebung und Niederschlag. In diesem Abschnitt werden die für Vb-Ereignisse relevante atmosphärische Feuchtigkeitsaufnahme und die Charakteristika der Feuchtequellregionen – wie etwa Verdunstung und Oberflächentemperatur über dem Mittelmeer, aber auch über der Nord- und Ostsee – behandelt, um die Rolle verschiedener Feuchtequellregionen, insbesondere die des Mittelmeers, bei Niederschlägen während Vb-Zyklonen abzuleiten.

Für die Untersuchung wurde die mit CCLM-NEMO verfeinerte ERA-20C-Reanalyse (POLI et al., 2016) verwendet. Nach

SPRENGER et al. (2017) wurden mittels eines "first guess" Ansatzes Zyklonenzugbahnen verfolgt, um alle, im Mittel etwa 10 pro Jahr, Vb-Ereignisse im Zeitraum 1901 bis 2010 zu identifizieren. Dabei wurden die Zyklonenzentren auf Meeresdruckniveau durch geschlossene Isobaren detektiert und anschließend durch das horizontale Windfeld die Position der Zyklonenzentren des nächsten Zeitschritts prognostiziert. Die Zyklonenzentren, die diesen ersten Prognosen am nächsten lagen, wurden den jeweiligen Zyklonenzugbahnen zugeordnet. Für 16 ausgewählte starke Vb-Ereignisse wurden die Feuchtequellregionen auf der Grundlage einer Lagrange-Analyse mit dem Werkzeug LAGRANTO (SPRENGER & WERNLI, 2015) und einer Feuchtequellendiagnose (SODEMANN et al., 2008) quantifiziert. Die Charakteristika der identifizierten Feuchtequellregionen wurden für alle detektierten Vb-Ereignisse zwischen den Jahren 1901 und 2010 im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf den Niederschlag in den Einzugsgebieten von Donau, Elbe und Oder untersucht.

Abbildung 3 zeigt die durchschnittliche relative Feuchteaufnahme für die 16 ausgewählten Vb-Ereignisse mit Fokus auf den Niederschlag im Einzugsgebiet der Oder. Die Feuchteaufnahme war im Einzugsgebiet und der näheren Umgebung am größten. Insgesamt trug die Feuchteaufnahme über dem europäischen Kontinent zu etwa 60 % des im ausgewählten Flusseinzugsgebiet gefallenen Niederschlags bei (Abb. 4), bei einzelnen Ereignissen sogar bis zu 90 %. Des Weiteren ist auch die Verdunstung in der Ost- und Nordsee relevant. Feuchte aus dem Mittelmeer oder dem Schwarzen Meer trägt weniger zum Einzugsgebietsniederschlag bei.

Hohe Tagesamplituden der Verdunstung zusammen mit positiven Bodenfeuchteanomalien können die Effizienz konvektiver Niederschlagsprozesse verstärken (SCHÄR et al., 1999). Die Abbildung 5a zeigt die gebietsgemittelte Anomalie der Spanne

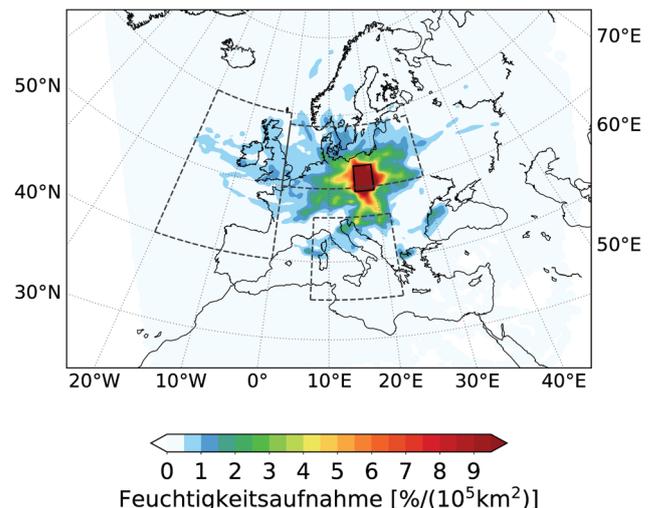


Abbildung 3
Feuchteaufnahme für Niederschlag im Odereinzugsgebiet (genauer: in der mit durchgehender Linie gerahmten Box) gemittelt über die ausgewählten Vb-Ereignisse (in %/105 km²). Angepasst aus KRUG et al. (2022). *Moisture uptake for precipitation in Odra catchment (in the solid frame) averaged over the selected Vb-events (in %/105 km²). Adapted from KRUG et al. (2022).*

der täglichen Verdunstung ($E_{\max} - E_{\min}$) während aller Vb-Ereignisse im Zeitraum von 1901 bis 2010 in den jeweiligen Flusseinzugsgebieten, geordnet nach der Niederschlagsmenge. Tatsächlich waren die täglichen Verdunstungsspannen bei niederschlagsreichen Vb-Zyklonen am größten und besonders ausgeprägt im Donaeinzugsgebiet. Dies deutet darauf hin, dass Prozesse innerhalb der Flusseinzugsgebiete, wie die Rückkopplung zwischen Bodenfeuchte und konvektivem Regen, eine intensivierende Rolle spielen. Die Abbildung 5b zeigt die täglichen Bodenfeuchteanomalien im Hinblick auf die tägliche Klimatologie in 4 cm bis 10 cm Bodentiefe, gemittelt über die jeweiligen Vb-Ereignisse. Alle Flusseinzugsgebiete zeigen eine Zunahme der Bodenfeuchteanomalien von niederschlagsarmen zu niederschlagsreichen Vb-Zyklonen. Die Feuchte in dieser Bodentiefe reagiert schnell auf Niederschlagsereignisse, trägt aber auch zur Verdunstung während der Ereignisse bei.

3.2 Rolle atmosphärischer Konvektion

Die Intensivierung konvektiver Niederschläge ist im Hinblick auf eine Klimaerwärmung

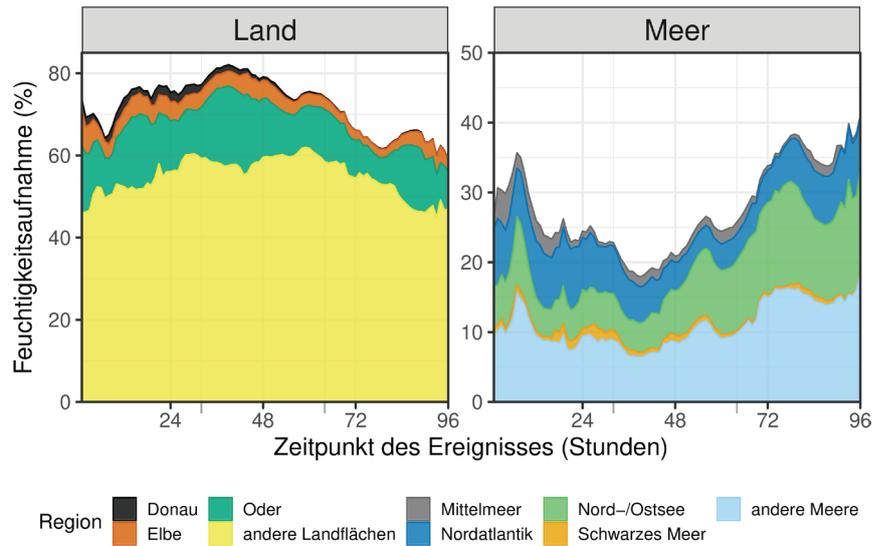


Abbildung 4
 Zeitliche Entwicklung des durchschnittlichen Anteils der Feuchteaufnahme aus verschiedenen Quellen über Land- und Meeresoberflächen während der 16 ausgewählten Vb-Ereignisse im Odereinzugsgebiet. Die mit Mittelmeer, Nord-/Ostsee und Nordatlantik bezeichneten Quellregionen sind in Abb. 3 eingezeichnet. Angepasst aus KRUG et al. (2022).
Time development of average moisture uptake fraction from different sources over land and sea surfaces during the selected Vb-events in the Odra catchment. The source regions named Mittelmeer, Nord-/Ostsee and Nordatlantik are indicated in Fig. 3. Adapted from KRUG et al. (2022).

