

Abschlussbericht

Vorhaben: „ClimXtreme Verbundprojekt Module C Impacts – Teilprojekt 5: FLOOD – Untersuchung der auslösenden atmosphärischen Situationen von großräumigen Hochwasserereignissen und deren Auswirkungen in Zentraleuropa“

Autoren: Prof. Dr. Bruno Merz, Dr. Sergiy Vorogushyn, Dr. Dung Viet Nguyen
Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam,
Sektion Hydrologie, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

Potsdam, August 2023

Förderkennzeichen: 01LP1903E

Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2020 – 28.02.2023

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01LP1903E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	3
2. Problemstellung und Zielsetzung	4
3. Angewandten Methoden und erzielte Ergebnisse	5
3.1. Ausbau und Validierung der Hochwassermodellkette für Deutschland	5
3.2. Implementierung und Validierung des instationären Wettergenerators	8
3.3. Auswahl und Aufbereitung von Klimamodellprojektionen	10
3.4. Veränderungen der dynamischen und thermodynamischen atmosphärischen Variablen	11
3.5. Simulation und Auswertung von Extremniederschlägen mit dem nicht-stationären Wettergenerator	12
3.6. Simulation und Auswertung von Änderungen in Hochwasserhäufigkeiten	14
4. Schlussfolgerungen und Ausblick	15
5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens	17
6. Weitere Referenzen	18

1. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Extreme, großräumige Flussüberschwemmungen betreffen in der Regel mehr als ein Flusseinzugsgebiet. Obwohl solche einzugsgebietsübergreifenden Hochwasser für die nationale Katastrophenvorsorge und Risikomanagement sowie für die Versicherungswirtschaft von großer Bedeutung sind, ist das Wissen über die Prozesse, die diese Extreme auslösen, deren Auswirkungen und über die Änderungen im künftigen Klima sehr begrenzt bzw. mit großen Unsicherheiten behaftet. Das Hochwasserrisiko, definiert als die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Hochwasserschäden, wird durch Prozesse in der Atmosphäre, in den Einzugsgebieten und Flusssystemen, aber auch durch die betroffenen sozioökonomischen Systeme beeinflusst. Jede Veränderung in diesen Bereichen kann sich auf das Hochwasserrisiko auswirken, was die Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels erschwert.

Der 6. IPCC-Bericht folgert, dass Starkniederschläge in Zentraleuropa im Zuge des Klimawandel in der Vergangenheit zugenommen haben (low confidence) und in Zukunft weiter steigen werden (medium confidence) (IPCC, 2021). Blöschl et al. (2019) zeigten für den Raum Deutschland überwiegend steigende Hochwasserabflüsse. Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer Synthese von mehreren regionalen und globalen Studien zu den vergangenen Hochwassertrends durch Merz et al. (2021). IPCC (2021) weist auf einen Anstieg der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen und, damit verbunden, Hochwassern (medium confidence) für den europäischen Raum hin. Diese Ergebnisse basieren jedoch auf globalen hydrologischen Modellstudien und beim näheren Zoomen auf deutsche Flusseinzugsgebiete zeigt sich ein gemischtes Bild von zu erwartenden Änderungen in extremen Hochwassern und keine Übereinstimmung zwischen verschiedenen Modellen (IPCC, 2022). Die globalen Hochwasseranalysen basieren auf grob aufgelösten und vereinfachten Modellansätzen (Hirabayashi et al., 2013, Alfieri et al., 2017) und stellen die Ergebnisse in einer stark aggregierten Form, z. B. auf der Ebene der einzelnen Staaten, dar (Alfieri et al., 2015).

Es gibt nur wenige deutschlandweite Studien, welche den Einfluss von Klimawandel auf Hochwasserhäufigkeiten und -intensitäten (Huang et al., 2013, 2015) und daraus resultierende Änderungen in direkten ökonomischen Schäden und Gesamtrisiko (Hattermann et al., 2014) untersucht haben. Diese Studien basieren außerdem auf einer begrenzten Auswahl von Klimaszenarien und Modellprojektionen, sodass die Abschätzung von Unsicherheiten und die Variabilität möglicher Änderungen in Hochwasserintensitäten und Impakte stark eingeschränkt bleibt. Die bisher verwendeten Methoden für die Abschätzung von Hochwasseränderungen auf globaler und regionaler Skala (deutschlandsweit) basieren auf der Schätzung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten aus relativ kurzen modellierten Zeitreihen aus den Klimaprojektionen, typischerweise 30 Jahre. Mehrere Realisationen von Klimamodellen und darauf basierenden hydrologischen und hydraulischen Simulationen sowie Schadensabschätzungen sind aufgrund von sehr hohen Rechenzeiten nicht verfügbar. Robuste Abschätzungen von Hochwasserquantilen, insbesondere für extreme Hochwasser, sowie die Abschätzung des Risikos als Integral über die Auswirkungen aller Wiederkehrperioden erfordern jedoch lange Simulationsreihen. Um solche lange Zeitreihen zu generieren, ist die Entwicklung effizienter und robuster Modellansätze notwendig, die die gesamte Impakt-Prozesskette – von auslösenden meteorologischen Extremsituationen, über hydrologische Gebietsreaktion bis hin zu Überflutungen und Schäden – in einer ausreichenden Detailtiefe abbilden. Wird eine solche Modellkette mit langen meteorologischen Zeitreihen angetrieben, generiert

sie zeitlich-kontinuierliche und räumlich-konsistente Zeitreihen von hydrologischen und Risikovariablen, die eine robuste Extremwertstatistik ermöglichen.

In den letzten Jahren gab es einige Versuche, die Prozesse vom auslösenden meteorologischen Ereignis bis zum Schaden in Modellketten darzustellen. Falter et al. (2016) entwickelten die prozessbasierte Modellkaskade Regional Flood Model (RFM) und zeigten, dass räumliche Risikobewertungen auf der Skala großer Einzugsgebiete machbar sind. Sairam et al. (2021) wendeten RFM an, um einen 5.000-jährigen synthetischen Hochwasserereigniskatalog (unter der Annahme eines stationären Klimas) für die fünf großen Einzugsgebiete in Deutschland (Rhein, Donau, Elbe, Ems und Weser) zu simulieren und das Hochwasserrisiko für verschiedene Wirtschaftssektoren (private und kommerzielle Gebäude und Landwirtschaft) abzuschätzen. RFM verwendet einen kontinuierlichen Simulationsansatz, der einen standortübergreifenden, multivariaten Wettergenerator, ein hydrologisches Modell, das heterogene Einzugsgebietsprozesse berücksichtigt, ein gekoppeltes hydrodynamisches 1D-2D-Modell, das Deichüberflutungen und Hinterlandüberschwemmungen simuliert, räumlich explizite sektorale Expositionsdaten und empirische, für Deutschland kalibrierte multivariablen Schadenmodelle umfasst. Dieser Ansatz stellt somit eine vielversprechende Grundlage dar, die Änderungen von Hochwassergefährdung und -risiko auf regionaler Skala, d.h. für große Einzugsgebiete in Deutschland wie Rhein, Donau, Elbe, Weser und Ems, abschätzen zu können und dabei auch die Unsicherheiten durch verschiedene Klimaszenarien und globale Klimamodelle zu berücksichtigen.

2. Problemstellung und Zielsetzung

Robuste Abschätzungen von Änderungen der Hochwasserintensitäten und -häufigkeiten und damit verbundener Impakte in deutschen Einzugsgebieten im Zuge des Klimawandels sind bisher nicht umfassend verfügbar. Sowohl die räumliche Abdeckung, als auch die räumliche Auflösung und der Umfang betrachteter Klimaänderungsszenarien und Klimamodellensembles und die damit verbundene Betrachtung von Unsicherheiten sind ungenügend.