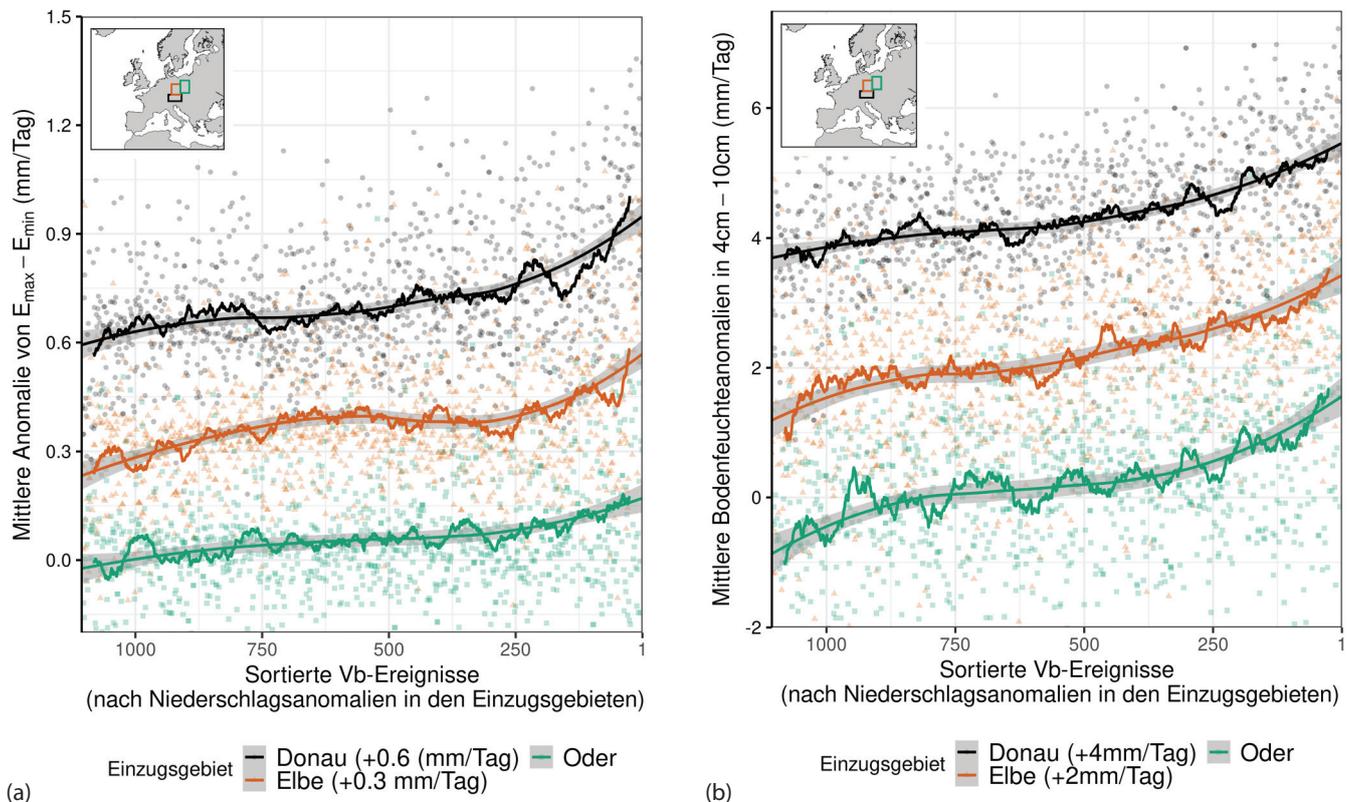


Abbildung 5
 Anomalien der täglichen a) Verdunstungsspanne $E_{\max} - E_{\min}$ und b) Bodenfeuchte während der geordneten Vb-Ereignisse. Die Linien zeigen das gleitende Mittel und die lokale Regression. Zur besseren Lesbarkeit sind die Daten für das Donau- und das Elbeeinzugsgebiet um konstante Werte verschoben. Angepasst aus KRUG et al. (2022).
Anomalies of (a) diurnal evaporation range $E_{\max} - E_{\min}$ and (b) soil moisture during the ranked Vb-events. The lines show the moving average and the local regression. Note, the data for Danube and Elbe catchments are shifted by constant values for improved readability. Adapted from KRUG et al. (2022).

von besonderem Interesse (LENDERINK & VAN MEIJGAARD, 2008; PURR et al., 2019). Mit zunehmenden Temperaturen dominieren konvektive Niederschläge extreme Niederschlagsereignisse (BERG et al., 2013) und dies verstärkt die Niederschlags Spitzen auch während zukünftiger Vb-Ereignisse.

In größeren Klimasimulationen mit einer horizontalen Gitterdistanz von mehr als ca. 4 km ist die hochreichende Konvektion ein Prozess unterhalb der Gitterskala und muss daher parametrisiert werden. PREIN et al. (2015) geben einen Überblick über die Herausforderungen solcher Parametrisierungen, wie z. B. die Unsicherheiten durch unberücksichtigte subgitterskalige Dynamik. In Simulationen mit Modellen einer Gitterdistanz kleiner 4 km, mit sogenannten konvektions-erlaubenden Modellen, können wesentliche konvektive Prozesse explizit und damit besser dargestellt werden (WEISMAN et al., 1997). Derzeit sind die konvektionserlaubenden Simulationen für lange Klimaprojektionen noch sehr rechenaufwendig. Daher wurde eine diagnostische Methode nach POUJOL et al. (2019), die den konvektiven Anteil des Niederschlags mit den Variablen Vortizität und Hebung abschätzt, mithilfe von Referenzsimulationen nach BRISSON et al. (2018) und PURR et al. (2019) evaluiert und auf die hier verwendeten hochauflösenden, aber noch konvektions-parametrisierende Klimasimulationen angewendet (HAMOUDA et al., 2023).

Die Abbildung 6 zeigt nun die mit dem gekoppelten Modell CCLM-NEMO für die Vergangenheit und Zukunft berechnete Häufigkeitsverteilung konvektiver Niederschlagsanteile während Vb-Ereignissen im Sommerhalbjahr. Für die Gegenwart zeigen die Häufigkeitsverteilungen sowohl in der mit einer Reanalyse als auch mit einer globalen Klimasimulation getriebenen CCLM-NEMO-Simulationen eine maximale Häufigkeit des konvektiven Anteils bei knapp 20 %. In der Zukunftsprojektion wird der statistische Anteil konvektiven Niederschlags bei Vb-Ereignissen deutlich größer. Damit werden die lokalen Niederschlags Spitzen im zukünftigen Klima intensiver.

3.3 Synoptische Situation während Vb-Ereignissen

Die Diskussion von HOFSTÄTTER & BLÖSCHL (2019) zeigt, dass die Annäherung der polaren und der subtropischen Strahlströme über dem westlichen Mittelmeerraum das Hauptmerkmal für das Auslösen von Vb-Zyklonen ist. Dies geht häufig einher mit synchronen negativen Phasen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und der Arktischen Oszillation (AO). In diesem Kapitel wird dies mit einem anderen Ansatz erneut untersucht, um den Einfluss verschiedener synoptischer Ausgangslagen für Vb-Zyklonen und die entsprechende Niederschlagsverteilung zu untersuchen. Mithilfe der hierarchischen Clustering-Technik wurden die mittleren Druckanomalien auf Meeresspiegelniveau während aller Vb-Ereignisse im Zeitraum von 1950 bis 2022 in der ERA5-Reanalyse betrachtet. Das Clustering liefert typische synoptische Muster, die mit Vb-Ereignissen verbunden sind.

Abbildung 7a zeigt, dass sich ebenfalls ein Druckmuster herauskristallisiert (Muster 1), welches durch eine positive Phase der NAO beschrieben werden kann. Dieses Muster wurde bei 25 % der Gesamtzahl der Ereignisse (243) in den Monaten Mai bis September gefunden. Die Anwesenheit einer blockierenden Wetterlage (stationäre Hochdruckanomalie, die mehrere Tage anhält) über Osteuropa ermöglicht eine Trogbildung, sodass die Zyklonen über das Mittelmeer und dann nach Norden über Mitteleuropa ziehen. Das zweite Muster in Abbildung 7b zeigt eine

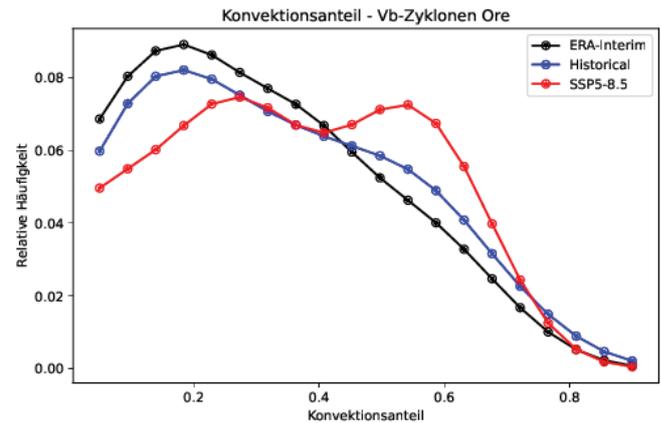


Abbildung 6

Relative Zyklonenhäufigkeit als Funktion des Konvektionsanteils bei Vb-Zyklonen im rezenten Klima und wärmeren Klimaszenario SSP5-8.5 im Erzgebirge. Eine CCLM-NEMO-Simulation, angetrieben durch eine Reanalyse (hier ERA-Interim) im Zeitraum 1979 bis 2014, ist die Referenz. Eine durch das globale CMIP6-Klimamodell EC-Earth3 angetriebene Simulation ergibt eine historische Projektion (CMIP6 Hist., 1950–2014) und eine Zukunftsprojektion (CMIP6 SSP5-8.5, 2015–2099) des Klimas. *Relative frequency as a function of convection fraction during Vb-cyclones in current climate and a warmer climate scenario under SSP5-8.5 in the Ore region. A CCLM-NEMO simulation driven by reanalysis (here ERA-Interim) in the period 1979 to 2014 provides the reference. A simulation driven by the global CMIP6 climate model EC-Earth3 provides a historical (CMIP6 Hist., 1950–2014) and future (CMIP6 SSP5-8.5, 2015–2099) climate projection.*

blockierende Wetterlage über Grönland, ursprünglich in einer negativen NAO-Phase, deren Muster sich durch die Ausbreitung der Vb-Zyklonen westwärts über das Mittelmeer veränderte. Die entsprechenden Niederschlagsmuster in Abbildung 7 zeigen, dass das Druckmuster 1 potenziell mit stärkeren Niederschlägen über Mitteleuropa verknüpft ist als Druckmuster 2.

In beiden typischen Druckkonstellationen sind blockierende Wetterlagen bedeutend. Diese verstärken die Auswirkungen der dadurch langsamer ziehenden Vb-Zyklonen. Dies kann zu noch stärkeren Niederschlägen und damit zu Überschwemmungen führen. Daher wurde die Häufigkeit blockierender Wetterlagen im Zusammenhang mit Vb-Ereignissen, wie in Abbildung 8 dargestellt, berechnet. Erhöhte Häufigkeiten (im Vergleich zur Klimatologie) von Blockierung der Strömung sind im östlichen Europa und in Skandinavien sowie im Nordwestlichen Atlantik zu finden. Eine Untersuchung (R. Lohmann, Goethe Universität, priv. Mitteilung) der CMIP6-Zukunftsprojektionen bzgl. Blockierung zeigt eine sehr große Streuung in den Trends der einzelnen CMIP6-Modelle und bedarf weiterer Untersuchungen.

4 Regen-auf-Schnee-Ereignisse

In diesem Kapitel werden die gebietsübergreifenden Hochwasser-Ereignisse durch Regen-auf-Schnee (rain-on-snow, ROS) behandelt. Für die Untersuchung dieser Hochwasser wurden sowohl meteorologische als auch hydrologische Daten verwendet. Mithilfe hydrologischer Daten des Global Runoff Data Centre (GRDC; <http://grdc.bafg.de>) und der Hochwasserklassifikation von FISCHER & SCHUMANN (2018) (entwickelt im SPATE-Teilprojekt SP1) wurden historische ROS-Hochwasserereignisse für den Zeitraum von 1920 bis 2010 identifiziert. In einem weiteren Schritt wurden die synoptischen Bedingungen vor und während

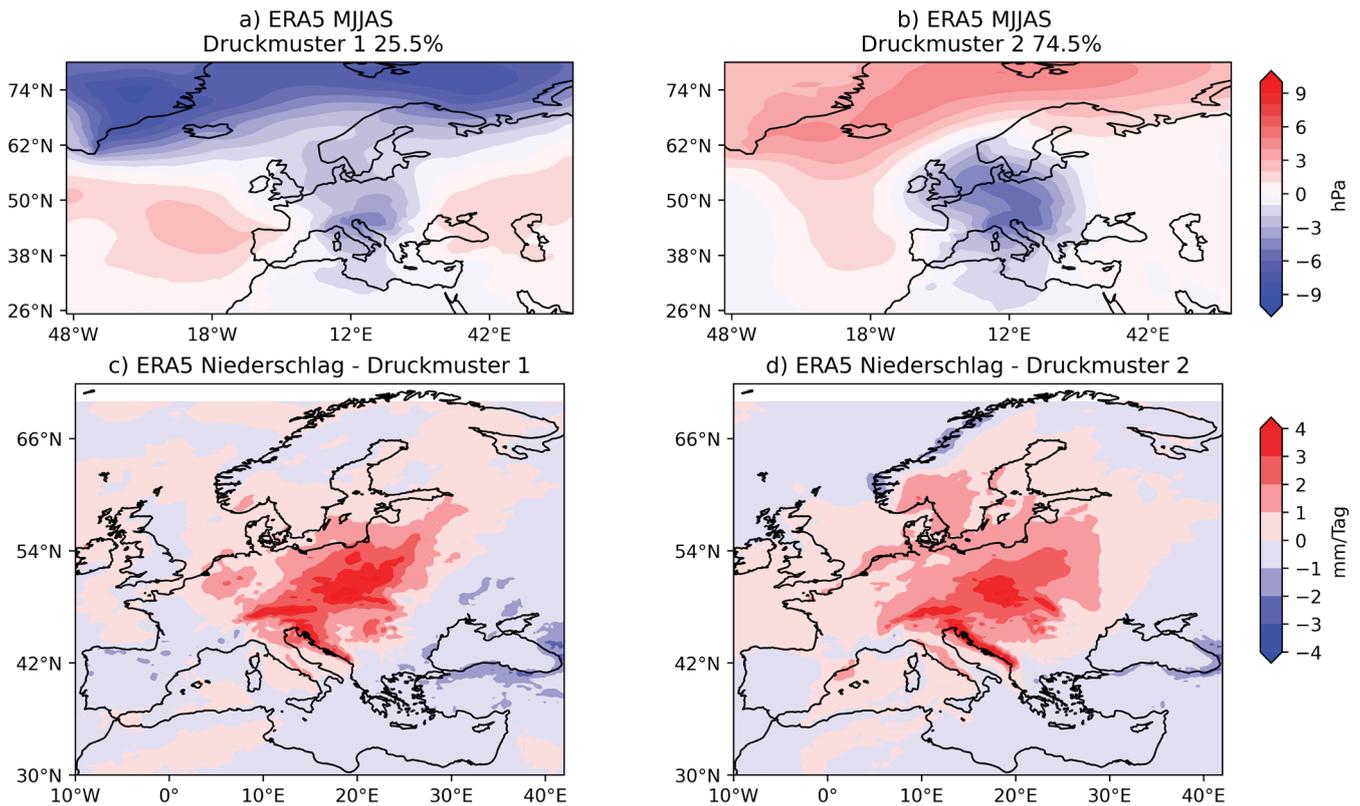


Abbildung 7

Typische synoptische Druckmuster (a, b), die zu Vb-Ereignissen zwischen Mai und September von 1950 bis 2022 führen, und entsprechende mittlere Niederschlagsverteilungen (c, d).