Neuere Studien deuten darauf hin, dass katastrophale Hochwasser oft durch Prozesse verursacht werden, die sich grundlegend von denen nicht katastrophaler Hochwasser unterscheiden, wie z. B. ungewöhnliche, aber wiederkehrende atmosphärische Zirkulationsmuster oder Versagen von Hochwasserschutzanlagen, die hohe Schäden verursachen, da sie sowohl Bürgern als auch Hochwassermanager überraschen (Merz et al., 2021). Für den Umgang mit extremen Hochwasserereignissen und für das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwasserrisiko ist es daher von entscheidender Bedeutung, die Triebkräfte extremer Hochwasser, einschließlich der Auswirkungen und ihrer künftigen Veränderungen, zu verstehen. In Phase I von ClimXtreme soll im Projekt FLOOD soll untersucht werden wie die Änderungen der einzugsgebietsübergreifenden Hochwasser und deren Auswirkungen mit dem Klimawandel unter Berücksichtigung der Klimavariabilität zusammenhängen. Auf der Grundlage dieser Analysen und der damit verbundenen Modellentwicklungen soll FLOOD die Methoden entwickeln und zu einem Arbeitsablauf beitragen, um die Impakte extremer Hochwasserereignisse für verschiedene Klimaentwicklungsszenarien quantifizieren.

3. Angewandten Methoden und erzielte Ergebnisse

3.1. Ausbau und Validierung der Hochwassermodekkette für Deutschland

Im Rahmen des Projektes FLOOD wurde ein Beitrag zur Weiterentwicklung und Validierung des Regionalen Hochwassermodeks Deutschlands (Regional Flood Model – RFM) (Abb. 1) geleistet. Das RFM besteht aus einer Kette von dynamischen stochastisch-deterministischen Modellen, die die gesamte Hochwasserrisikoprozesskette abdecken – von auslösenden meteorologischen Extremwettersituationen, über hydrologische und hydraulische Prozesse in Einzugsgebieten bis hin zum ökonomischen Impakt. Insbesondere wurde der Regionale Wettergenerator (RWG) weiterentwickelt und validiert.

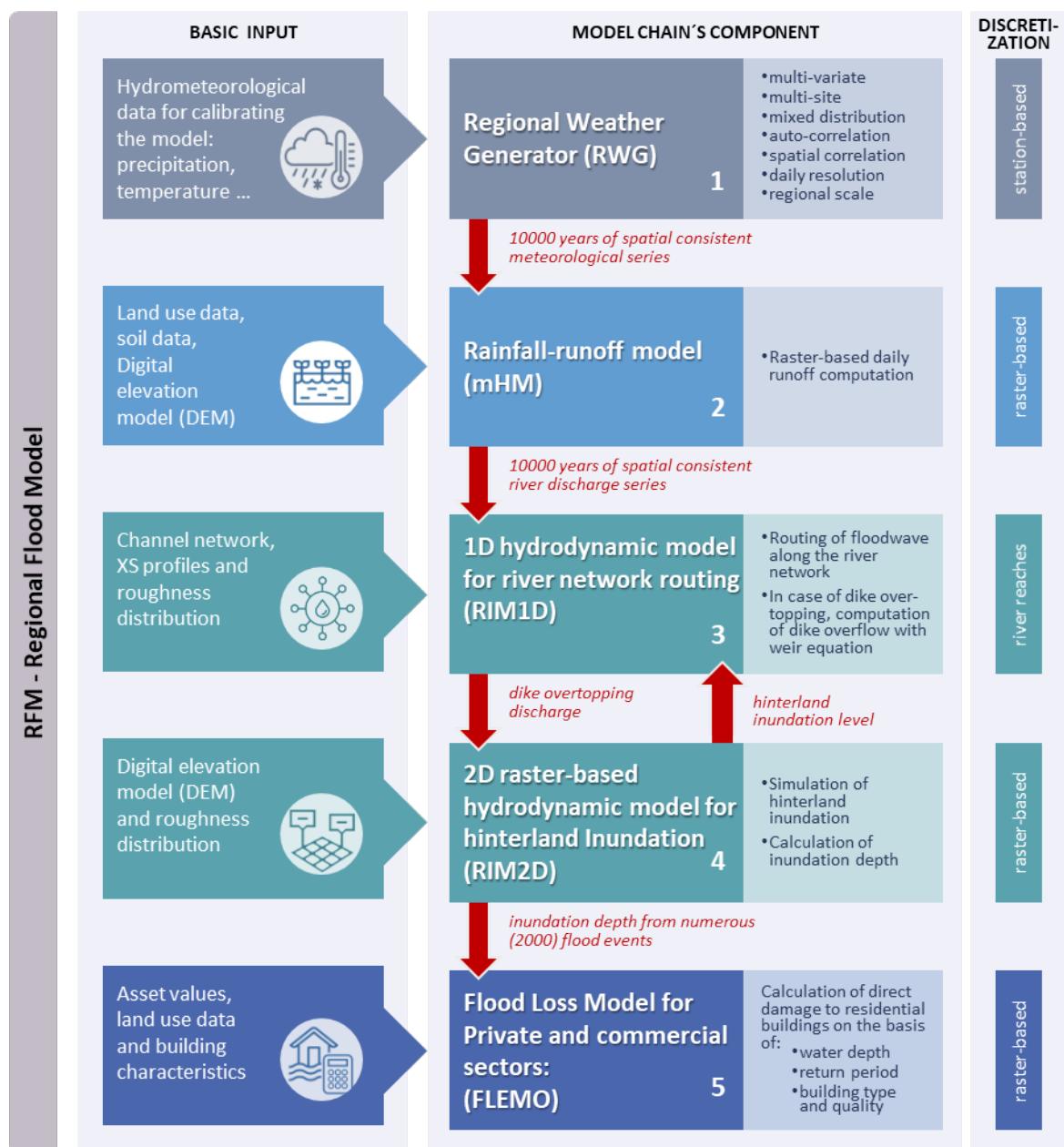


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Regionalen Hochwassermodeks (RFM) mit entsprechenden Modellkomponenten und Eingangsdaten.

Der RWG ist ein multivariates stochastisches Modell für die Generierung beliebig langer, täglicher, synthetischer meteorologischer Zeitreihen wie Niederschlag, Temperatur und Strahlung, unter Berücksichtigung der lokalen Extremwertstatistik und zeitlicher und räumlicher Korrelationen. Im Rahmen vom Projekt FLOOD wurde der RWG in fünf großen deutschen Flusseinzugsgebiete (Rhein, Elbe, Donau, Weser und Ems) aufgesetzt und umfassend anhand gemessener Stationsdaten validiert (Nguyen et al., 2021). Es wurden eine Reihe methodischer Verbesserungen am RWG zur Simulation räumlicher Niederschlagskorrelationen und der Verteilungen von Niederschlag, Temperatur und Strahlung vorgenommen. So wurde zum Beispiel die Verwendung der 3-parametrischen Erweiterten Generalisierten Pareto-Verteilung (Extended Generalized Pareto Distribution) anstatt der bisher verwendeten 6-parametrischen Mischverteilung (Gamma und Generalized Pareto) mit Erfolg getestet und weiterempfohlen (Nguyen et al., 2021). Darüber hinaus wurde der RWG (multi-site autoregressive type model) im Rahmen einer Masterarbeit mit einem KNMI Wettergenerator (resampling type model) verglichen und in Journal of Hydrology veröffentlicht wurden (Ullrich et al., 2021). Die Validierung zeigte, dass der RWG die extremen Niederschlagsereignisse an einzelnen Stationen sehr gut simulieren kann. Die festgestellte Überschätzung des Gebietsniederschlags in Folge der Überschätzung der räumlichen Korrelationen insbesondere bei kleinräumigen, konvektiven Sommerniederschlägen konnte im folgenden Schritt weitestgehend behoben werden.

Das RFM wurde für die erste prozess-basierte, kontinuierliche Hochwasserrisikoabschätzung in Deutschland im aktuellen Klima (1950 – 2003) unter der Annahme der Klimastationarität implementiert (Sairam et al., 2021). Das Projekt FLOOD hat mit der Validierung des Wettergenerators zu dieser Studie beigetragen.

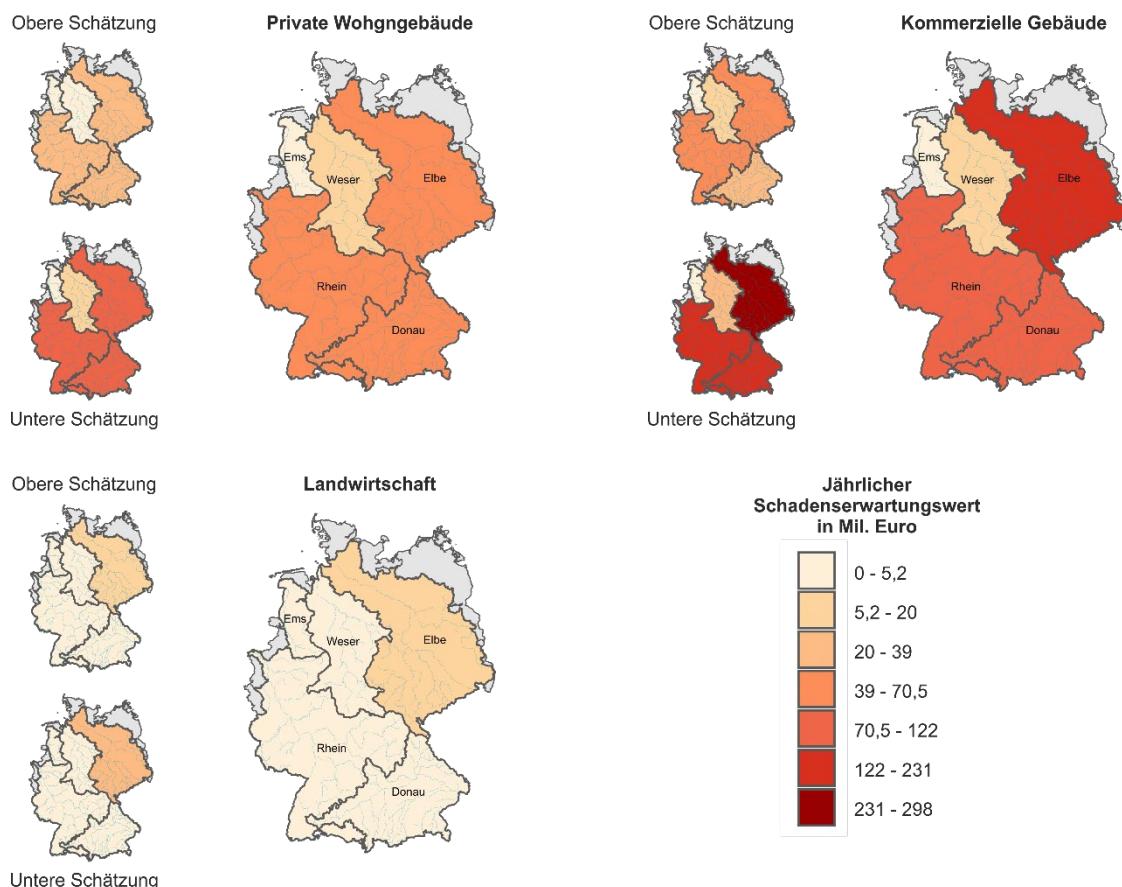


Abbildung 2: Jährliche Schadenserwartungswerte in fünf Einzugsgebieten in Deutschland (Elbe, Rhein, Donau, Weser, Ems), differenziert nach den drei Sektoren: private Wohngebäude und kommerzielle Gebäude sowie Landwirtschaft (nach Sairam et al., 2021). Die unteren und oberen Schätzungen zeigen den 90 %-Unsicherheitsbereich rund um den Median.

Die Ergebnisse zeigten, dass das größte Risiko in Deutschland im kommerziellen Gebäude-sektor besteht (Abb. 2). Während die Schadenserwartungswerte für den privaten Sektor in den drei größten Einzugsgebieten (Elbe, Rhein, Donau) ähnlich sind, stechen die Werte für den kommerziellen und landwirtschaftlichen Sektor im Elbeinzugsgebiet hervor. Die dargestellten Unsicherheiten in den jährlichen Schadenserwartungswerten resultieren aus den Unsicherheiten in der Gefährdungsabschätzung, im Wesentlichen aufgrund von Unsicherheiten in Deichhöhen, aber auch die Unsicherheiten in Expositionswerten und Schadensmodellen wurden berücksichtigt. Details zu dieser Studie sind in Sairam et al. (2021) zu finden.

Im folgenden Entwicklungsschritt wurde das prozess-basierte Niederschlag-Abfluss Modell mHM (Samaniego et al., 2010) in die RFM Modellkette anstelle des bisherigen Modells SWIM integriert und für die deutschen Einzugsgebiete aufgesetzt. Das Modell wurde anhand von 14 Abflusszeitreihen an Pegelstationen kalibriert und anhand von etwa 100 Pegelzeitreihen deutschlandweit erfolgreich validiert. Dabei wurde ein gesonderter Fokus auf die Simulation von Hochwasserabflüssen gelegt. Parallel dazu wurde das 1D hydrodynamische Modell weiterentwickelt und zunächst im Rheineinzugsgebiet anhand von Abfluss- und Wasserstandszeitreihen an mehreren Pegeln kalibriert und validiert (Farrag et al., 2022). Darüber hinaus wurde ein Kopplungsinterface zwischen dem mHM Modell und dem 1D Modell in Python implementiert und dokumentiert. Anstatt der bisher verwendeten Modellierung von 1D hydrodynamischer Wellenfortpflanzung für einzelne Flussabschnitte haben Farrag et al. (2022) einen kontinuierlichen Ansatz für den Wellenablauf im gesamten Flusssystem implementiert. Damit konnte der Effekt von sogenannten hydraulischen Interaktionen auf das Hochwasserrisiko im Rheineinzugsgebiet untersucht werden. Die Studie zeigte, dass das Überströmen von Deichen im Oberlauf zu einer Verringerung des Risikos im Unterlauf beträgt; diese Modellerweiterung liefert also eine realistischere Abbildung des Gesamtrisikos im Einzugsgebiet.

Die neuen, auf Bayes'schen Netzen basierenden Hochwasserschadenmodelle für Privathaushalte und Unternehmen (BN-FLEMOps und BN-FLEMOcs) wurden in die Risikomodellkette RFM integriert. Dieser Beitrag wurde maßgeblich durch die GFZ institutionellen Arbeiten eingebracht. Die Expositionabschätzung für diese beiden Sektoren wurden basierend auf den Ansätzen von Paprotny (2020a, b) verbessert und aktualisiert. Zur Validierung wurden die Schadenschätzungen mit RFM mit den Schadenangaben aus der HANZE-Datenbank für Ereignisse zwischen 1990 und 2003 verglichen. Die Schadenangabe aus der HANZE Datenbank liegt bei vier von fünf Ereignissen innerhalb des Konfidenzintervalls der RFM-Schätzungen.

Abschließend wurde ein Katalog von großräumigen Hochwasserereignissen in Deutschland zusammengestellt. Der Katalog beinhaltet derzeit 76 Ereignisse im Zeitraum von 1954 bis 2013. Für 32 Ereignisse konnten die monetären Schäden und für 28 Ereignisse die Opferzahl ermittelt werden. Die Informationen wurden aus verschiedenen Datenbanken (Münchener Rück, EM-DAT, HANZE) sowie auf Basis eigener Literaturrecherchen zusammengetragen. Für jedes Ereignis wurden insgesamt 12 Indikatoren definiert, die z. B. den hydrologischen

Impakt (Länge des betroffenen Gewässernetzes), den Zustand des Einzugsgebiets vor dem Ereignis (Sättigungszustand) oder die Schwere des Niederschlags beschreiben. Die methodische Grundlage für die Berechnung von Ereignisindikatoren bildet die Publikation von Schröter et al. (2015). Die Indikatoren wurden anhand von gemessenen Klima- und Abflussdaten sowie von atmosphärischen Re-Analysedaten berechnet.