Typical synoptic mean sea level pressure patterns (a, b) yielding Vb-events between May to September from 1950 till 2022, and the associated precipitation patterns (c, d).

dieser Ereignisse analysiert. Dazu wurden zwei meteorologische Datenquellen für Niederschlag und Schneebedeckungen verwendet. Eine Datenquelle, bestehend aus Stationsdaten ab dem Jahr 1781, wurde vom Climate Data Center, mit der Datenversion 005 (2017), des Deutschen Wetterdienstes bereitgestellt. Aufgrund räumlicher und zeitlicher Inhomogenität der Stationen wurde zusätzlich die Reanalyse des 20. Jahrhunderts (ERA-20C) des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) dynamisch verfeinert (Kap. 2).

Damit die Klimatologie von ROS-Hochwassern auch robust aus Klimaprojektionen, d. h. allein mit meteorologischen Daten ohne hydrologische Information, abgeleitet werden kann, wurde ein atmosphärischer Proxy (AP) entwickelt. Dieser berechnet für jeden Tag der Zeitreihe für Schneeschmelze und Niederschlag separat Rangfolgen. Dazu werden die Daten zur Schneeschmelze für 5 Tage und Niederschlagsdaten für 14 Tage vor dem jeweiligen Tag akkumuliert. Schließlich werden beide Ränge für jeden Tag zu einer kombinierten Rangserie addiert. Der Rang eines Tages in dieser kombinierten Rangserie ist der Wert des Proxy AP. Der AP erlaubt entsprechend die Identifikation der Tage mit stärksten ROS-Ereignissen. Für die Untersuchung potenzieller Klimatreiber, d. h. potenzieller großskaliger Klimaregime mit Einfluss auf ROS-Häufigkeiten und Intensitäten, wurden auf Basis von ERA-20C die Indizes der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und des Ostatlantischen (EA) und Skandinavischen Druckmusters (SCA) berechnet. Für eine Untersuchung der ROS-Hochwas-

serereignisse in einem zukünftigen Klima, wurden die in Kapitel 2 genannten CMIP6 EC-Earth3 getriebenen Klimasimulationen mit dem AP ausgewertet.

4.1 Großräumige einzugsgebietsübergreifende Hochwasserereignisse seit 1920

Um den Fokus auf die stärksten Ereignisse zu legen, wurden Kriterien zur Klassifizierung der Ereignisse festgelegt. Neben einer Einteilung nach betroffener Fläche innerhalb eines einzelnen Einzugsgebiets (Anteile von Donau, Elbe, Rhein und Weser innerhalb Deutschlands), wurde vorausgesetzt, dass in mindestens drei der vier Einzugsgebiete eine mittlere Ausbreitung oder in zwei Einzugsgebieten eine große bis sehr große Ausbreitung vorlag. Diese Einteilung wurde mithilfe einer Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeit p der Höchstdurchflüsse für kleine ($p \geq 0,5$), mittlere ($p \geq 0,8$), große ($p \geq 0,933$) und sehr große ($p \geq 0,966$) Hochwasser gemäß FISCHER & SCHUHMAN (2018) durchgeführt. Für den Zeitraum von 1920 bis 2010 wurden auf diese Weise zwölf gebietsübergreifende Hochwasser gefunden. Die seit 1950 gefundenen Ereignisse sind ebenfalls in UHLEMANN et al. (2010) und GVOZDIKOVA & MÜLLER (2017) unter den flächenmäßig am stärksten ausgebreiteten Hochwassern verzeichnet. Alle Hochwasser fanden in den Monaten von November bis April statt.

4.2 Synoptische Situation

Für jedes der zwölf betrachteten Hochwasser wurden die synoptischen Bedingungen vor und während des Auftretens unter-

Blocking-Frequenz während der 100 Stärksten Vb-Ereignisse (ERA-20C, 1901-2010)

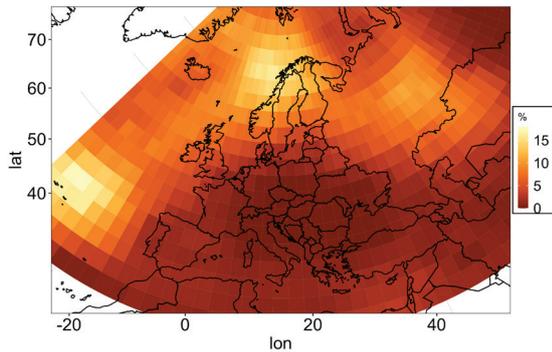


Abbildung 8

Häufigkeit blockierter Wettertage pro Jahr bei Vb-Ereignissen in der ERA20C-Reanalyse im Zeitraum von 1901 bis 2010. *Blocking frequency associated with Vb-events in the ERA20C reanalysis from 1901 till 2010.*

sucht. Abbildung 9 zeigt exemplarisch das Hochwasserereignis Januar/Februar 1995 für die Stationsdaten und die Simulation. Die Abbildung 9 zeigt, dass etwa zwei bis drei Wochen vor Ein-

setzen des Hochwasserereignisses eine ausgeprägte Schneedecke vorhanden war. Mit steigenden Temperaturen schmolz diese Schneedecke. Zusätzlich einsetzender Regen wenige Tage vor den Pegelhöchstständen verstärkte das Schmelzen der Schneedecke und brachte zusätzlichen Wasserabfluss, was zu einem überregionalen Hochwasser führte. In der Simulation werden die Schneehöhen insgesamt unterschätzt. Die Schneeschmelze findet schneller statt. Auch der Niederschlag ist niedriger als in den Stationsdaten. Ein Teil dieser Abweichungen lassen sich dadurch begründen, dass für das Modellergebnis alle verfügbaren Gitterpunkte über Deutschland verwendet wurden, während es bei Beobachtungsdaten nur einzelne Stationen waren. Diese Stationen waren zusätzlich nicht gleichmäßig über alle Höhenlagen verteilt. Für elf der zwölf Ereignisse wurden in den Beobachtungsdaten ähnliche Schnee- und Regenbedingungen gefunden. Das gleichzeitige Zusammentreffen von Regen und Schneeschmelze führt zu dem Schluss, dass der Großteil der großflächigen Hochwasser durch ROS-Ereignisse ausgelöst wurde. In einem Fall wurde das Hochwasser durch langanhaltenden Regen ausgelöst und entsprach somit keinem ROS-Ereignis. Für alle zwölf Ereignisse stimmen die zeitlichen Abläufe der Stationsdaten generell gut mit der Simulation überein, allerdings werden die Schneehöhen generell unterschätzt.