3.2. Implementierung und Validierung des instationären Wettergenerators

Eines der Hauptziele des FLOOD Projektes bestand in der Analyse von Änderungen der Hochwassergefährdung und des Risikos im Zuge des Klimawandels. Eine übliche Auswertung von Klimaprojektionen aus globalen Klimamodellsimulationen mit Hilfe von regionalen Klimamodellen (dynamisches Downscaling) inkl. weiterer statistischer Prozessierung (statistisches Downscaling) von Niederschlag und Temperatur wäre ein rechenintensiver Schritt, der am Ende Zeitreihen von begrenzter Länge liefert. Projektionen von täglichen Niederschlagsintensitäten sowohl in GCMs als auch in RCMs sind bekanntlich mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet als Projektionen von z. B. täglichen Druckvariablen und Temperatur. Darüber hinaus ist die Länge der Zeitreihen aus globalen Klimamodellen (GCMs) begrenzt, typischerweise auf weniger als 100 Jahre. Bei einer transienten Klimasimulation bedeutet es, dass bei einer Betrachtung einer zukünftigen Periode, für die die Annahme der Stationarität getroffen wird, lediglich etwa 30 Jahre an Daten zur Verfügung stehen würden, die für die Auswertung der Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Impakte und Risiken eingesetzt werden. Diese Reihen sind sehr kurz, um die Klima- und Hochwasservariabilität hinreichend zu erfassen und eine robuste Extremwertstatistik zu gewährleisten.

Im Projekt FLOOD wurde ein innovativer Ansatz entwickelt, um die Klimavariabilität in den Klimaprojektionen für zukünftige vom Klimawandel beeinflusste Perioden zu erfassen. Die Idee basiert auf dem Einsatz des Wettergenerators RWG, der für künftige Klimaperioden bzw. Klimazustände konditioniert wird. Dabei wird RWG nicht anhand vom simulierten Niederschlag aus GCM/RCM parametrisiert, weil dieser mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Stattdessen werden Niederschlagsverteilungen an Klimastationen/Gridpunkten (Randverteilungen) als nicht-stationäre Verteilungen an einem künftigen Klimazustand konditioniert. Dabei werden simulierte großräumige Druckfelder und tägliche Temperatur aus GCMs als Indikatoren für dynamische und thermodynamische Änderungen der Atmosphäre genommen. In Kooperation mit dem ClimXtreme Projekt LASLI (FU Berlin, Dr. Katrin Nissen) wurden verschiedene Klassifikationen von atmosphärischen Zirkulationsmustern basierend auf simulierten Druckvariablen (mittlerer Druck auf Meeresspiegelniveau) aus dem ERA5 Re-Analyse-Datensatz mit der Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ abgeleitet. Dabei wurde der etablierte Algorithmus für objektive Klassifikationen SANDRA (Philipp et al., 2016) verwendet. Abb. 3 zeigt die räumlichen Domänen, für die (1) die Zirkulationsmuster und (2) die mittlere tägliche großräumige Temperatur abgeleitet wurden. Die mittlere tägliche Temperatur für Deutschland wurde aus E-OBS Daten mit der Auflösung $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ berechnet. Diese beiden Variablen wurden als Kovariablen in die Extremwertverteilungen des lokalen Niederschlags und der lokalen Temperatur integriert, indem (1) für die Tage, die einem bestimmten Zirkulationsmuster zugeordnet werden, separate Niederschlagsverteilungen angepasst werden und (2) die Mittelwerte der extended Generalized Pareto Verteilungen als lineare Funktion der mittleren großräumigen Temperatur parametrisiert werden. Es wurden verschiedene Klassenanzahlen bei der Klassifizierung getestet. Im Ergebnis zeigte sich, dass sechs Klassen für jeweils Winter- und Sommerhalbjahr (insgesamt 12) eine optimale Zahl im Verhältnis zur verfügbaren Niederschlagsdatenlage ist.

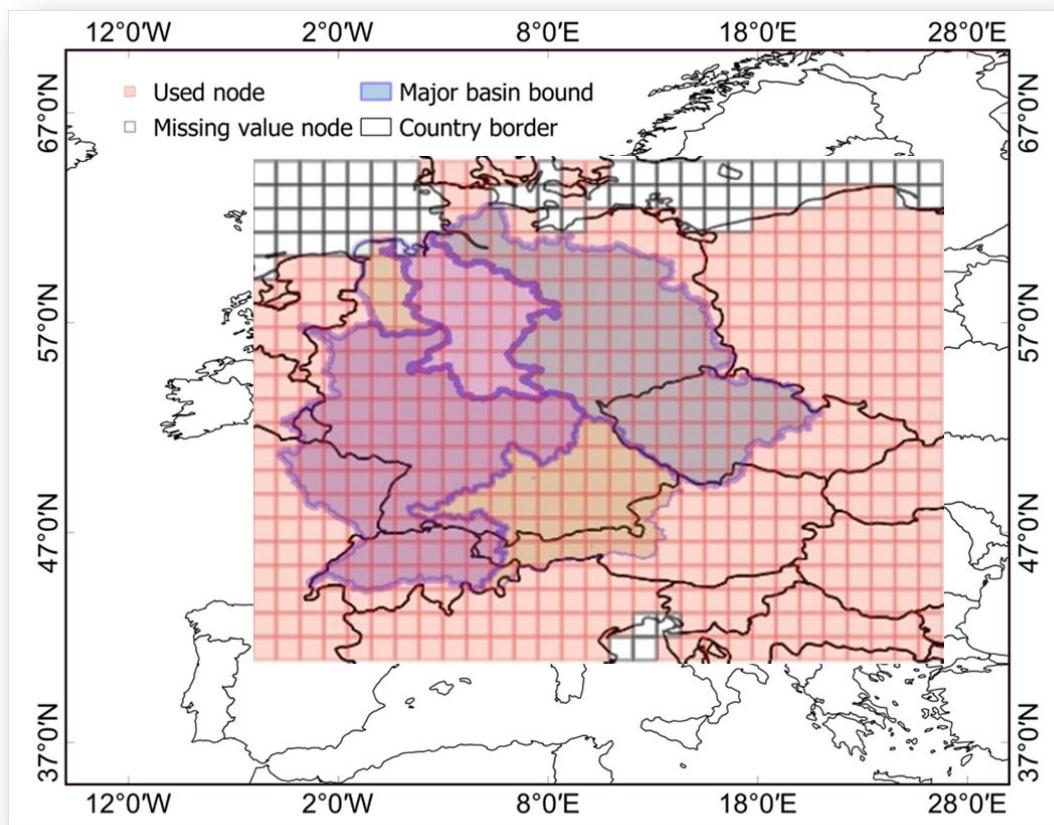


Abbildung 3: Räumliche Domänen für die Ableitung der Zirkulationsmuster (große Domäne) und der mittleren regionalen Temperatur (kleinere Domäne). Die mit RFM simulierten Einzugsgebiete Rhein, Elbe, Donau, Weser und Ems sind hervorgehoben. Die farblich markierten Gridpunkte wurden für den Wettergenerator genutzt.

Der Vergleich zwischen der stationären und instationären Version des Wettergenerators mittels des korrigierten Akaike Information Criterion (AICc) zeigte, dass das instationäre Modell für mehr als 70% der Stationen eine bessere Anpassung liefert (Abb. 4). Dabei wurde die Anzahl der Parameter bzw. die Anzahl der Freiheitsgrade bei der Berechnung von AICc berücksichtigt. Mit Zirkulationsmustern und einer saisonalen Stratifizierung (Winter/Sommer) kann somit eine optimale Parametrisierung unter Berücksichtigung der verfügbaren Niederschlagszeitreihenlänge erreicht werden.

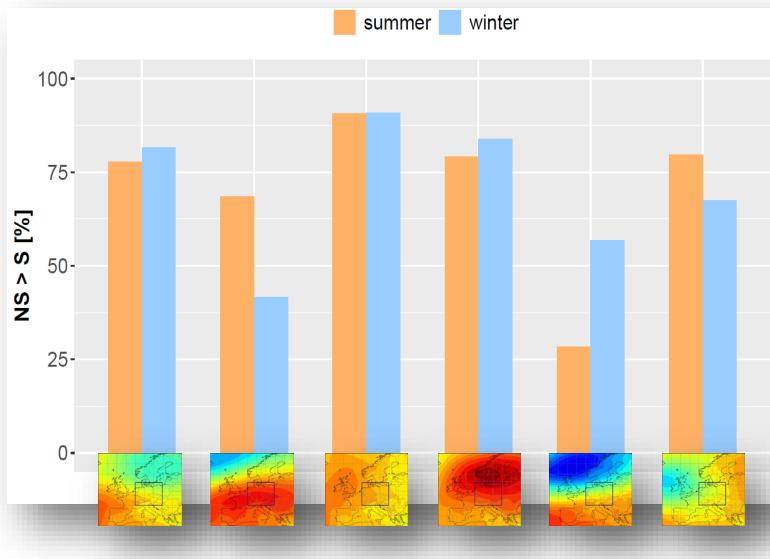


Abbildung 4: Anteil der Gridpunkte (Abb. 3) in [%], für die die Anpassung des instationären (NS) Wettergenerators gemessen an AIC besser ist als die Anpassung des stationären (S) Modells. Die Modellgüte ist für sechs Zirkulationsmuster und Winter/Sommer dargestellt.

3.3. Auswahl und Aufbereitung von Klimamodellprojektionen

Die Modellkette RFM stellt hohe Anforderungen an die Rechenzeiten, insbesondere die Modellierung von Hochwasserhydraulik und Überflutungsflächen. Es ist daher erforderlich, die Anzahl von Klimaprojektionen und den verwendeten GCMs einerseits zu begrenzen, um die Auswertung zu ermöglichen; anderseits muss das Ensemble ausreichend groß sein, um die Unsicherheiten zu erfassen. In Zusammenarbeit mit Dr. Lukas Brunner (Universität Wien) wurden die CMIP6 GCM Modellläufe hinsichtlich deren Güte zur Wiedergabe der wichtigen Variablen zur Ableitung von Zirkulationsmustern (Druck) und großräumiger Temperatur (-trends und -variabilität) analysiert und mit dem ClimWIP Ansatz (Brunner et al., 2020) bewertet und gewichtet (Abb. 5). ClimWIP evaluiert die Modellgüte bei der Wiedergabe der Fokusvariablen und bestimmt die Modellgewichte, je nach „Modellverwandschaft“ zu einander, d.h. Modelle, die unterschiedliche Prozessbeschreibungen haben, werden in einem Ensemble stärker gewichtet als verwandte Modelle mit einer ähnlichen Prozessbeschreibung.

Für die Bewertung der Hochwasseränderungen wurden neun GCM Modelle (UKESM1-0-LL, CanESM5, CESM2, CNRM-CM6-1, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR – aufsteigend nach dem Performance Gewicht (Abb. 5)), zwei Zukunftszeiträume (2031-2060, 2071-2100) und zwei SSP-Szenarien (SSP245, SSP585) für die Konditionierung des Wettergenerators ausgewählt. Die ausgewählten GCMs wurden auch in anderen Studien hinsichtlich der Performance bei der Wiedergabe der Häufigkeiten und Persistenzen der Zirkulationsmuster positiv evaluiert (Cannon, 2020, Fernandez-Granja et al., 2021). Als Baseline wurde der Zeitraum 1985-2014 ausgewählt und stellt den aktuellsten historischen Zeitraum in CMIP6 Simulationen dar und repräsentiert das „heutige“ Hochwasserrisiko.

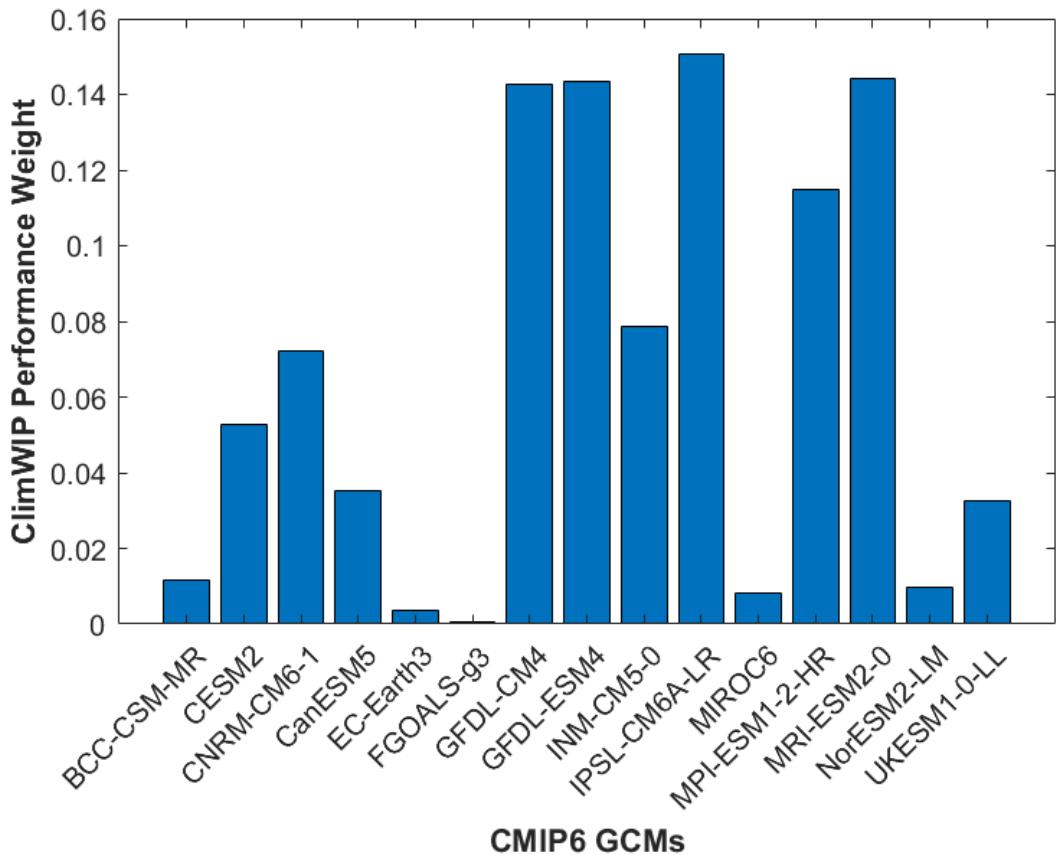


Abbildung 5: Performance Gewichtung von CMIP6 GCM Modellen berechnet mit ClimWIP Ansatz (Brunner et al., 2020) unter Berücksichtigung von großräumigen Druck und Temperatur als Fokusvariablen. Performance Gewichtung spiegelt die GCM Modellgüte bei der Simulation von mittlerer Tagestemperatur und Druck, deren Standardabweichungen und Temperaturtrends im Vergleich zur historischen ERA5 Periode wieder.

3.4. Veränderungen der dynamischen und thermodynamischen atmosphärischen Variablen

Für die ausgewählten GCMs wurden die Änderungen in den Häufigkeiten und Persistenzen der Zirkulationsmuster und die Änderungen in der mittleren regionalen Temperatur in den ausgewählten Zukunftszeiträumen im Vergleich zur Baseline analysiert (Abb. 6 und Abb. 7). Die Zirkulationsmuster CP1 und CP4 treten ähnlich häufig im Sommer- und Winterhalbjahr auf und sind mit durchschnittlichen extremen (99,9-Perzentil) Gebietsniederschlägen assoziiert (Abb. 8). Die anderen Zirkulationsmuster zeigen größere Unterschiede im Sommer und Winter. Generell ist eine höhere Variabilität in der Häufigkeit von Zirkulationsmustern in dem GCM-Modellensemble sichtbar im Vergleich zu Veränderungen der Häufigkeiten zwischen den Zeitperioden und Klimaentwicklungsszenarien (Abb. 6). Insbesondere die CPs 3, 5 und 6, die mit höheren extremen Gebietsniederschlägen assoziiert sind, weisen eine hohe Variabilität in ihrer Häufigkeit zwischen den GCM Modellen auf, aber wiederum eher geringe Änderungen in den beiden Zukunftsperioden im Vergleich zur Baseline.

Das Signal der Änderungen der mittleren regionalen Temperatur variiert ebenfalls stark zwischen einzelnen GCMs (Abb. 7). Insbesondere stechen die beiden Modelle UKESM1-0-LL

und CanESM5 hervor, die den stärksten Temperaturänderungssignal zeigen. Diese beiden Modelle zeigten auch bei der Analyse mit dem ClimWIP Verfahren eine relativ geringe Güte. Das Änderungssignal in der großräumigen Temperatur ist bereits in der ersten Periode (2031-2060) sichtbar und verstärkt sich weiter am Ende des 21. Jahrhunderts, insbesondere für SSP585.