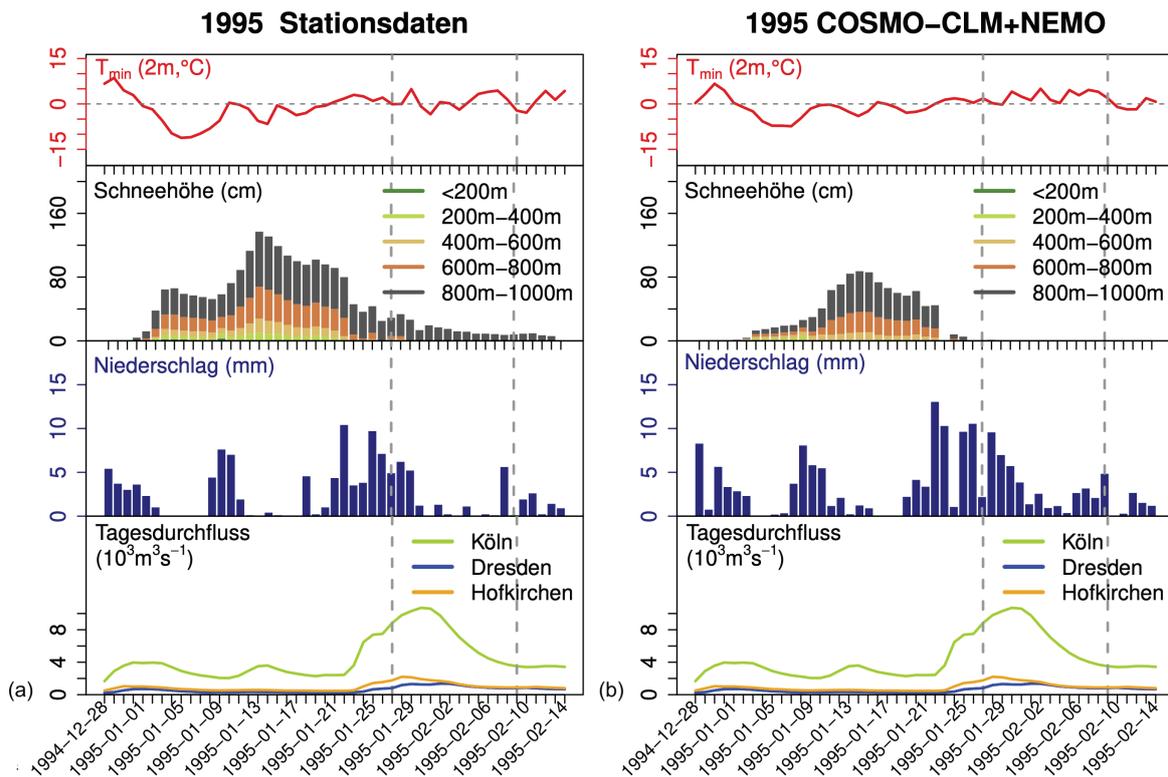


Abbildung 9

Zeitliche Entwicklung des Hochwassers im Januar/Februar 1995 und die entsprechende Dynamik (a) der Stationsdaten und (b) der verfeinerten ERA-20C-Reanalyse. Die ersten drei Abschnitte zeigen die Median-2m-Temperatur, die Medianschneehöhen in verschiedenen Höhenlagen und den Medianniederschlag für das gesamte untersuchte Gebiet. Die vierten Abschnitte in a) und b) zeigen die täglichen beobachteten Durchflüsse an Flussmessstationen in Köln (Rhein), Dresden (Elbe) und Hofkirchen (Donau). Die grau gestrichelten Linien markieren das Hochwasser. Angepasst aus KRUG et al. (2020b).

Temporal evolution of the trans-basin flood in January/February 1995 based on (a) station-based measurements and (b) with COSMO-CLM+NEMO dynamically downscaled ERA-20C reanalysis data. The first three panels show the median 2 m minimum temperature, the median snow-heights at different altitude ranges, and the median total precipitation respectively for the entire domain. The fourth panels in (a) and (b) show the daily observed discharges at measurement sites in Cologne (Rhine), Dresden (Elbe), and Hofkirchen (Danube). The grey dashed lines mark the flood event. Adapted from KRUG et al. (2020b).

4.3 Identifikation mit meteorologischen Daten

Auf Basis der typischen synoptischen Situation die am Anfang des Kapitels erwähnten 5 und 14 Tage für Niederschlag und Schneeschmelze als Akkumulationszeiträume für den atmosphärischen Proxy AP eingestellt. Kleine Änderungen der Zeiträume beeinflussen die Ergebnisse kaum. Basierend auf Klimastationsdaten des Deutschen Wetterdienstes wurden, unter der Verwendung der 50 Tage mit der höchsten Rangfolge, 15 Ereignisse mit dem AP identifiziert. Von diesen 15 Ereignissen sind 11 in den Top 25 Hochwassern von UHLEMANN et al. (2010) verzeichnet. Die übrigen vier Ereignisse entsprechen zwar ebenfalls Hochwasserereignissen, konnten allerdings die Kriterien der räumlichen Ausdehnung nicht erfüllen. Mit der verfeinerten Reanalyse werden einige Ereignisse gefunden, die bei den hydrologischen Stationsdaten nicht auftreten. Davon zählen zwei Ereignisse nicht als Hochwasser. Die übrigen Ereignisse sind, wie schon zuvor erwähnt, Hochwasser mit einer zu kleinen räumlichen Ausdehnung. Diese zusätzlichen Ereignisse wurden hauptsächlich durch eine Überschätzung von Schneeschmelze und Niederschlag an diesen Tagen in der Simulation verursacht. Die zeitliche Übereinstimmung von Stationsdaten und Simulation war allerdings sehr gut. Die gefundenen Ereignisse und die Ereignisse nach UHLEMANN et al. (2010) sind in Abbildung 10 dargestellt. Es ist zu beachten, dass an dieser Stelle aufgrund der verwendeten Diagnostikmethode keine eindeutige Unterscheidung zwischen schneeschnmelz- oder niederschlagsdominierten Ereignissen gemacht wird, sodass sich die ROS-Hochwasserdefinition unter Umständen mit der Definition von Schneeschmelzhochwassern mit Niederschlag vermischt.

4.4 Klimavariabilität

Die ROS-Hochwasserereignisse zeigen eine Häufung in den 1940er und 1980er Jahren. Sollte diese Häufung durch zyklische

Klimavariabilität verursacht sein, könnte eine Vorhersage hochwasserreicher und -armer Perioden, bezogen auf ROS-Ereignisse, möglich sein, sofern die Klimavariabilität und deren Treiber identifiziert und prognostiziert werden können. Als mögliche zyklische Treiber wurden die Nordatlantischen Oszillation (NAO) und das Skandinavischen Druckmusters (SCA) untersucht. Für Januar korreliert der NAO-Index hierbei mit einem Spearman-Korrelationskoeffizienten ρ von -0.56 ($p < 0.01$) mit den monatlichen Medianschneehöhen. Der SCA-Index korreliert mit einem ρ von -0.69 ($p < 0.01$) mit dem Gesamtniederschlag. Mit dem NAO-Index allein können die Perioden nicht erklärt werden, auch, weil die NAO vom EA und SCA beeinflusst wird (MOORE et al., 2013; COMAS-BRU & MCDERMOTT, 2014). Da die ROS-Hochwasser vom gemeinsamen Auftreten von Regen und Schneeschmelze abhängen und der SCA-Index negativ mit dem Niederschlag korreliert, wurde ein kombinierter Index $0.5 \cdot (NAO + SCA)$ verwendet (Abb. 11). Bis auf die späten 1940er Jahre und einzelne weitere Ausnahmen stimmen die hochwasserreichen und -armen Perioden gut mit der negativen Phase des kombinierten Index überein.

4.5 CMIP6-Projektion

Mit der gleichen Methode wie auch schon für den verfeinerten Reanalysedatensatz wurden auch ROS-Hochwasserereignisse identifiziert für die in Kapitel 2 beschriebenen verfeinerten CMIP6-Simulation mit EC-Earth3, um deren Häufigkeit und Intensität in einem zukünftigen Klima zu untersuchen. Für die 110 Jahre lange Reanalyse-basierte Zeitreihe wurden in Kapitel 4.2 die 120 Tage mit den höchsten AP-Rängen und damit ROS-Hochwasserereignisse abgeleitet. Für die CMIP6-Simulation wurde die Anzahl der untersuchten Tage entsprechend der Länge der jeweiligen Zeitreihe angepasst. Für die historische Klimasimulation wurden demnach 71 Tage (für 65 Jahre) und