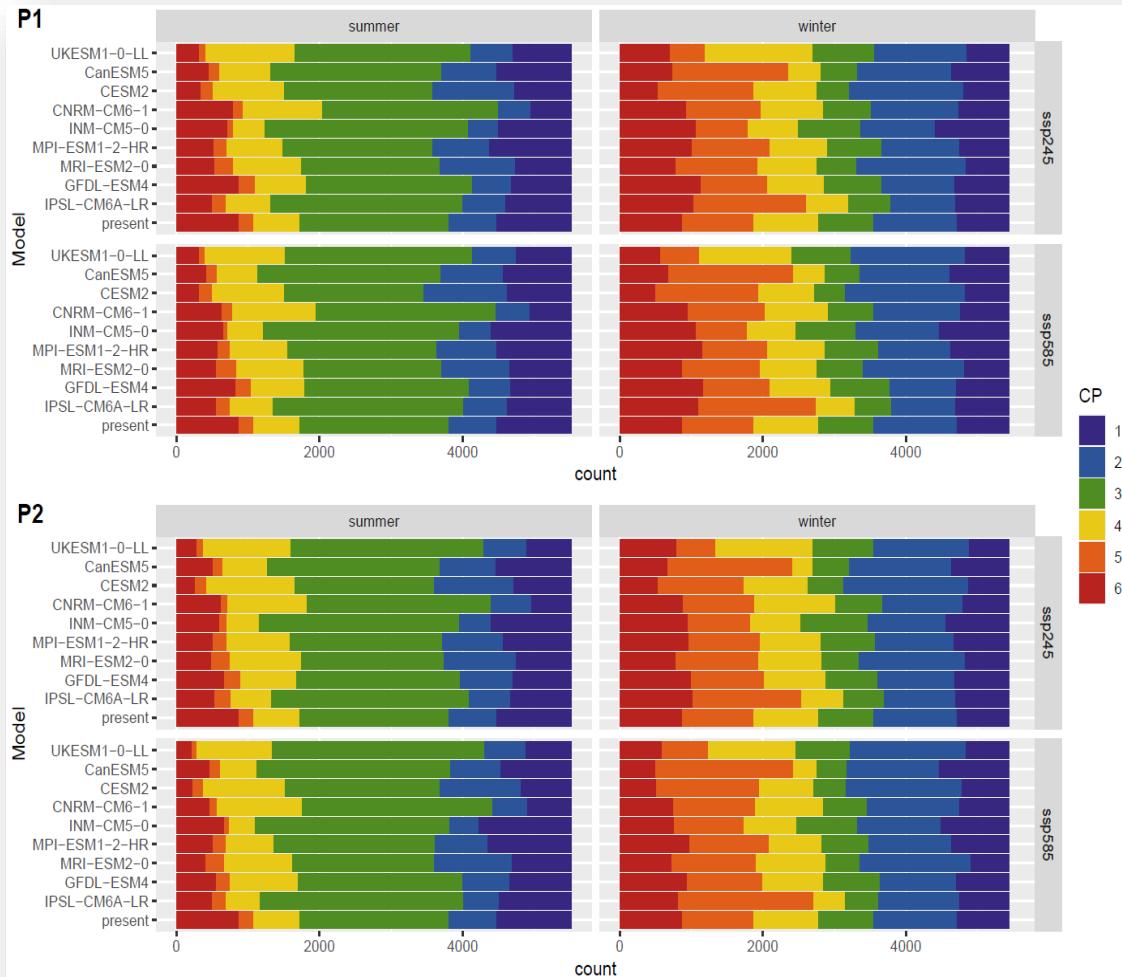


Abbildung 6: Änderungen der Häufigkeiten von sechs Zirkulationsmustern (CP) in neun ausgewählten GCMs, zwei ausgewählten Szenarien (SSP245 und SSP585) und Perioden P1 (2031-2060) und P2 (2071-2100).

3.5. Simulation und Auswertung von Extremniederschlägen mit dem nicht-stationären Wettergenerator

Mit dem nichtstationären Wettergenerator wurden für jede Zeitperiode, jedes Klimaentwicklungszenario und jedes der neun GCMs tägliche Niederschlagszeitreihen von jeweils 3.000 Jahren generiert. Der Ansatz ermöglichte somit ein sehr umfangreiches Ensemble mit insgesamt $3.000 * 9 * 2 * 2 = 108.000$ Jahren räumlich konsistenter Tagesniederschläge für ganz Deutschland.

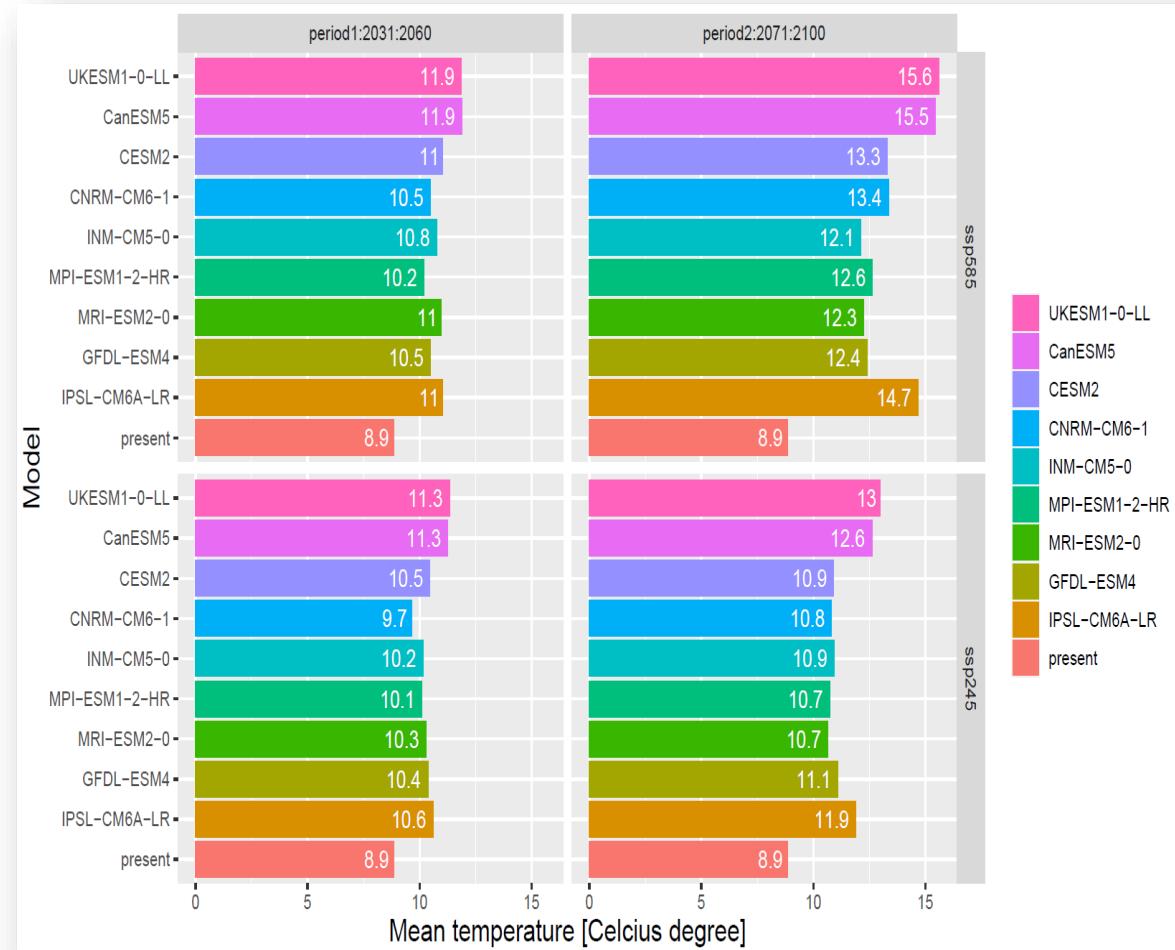


Abbildung 7: Änderungen der mittleren regionalen Temperatur in 9 ausgewählten GCMs, zwei ausgewählten Szenarien (SSP245 und SSP585) und Perioden P1 (2031-2060) und P2 (2071-2100) im Vergleich zum Baseline.