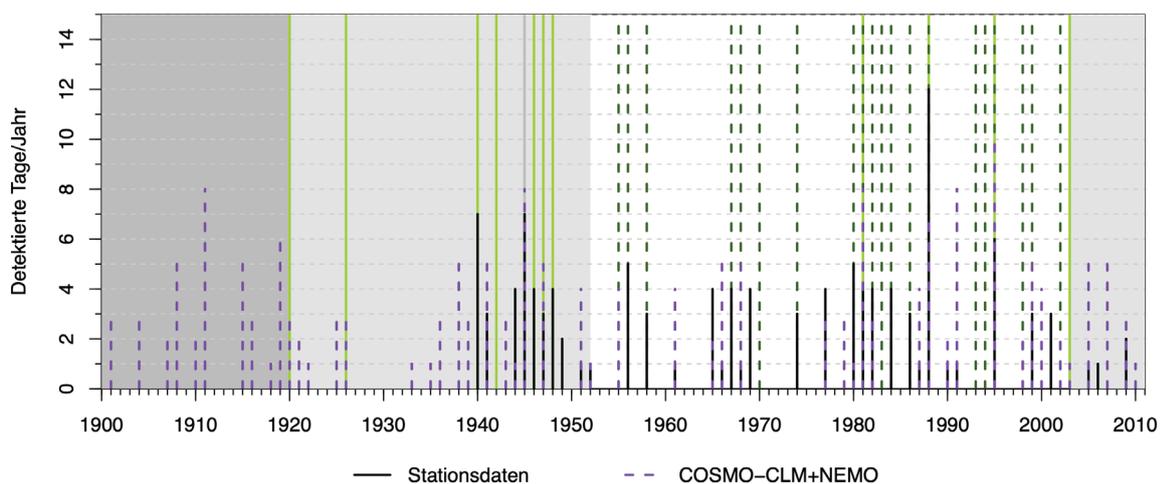
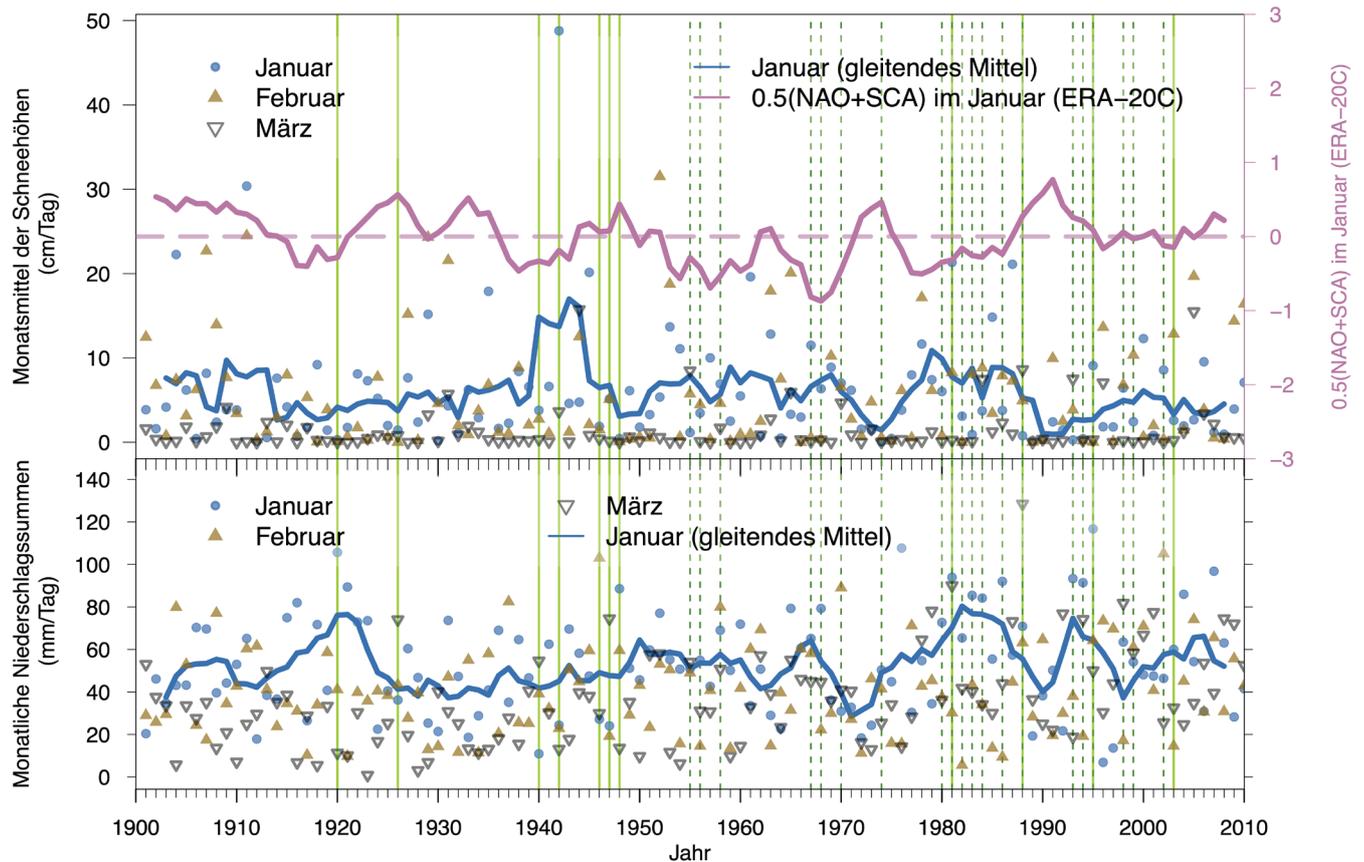


Abbildung 10

Die hellgrünen Balken markieren die gemäß der Methode von FISCHER und SCHUHMAN (2018) detektierten Ereignisse. Die dunkelgrün gestrichelten Balken zeigen die Winterhochwasser, welche unter den 25 schwersten gebietsübergreifenden Hochwassern in UHLEMANN et al. (2010) verzeichnet sind. Die schwarzen Linien zeigen die 120 Tage mit dem höchsten Rang des atmosphärischen Proxys AP basierend auf den Stationsmessdaten (mit der Schneehöhe in 600–800 m Höhe). Die magenta gestrichelten Linien zeigen die entsprechenden Ergebnisse basierend auf der verfeinerten Reanalyse. Die Zeitabschnitte, die von der hydrologischen Hochwasserklassifikation ausgeschlossen wurden, sind grau schattiert. Angepasst aus KRUG et al. (2020b).

Lightgreen bars mark the flood events in Table 1. Dark-green dashed lines mark the winter floods which are among the 25 most severe trans-basin floods in UHLEMANN et al. (2010). Black lines show the number of detected 120 days with highest rank of our atmospheric proxy AP, based on station measurements (snow height at 600–800 m). The magenta lines show the corresponding results based on our downscaled reanalysis. The time periods which were excluded from the hydrological flood classification are grey-shaded. Adapted from KRUG et al. (2020b).

**Abbildung 11**

Monatsmittel der Medianschneehöhen (cm/d) in 600 m bis 800 m Höhe und Monatssummen des Mediansgesamt-niederschlags (mm/d) in der verfeinerten Reanalyse für Januar, Februar und März. Der kombinierte NAO+SCA-Index für Januar ist in magenta dargestellt. Alle farbigen Linien stellen die entsprechenden gleitenden Fünfjahresmittelwerte dar. Die gebietsübergreifenden Hochwasser sind mit grünen Balken gekennzeichnet. Die gezogenen Linien zeigen die Ereignisse, die mit der Methode von FISCHER und SCHUMANN (2018) gefunden wurden, die gestrichelten Linien die Ereignisse von UHLEMANN et al. (2010). Angepasst aus KRUG et al. (2020b).

Monthly means of the median snow height (cm/day) at 600 m–800 m and monthly sums of median total precipitation (mm/day) in our downscaled reanalysis for January, February, and March, respectively. The combined NAO+SCA index in January is added in purple. All colored lines display the respective five-year centered moving averages. The trans-basin floods are marked with green bars, solid lines are events found with the method of FISCHER and SCHUMANN (2018), dashed green lines are events from UHLEMANN et al. (2010). Adapted from KRUG et al. (2020b).

für die Klimasimulation, die auf dem Szenario SSP5-8.5 basiert, 93 Tage (für 85 Jahre) ausgewertet. Für beide Simulationen wurde jeweils eine separate Rangliste erstellt. Die Häufigkeit des Auftretens eines ROS-Hochwassers war dabei für die historische Zeitperiode leicht größer (1 Ereignis alle 3,4 Jahre) als für die Zukunftsperiode (1 Ereignis alle 3,9 Jahre). Diese ähnliche Häufigkeit ist zu erwarten, da für beide Zeitperioden eine festgelegte Anzahl an Tagen der Rangfolge ausgewertet wurden und aufgrund der Identifikationsmethode ein direkter die Festlegung einer Mindestgrenze der Hochwasserintensitäten nicht möglich war.

Deshalb wurde zusätzlich zur separaten Betrachtung der historischen Periode und der SSP5-8.5 Projektion eine AP-Rangliste für die kombinierte Zeitreihe beider Zeitperioden von 1950 bis 2100 erstellt und die Tage mit den 164 höchsten Rängen ausgewertet. Dabei wurde das Anzahlverhältnis von Ereignissen der historischen Zeitperiode (jetzt 29 Ereignisse) zur SSP5-8.5-Zukunft (jetzt 14 Ereignisse) deutlich in Richtung der historischen Simulation verschoben. Die Häufigkeit des Auftretens eines ROS-Hochwas-

ser ist mit einem Ereignis alle 2,2 Jahre in der historischen Zeitperiode nun deutlich größer als für die Zukunft unter Annahme eines SSP5-8.5 Szenarios (1 Ereignis alle 6,1 Jahre).

Das weist darauf hin, dass die Häufigkeit und mittlere Intensität der Ereignisse im Laufe dieses Jahrhunderts abnehmen. Es treten aber auch zum Ende des 21. Jahrhunderts in der Klimasimulation immer noch extreme Ereignisse mit der Intensität der stärksten Ereignisse der historischen Periode auf. Mögliche Ursachen für die Abnahme der Häufigkeit und mittleren Intensität müssen in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

5 Zusammenfassung

Für die Untersuchung der hochwasserauslösenden und -verstärkenden Prozesse sind hochauflösende atmosphärische Datensätze vonnöten. Diese Datensätze wurden hier mithilfe regionaler Verfeinerung globaler Klimamodellsimulationen und Reanalysen entwickelt und in dieser Studie sowie in weiteren SPATE-Teilprojekten verwendet.

Eine Analyse der Prozesse für Vb-Ereignisse im Sommer und ROS-Ereignisse im Winter führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Eingelagerte konvektive und damit lokal sehr intensive Niederschläge machen ca. 20 bis 30 % des Gesamtniederschlags extremer sommerlicher Überschwemmungsereignisse durch Vb-Zyklonen aus. Dieser konvektive Anteil wird in einem wärmeren Klima zunehmen und Überschwemmungsereignisse verstärken.
- Historische großräumige Regen-auf-Schnee-Hochwasser (rain-on-snow, ROS) zeigen eine multi-dekadische Variabilität, aber keinen Trend. Erste Untersuchungen einer CMIP6-Klimaprojektion zeigen eine deutliche Abnahme der Häufigkeit und der mittleren Intensität dieses Hochwassertyps in einem wärmeren Klima. ROS-Extreme vergleichbarer Intensität wie im 20. Jahrhundert sind aber auch gegen Ende des 21. Jahrhunderts noch in Deutschland zu erwarten.
- Die Qualität der hier nach IPCC verwendeten CMIP6-Klimaprojektion EC-Earth3 ist besser als die der entsprechenden CMIP5-Klimaprojektion EC-Earth2 im Hinblick auf Abbildung der Einflüsse europäischer Randmeere und Untersuchung hydrologischer Extremereignisse. Weitere CMIP6-Projektionen sollten untersucht werden, um die Unsicherheiten der Zukunftsaussagen abschätzen zu können.

Die Bedeutung der europäischen Randmeere und kontinentalen Landmassen wird vor allem im Hinblick auf die hochwasserverstärkenden Prozesse, wie etwa die Feuchtequellen und die Rückkopplung von Bodenfeuchte und konvektivem Niederschlag für Vb-Ereignisse und die Repräsentation der Schneedecken für die ROS-Ereignisse deutlich. Des Weiteren kristallisieren sich großskalige synoptische Muster heraus, die das Auftreten von Vb-Zyklonen begünstigen und die beobachteten hochwasserreichen und -armen Perioden der ROS-Ereignisse teilweise erklären können.

Summary

To study the flood triggering and amplifying processes, high-resolution atmospheric data sets are needed. Here, these data sets were developed using regional downscaling of global climate model simulations and reanalyses, and used here and in further SPATE sub-projects.

An analysis of the processes for Vb-events in summer and ROS-events in winter leads to the following conclusions:

- Embedded convection and thus locally very intense precipitation accounts for about 20-30 % of the total precipitation of extreme summer Vb-cyclone forced flood events. This convective fraction will increase in a warmer climate and intensify flood events.
- Historical large-scale rain-on-snow floods show multi-decadal variability but no trend. Our analysis of one CMIP6 climate projection shows a decrease in frequency and mean intensity of this flood type in a warmer climate. Still ROS-extremes have to be expected also at the end of the 21st century.

- The quality of the applied IPCC CMIP6 climate projections EC-Earth3 is better than that of the corresponding CMIP5 climate projection EC-Earth2 in terms of representing the influences of European marginal seas and examining hydrological extreme events. More CMIP6 projections should be investigated for uncertainty quantification.

The importance of the European marginal seas and continental landmasses is particularly evident with respect to flood amplifying processes, such as moisture sources and the feedback of soil moisture and convective precipitation for Vb-events and the representation of snowpacks for ROS-events. Furthermore, large-scale synoptic patterns that favor the occurrence of Vb-cyclones become more apparent. In addition, they can partially explain the observed ROS-rich and -poor periods.

Datenverfügbarkeit

Zyklonenzugbahnen sind verfügbar in einem frei zugänglichen zenodo-Archiv (<https://doi.org/10.5281/zenodo.4333258>). Die umfangreichen mit dem regionalen Modellsystem verfeinerten Reanalysedaten sind an der Goethe-Universität Frankfurt archiviert und können auf Anfrage beim Bodo Ahrens verfügbar gemacht werden.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Forschungsgruppe FOR 2416 (Space-Time Dynamics of Extreme Floods, SPATE).

Anschrift der Verfasser

Dr. Mostafa Hamouda
 Christian Czakay, MSc.
 Dr. Cristina Primo
 Dr. Amelie Hoff
 Prof. Dr. Bodo Ahrens
 Goethe-Universität Frankfurt
 Institut für Atmosphäre und Umwelt,
 Altenhöferallee 1, 60438 Frankfurt am Main
 Bodo.Ahrens@iauw.uni-frankfurt.de

Literaturverzeichnis

- BERG, P., C. MOSELEY & J.O. HAERTER (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. – *Nature Geoscience* 6, 181–185.
- BLÖSCHL, G., J. HALL, J. PARAJKA, R.A.P. PERDIGÃO, B. MERZ, B. ARHEIMER, G.T. ARONICA, A. BILIBASHI, O. BONACCI, M. BORGA, I. C' ANJEVAC, A. CASTELLARIN, G.B. CHIRICO, P. CLAPS, K. FIALA, N. FROLOVA, L. GORBACHOVA, A. GÜL, J. HANNAFORD, S. HARRIGAN, M. KIREEVA, A. KISS, T.R. KJELDSEN, S. KOHNOVÁ, J.J. KOSKELA, O. LEDVINKA, N. MACDONALD, M. MAVROVAGUIRGINOVA, L. MEDIERO, R. MERZ, P. MOLNAR, A. MONTANARI, C. MURPHY, M. OSUCH, V. OVCHARUK, I. RADEVSKI, M. ROGGER, J.L. SALINAS, E. SAUQUET, M. ŠRAJ, J. SZOLGAY, A. VIGLIONE, E. VOLPI, D. WILSON, K. ZAIMI & N. ŽIVKOVIC' (2017): Changing climate shifts timing of European floods. – *Science* 357, 588–590.
- BRISSEON E., C. BRENDEL, S. HERZOG & B. AHRENS (2018): Lagrangian evaluation of convective shower characteristics in a convection permitting model. - *Met.Z.* 27(1), 59-66. DOI: 10.1127/metz/2017/0817.
- COMAS-BRU, L. & F. MCDERMOTT (2014): Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentieth century NAO-winter climate relationship. – *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 140,354–363. DOI:10.1002/qj.2158.