Die resultierenden Änderungen in den extremen Gebietsniederschlägen aufgrund von Änderungen sowohl in der Häufigkeit und Persistenz der Zirkulationsmuster (dynamische Komponente) als aufgrund von Änderungen in der Temperatur (thermodynamische Komponente) sind sehr gering in der ersten Periode für das SSP245 Szenario (Abb. 8). Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird ein deutlicher Anstieg von extremen Niederschlägen, vor allem in den Monaten Juni bis September, simuliert. Aber auch die übrigen Monate zeigen einen leichten Anstieg von extremen Gebietsniederschlägen in Deutschland. Ob die Änderungen in extremen Gebietsniederschlägen stärker durch dynamische oder thermodynamische Änderungen in der Atmosphäre bedingt sind, wird in künftigen Arbeiten untersucht. Mit dem entwickelten nichtstationären Wettergenerator lassen sich die Kovariablen (Zirkulationsmuster und mittlere großräumige Temperatur) austauschen, sodass sich synthetische Szenarien jeweils mit und ohne dynamischen und thermodynamischen Änderungen generieren und untersuchen lassen.

3.6. Simulation und Auswertung von Änderungen in Hochwasserhäufigkeiten

Im nächsten Schritt wurde das hydrologische Modell mHM als Teil der Hochwasserrisiko-Modellkette RFM mit den Zeitreihen des Wettergenerators für die historische Baseline-Periode und für alle ausgewählten zukünftigen CMIP6 Szenarien angetrieben. Das mHM generierte die Abflusszeitreihen an 516 Pegelstandorten in fünf großen Einzugsgebieten Deutschlands (Elbe, Rhein, Donau, Weser, Ems).

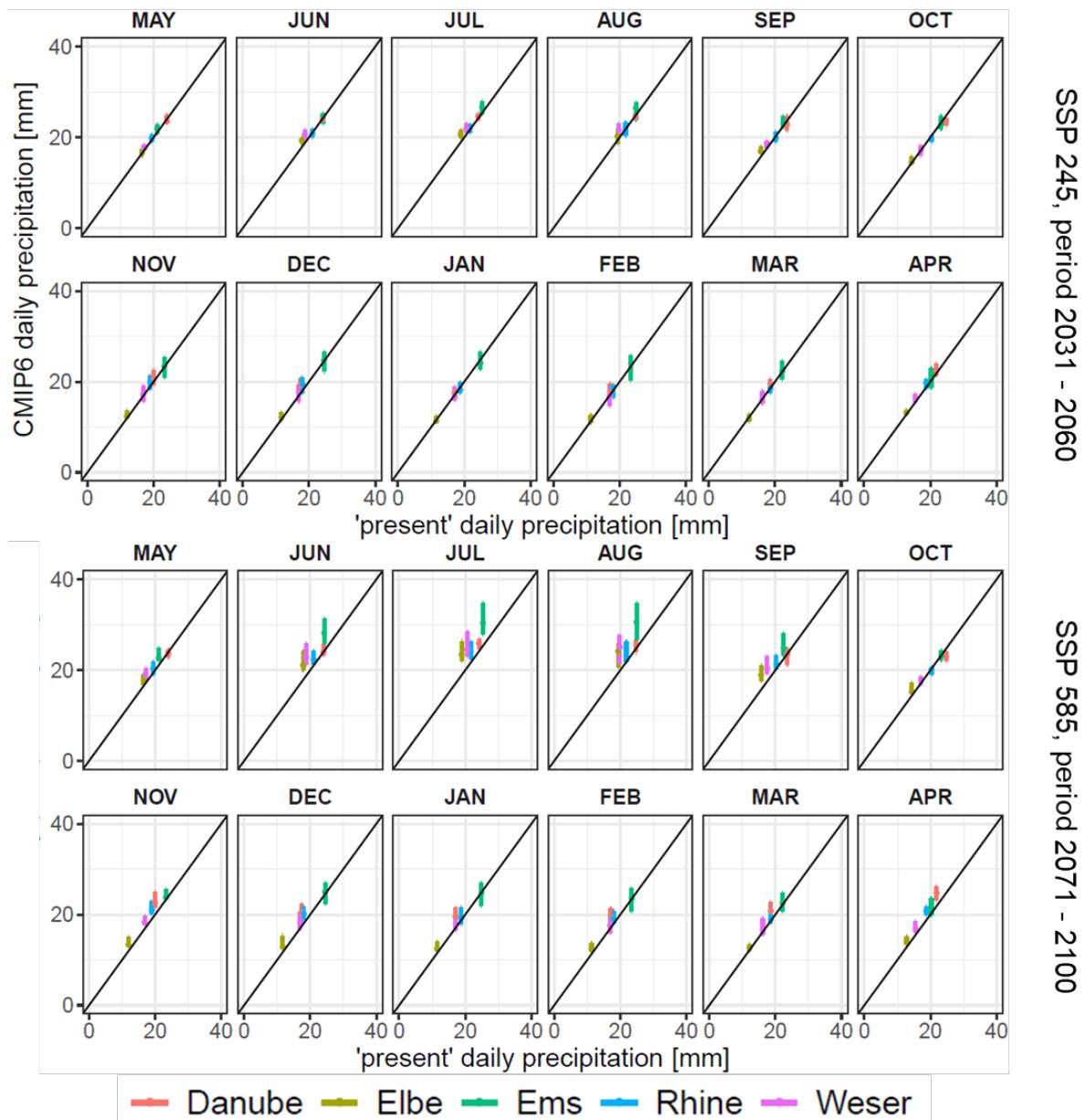


Abbildung 8: Variabilität und Änderungen in täglichen extremen (99,9-Perzentil) Gebietsniederschlägen in fünf großen Einzugsgebieten Deutschlands je nach Monat, für zwei ausgewählten Zukunftsperioden und Klimaentwicklungsszenarien. Die Variabilität in den Gebietsniederschlägen aufgrund unterschiedlicher GCMs wird mit farbigen Balken dargestellt.

Aus den simulierten täglichen Abflusszeitreihen wurden die jährlichen maximalen (AMS) Abflusswerte abgeleitet. Für die Baseline-Periode wurde die Generalisierte Extremwertverteilung (GEV) an die AMS angepasst und für jedes Jahr die Wiederkehrperiode (HQ) für den

AMS-Wert bestimmt. Die Änderung der Häufigkeiten von Wiederkehrperioden der Hochwasserabflüsse in der Zukunft zeigt eine konsistente Verschärfung der Hochwassergefährdung (Abb. 9). Der Anteil von kleineren Hochwassern mit $HQ < 5$ sinkt, während der Anteil mittlerer Hochwasser ($HQ10-HQ100$) deutlich steigt. Auch die extremen Hochwasser ($HQ > 100$) werden häufiger gegen Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Baseline; deren Anteil ist aber naturgemäß gering.

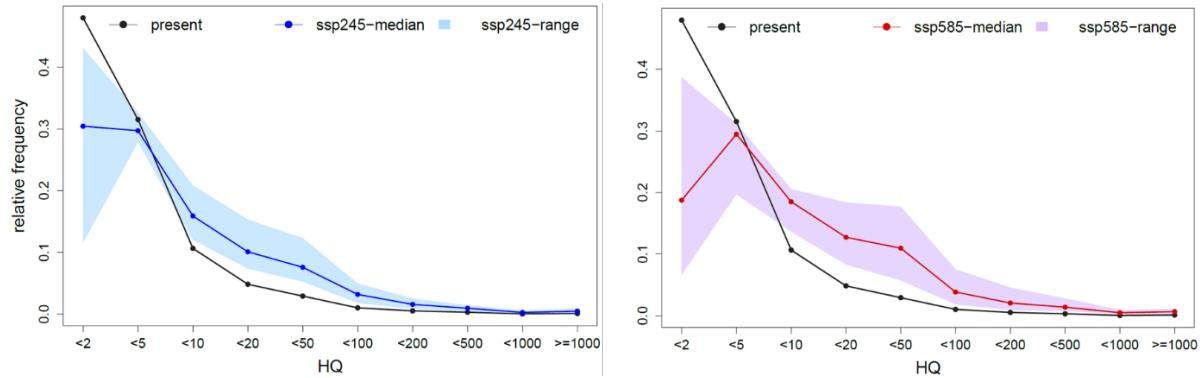


Abbildung 9: Relative Häufigkeit von Wiederkehrperioden (HQ) der jährlichen maximalen Abflüsse aus 3.000 Simulationsjahren an 516 modellierten Pegelstandorten in Deutschland. Die Abbildung zeigt den Vergleich zwischen Baseline und der Periode 2071-2100 für die Klimaentwicklungsszenarien SSP245 (links) und SSP585 (rechts). Die blaue bzw. rote Kurve zeigt den Median von neun ausgewählten GCMs und die gefärbten Bereiche stellen die Streuung der GCMs dar.