- DONG, C. & L. MENZEL (2020): Recent snow cover changes over central European low mountain ranges. – *Hydrological Processes*, 34(2), 321–338.
- FISCHER, S. & A. SCHUMANN (2018): A distribution-free ordinal classification of floods based on moments. – *Hydrol. Sci. J.* 63, 1605–1618. DOI:10.1080/02626667.2018.1525614.
- GVOZDIKOVA, B. & M. MÜLLER (2017): Evaluation of extensive floods in western/central Europe. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3715–3725. DOI:10.5194/hess-21-3715-2017.
- HAMOUDA M.E., C. CZAKAY & B. AHRENS (2023): On the role of convective precipitation during Vb-events in present and future climate. In prep.
- HERSBACH, H. et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146:1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
- HOFSTÄTTER, M. & G. BLÖSCHL (2019): Vb Cyclones Synchronized With the Arctic-/North Atlantic Oscillation. – *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124, 3259–3278. DOI: 10.1029/2018JD029420.
- HOFSTÄTTER, M. & B. CHIMANI (2012): Van Bebber's cyclone tracks at 700 hPa in the Eastern Alps for 1961–2002 and their comparison to Circulation Type Classifications. – *Meteorologische Zeitschrift* 21, 459–473.
- HOFSTÄTTER, M., B. CHIMANI, A. LEXER & G. BLÖSCHL (2016): A new classification scheme of European cyclone tracks with relevance to precipitation. – *Water Resour. Res.* 52, 7086–7104. DOI:10.1002/2016WR019146.
- JACOBEIT, J. A. PHILIPP & M. NONNENMACHER (2010): Atmospheric circulation dynamics linked with prominent discharge events in Central Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 51 (5), 946–65. DOI:10.1623/hysj.51.5.946.
- KELEMEN, F.D., C. PRIMO, H. FELDMANN & B. AHRENS (2019): Added Value of Atmosphere–Ocean Coupling in a Century-Long Regional Climate Simulation. – *Atmosphere* 10, 537. DOI: 10.3390/atmos10090537.
- KRUG, A. & B. AHRENS (2018): Analyse des Wasserdampftransports und intensiver Niederschlagsereignisse über dem Mittelmeerraum (WVTMed) – Water vapor transport and extreme precipitation events in the Mediterranean region. – Abschlussbericht DWD-Auftrag 3043989/17-RAD.
- KRUG, A., C. PRIMO, S. FISCHER, A. SCHUMANN & B. AHRENS (2020b): On the temporal variability of widespread rain-on-snow floods. – *Meteorologische Zeitschrift*, 29(2), 147 – 163. DOI: 10.1127/metz/2020/0989.
- KRUG, A., F. AEMESIGGER, M. SPRENGER & B. AHRENS (2022): Moisture sources of heavy precipitation in Central Europe in synoptic situations with Vb-cyclones. *Climate Dynamics*, 1–19.
- LENDERINK, G. & E. VAN MEIJAARD (2008): Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. – *Nature Geoscience* 1, 511–514, DOI: 10.1038/ngeo262.
- LI, D., D.P. LETTENMAIER, S.A. MARGULIS & K. ANDREADIS (2019): The Role of Rain-on-Snow in Flooding Over the Conterminous United States. – *Water Resources Research* 55, 8492–8513. DOI: 10.1029/2019WR024950.
- MESSMER, M., J.J. GÓMEZ-NAVARRO & C.C. RAIBLE (2015): Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. – *Earth System Dynamics* 6, 541–553.
- MOORE, G.W.K., I.A. RENFREW & R.S. PICKART (2013): Multi-decadal Mobility of the North Atlantic Oscillation. – *J. Climate* 26, 2453–2466. DOI:10.1175/JCLI-D-12-00023.1.
- NISSEN, K.M., U. ULBRICH & G.C. LECKEBUSCH (2013): Vb cyclones and associated rainfall extremes over Central Europe under present day and climate change conditions. – *Meteorologische Zeitschrift* 22, 649–660.
- POLI, P., H. HERBACH, D.P. DEE, P. BERRISFORD, A.J. SIMMONS, F. VITART, P. LALOYAUX, D.G.H. TAN, C. PEUBEY, J.N. THÉPAUT, Y. TRÉMOLET, E.V. HÓLM, M. BONAVIDA, L. ISAKSEN & M. FISHER (2016): ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. – *Journal of Climate* 29, 4083–4097.
- PREIN, A.F., W. LANGHANS, G. FOSSER, A. FERRONE, N. BAN, K. GOERGEN, M. KELLER, M. TÖLLE, O. GUTJAHR, F. FESER, E. BRISSON, S. KOLLET, J. SCHMIDL, N.P.M. LIPZIG & R. LEUNG (2015): A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. – *Reviews of Geophysics* 53, 323–361. DOI: 10.1002/2014RG000475.
- PRIMO, C., F.D. KELEMEN, H. FELDMANN, N. AKHTAR & B. AHRENS (2019): A regional atmosphere–ocean climate system model (CCLMv5.0clm7-NEMOv3.3-NEMOv3.6) over Europe including three marginal seas: on its stability and performance. – *Geoscientific Model Development* 12, 5077–5095.
- POUJOL, B., S. SOBOLOWSKI, P.A. MOONEY & S. BERTHOU (2019): physically based precipitation separation algorithm for convection-permitting models over complex topography. *Q J R Meteorol Soc.* 2019. DOI: 10.1002/qj.3706.
- PURR, C., E. BRISSON & B. AHRENS (2019): Convective Shower Characteristics Simulated with the Convection-Permitting Climate Model COSMO-CLM. – *Atmosphere* 10, 810, DOI: 10.3390/atmos10120810.
- ROCKEL, B., A. WILL & A. HENSE (2008): The Regional Climate Model COSMOCLM (CCLM). – *Meteorologische Zeitschrift* 17, 347–348. DOI: 10.1127/0941-2948/2.
- SCHÄR, C., D. LÜTHI, U. BEYERLE & E. HEISE (1999): The Soil–Precipitation Feedback: A Process Study with a Regional Climate Model. – *Journal of Climate* 12, 722–741.
- SODEMANN, H., C. SCHWIERZ & H. WERNLI (2008): Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence. – *Journal of Geophysical Research* 113, D03107.
- SPRENGER, M. & H. WERNLI (2015): The LAGRANTO Lagrangian analysis tool – version 2.0. – *Geoscientific Model Development* 8, 2569–2586.
- SPRENGER, M., G. FRAGKOULIDIS, H. BINDER, M. CROCI-MASPOLI, P. GRAF, C.M. GRAMS, P. KNIPPERTZ, E. MADONNA, S. SCHEMM, B. ŠKERLAK & H. WERNLI (2017): Global climatologies of Eulerian and Lagrangian flow features based on ERA-Interim. – *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- SUI, J. & G. KOEHLER (2001): Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany. *Journal of Hydrology*, 252(1-4), 205–220.
- SUI, M.S.J. (1998): Hochwasserabflüsse aus Regen und Schnee in Mittelgebirgs-Einzugsgebieten am Beispiel von Nordbayern (Doctoral dissertation, Selbstverl.).
- UHMANN, S., A. THIEKEN & B. MERZ (2010): A consistent set of trans-basin floods in Germany between 1952–2002. – *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 1277–1295. DOI:10.5194/hess-14-1277-2010.
- VAN BEBBER, W.J. (1891): Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875–1890. – *Meteorologische Zeitschrift* 8, 361–366.
- VORMOOR, K., D. LAWRENCE, L. SCHLICHTING, D. WILSON & W.K. WONG (2016): Evidence for changes in the magnitude and frequency of observed rainfall vs. snowmelt driven floods in Norway. – *Journal of Hydrology* 538, 33–48. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.066.
- WEISMAN, M.L., W.C. SKAMAROCK & J.B. KLEMP (1997): The Resolution Dependence of Explicitly Modeled Convective Systems. – *Monthly Weather Review* 125, 527–548.