Im weiteren Schritt wird spezifisch für einzelne Einzugsgebiete analysiert, wie sich die Veränderungen des zukünftigen Klimas auf die Änderungen der Hochwasserhäufigkeiten auswirken.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Projekt FLOOD hat sich im Zeitraum 2020 – 2023 mit der Entwicklung eines Modellierungsansatzes beschäftigt, um die Änderungen der Hochwasserhäufigkeiten und Impakte für zukünftige Klimaänderungsszenarien abzuschätzen. Das Regionale Hochwassermodell (RFM) wurde für fünf große Einzugsgebiete – Rhein, Donau, Elbe, Weser und Ems – aufgesetzt. Das Projekt trug zu der ersten nationalen Hochwasserrisikoabschätzung für die vergangene Periode bei (Sairam et al., 2021). Im Rahmen des FLOOD Projektes wurde ein innovativer instationärer Wettergenerator entwickelt und in das RFM für Deutschland integriert (Nguyen et al., in Vorbereitung). Der instationäre Wettergenerator wird anhand von atmosphärischen Zirkulationsmustern und mittlerer regionaler Temperatur konditioniert und ermöglicht die Generierung langer synthetischer Niederschlags- und Temperaturzeitreihen basierend auf relativ kurzen Zeitreihen aus Klimamodellprojektionen. Der neue Wettergenerator kann somit die Änderungen in den dynamischen Eigenschaften der Atmosphäre (Häufigkeit und Persistenz der Zirkulationsmuster) als auch in den thermodynamischen Eigenschaften (Temperatur) berücksichtigen. Mit dem entwickelten Simulationswerkzeug wurde das RFM für Deutschland und die flussaufwärts gelegenen Einzugsgebiete aufgesetzt. Der nicht-

stationäre Wettergenerator wurde verwendet, um den Output von neun CMIP6 globalen Klimamodellen statistisch herunter zu skalieren, um den Einfluss des Klimawandels und der Variabilität auf die Hochwassergefährdung und das Hochwasserrisiko in zwei zukünftigen Zeiträumen (2031-2060 und 2071-2100) im Vergleich zur Baseline (1985-2014) zu quantifizieren. Die langen synthetischen Zeitreihen von jeweils 3.000 Jahren für jede Klimamodellprojektion und jeden Zeitraum erlauben eine robuste Hochwasserextremwertstatistik, die mit kurzen Zeitreihen nicht belastbar wäre. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass die Häufigkeiten von mittleren und schweren Hochwassern in Deutschland bis Ende des 21. Jahrhunderts konsistent zunehmen wird. Der Änderungssignal ist in beiden Klimaentwicklungsszenarien (SSP245 und SSP585) deutlich sichtbar trotz einer hohen Variabilität der GCM Projektionen.

Die im Projekt FLOOD entwickelten Modellansätze und bisher erzielten Ergebnisse stellen eine Grundlage für weitere Analysen der Änderungen in Hochwassergefährdung und -risiko dar. Im Rahmen weiterführender Arbeiten nach Ablauf der Projektlaufzeit wird die RFM Modellkette für die herunterskalierten Klimaprojektionen weiter bis hin zu Überflutungssimulation, Schaden und Risiko betrieben. Im Ergebnis erwarten wir robuste Aussagen zu Risikoänderungen bei fluvialen Hochwassern in Deutschland.

Der entwickelte methodische Ansatz ermöglicht die Analyse der Rolle von dynamischen und thermodynamischen Änderungen auf Hochwasserhäufigkeiten und Impakte. Wie viel tragen die Änderungen in der Häufigkeit und Persistenz der Zirkulationsmuster zu Änderungen der Hochwasserhäufigkeit bei und wie viel hängt mit steigenden Temperaturen innerhalb der einzelnen Zirkulationsmuster zusammen? Diese spannende Frage wurde bisher unzureichend beleuchtet und wird in weiterführenden Arbeiten adressiert.

Die Sektion Hydrologie am Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam hat in der zweiten Phase von ClimXtrem 2023-2026 in dem inzwischen bewilligten Projekt FLOOD II die Frage der Attributierung von Hochwasserimpakten bei extremen Hochwasserereignissen, wie z. B. das Ahr-Hochwasser von 2021, zu anthropogenen bedingten Klimaänderungen in den Mittelpunkt gestellt. Der nicht-stationäre Wettergenerator und die RFM Modellkette werden in diesem Vorhaben als zentrale Werkzeuge genutzt, um eine große Anzahl von Hochwassersimulationen ohne den anthropogenen Einfluss zu erzeugen, s.g. „*scenarios of counterfactual world*“. Der Wettergenerator wird in diesem Fall anhand von Zirkulationsmustern und mittlerer großräumiger Temperatur von GCM Simulationen mit natürlicher Treibhausgaskonzentration ohne anthropogener Komponenten konditioniert. Anschließend soll bestimmt werden, wie wahrscheinlicher bestimmte Hochwasserextremereignisse und deren Impakte in dem heutigen Klima sind, im Vergleich zum menschenunbeeinflussten Klima.

Das Projekt FLOOD hat im Rahmen der modulübergreifender Kooperation zu der Auswertung vom extremen pluvialen Ereignis im Raum Berlin am 29. Juni 2017 beigetragen (Caldas-Alvarez et al., 2022). Das Projekt FLOOD hat sich hier insbesondere auf die Auswertung von sozio-ökonomischen Impakten konzentriert.

Des Weiteren kooperierte das FLOOD Projekt eng mit dem LASLI Projekt. LASLI unterstützte das Projekt FLOOD durch die Ableitung der Klassifizierung von Zirkulationsmuster und die Anwendung dieser Klassifizierung auf CMIP6 GCM Simulationen. Die Klassifizierung von Zirkulationsmustern wurde auch für die neu entwickelte Methode zur Disaggregierung von täglichen Niederschlägen auf stündliche Werte genutzt (Guan et al., 2022). Höher aufgelöste Niederschlagsdaten sind für hydrologische Modellierung in kleinen Einzugsgebieten mit Fläche unter 1.000 km² unabdingbar, um eine plausible Dynamik bei extremen Hochwassern mit sehr schneller Gebietsreaktion wie im Ahrtal zu erzielen. Die Kooperation mit dem Projekt

LASLI erfolgte auch in die andere Richtung, indem die simulierten Zeitreihen der Bodenfeuchte aus dem hydrologischen Modell mHM als potentieller Prädiktor für logistische Regressionsmodelle von Hangrutschungen bereitgestellt wurde (Nissen et al., 2022).

5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen im Rahmen des Vorhabens

(Die Veröffentlichungen wurden entweder in open-access Zeitschriften veröffentlicht oder sind als pre-print in der GFZ Publikationsdatenbank (<https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/>) verfügbar.) Die beitragenden GFZ-Autoren mit Bezug zum Projekt FLOOD sind hervorgehoben. Die mit (*) markierten Publikation wurden in Kooperation mit anderen Teilprojekten im ClimXtreme erstellt.

Referierte Zeitschriften:

*Caldas-Alvarez, A., Augenstein, M., Ayzel, G., Barfus, K., Cherian, R., Dillenardt, L., Fauer, F., Feldmann, H., Heistermann, M., Karwat, A., Kaspar, F., **Kreibich, H.**, Lucio-Eceiza, E. E., Meredith, E. P., Mohr, S., Niermann, D., Pfahl, S., Ruff, F., Rust, H. W., **Schoppa, L.**, Schwitalla, T., Steidl, S., Thieken, A. H., Tradowsky, J. S., Wulfmeyer, V., Quaas, J. (2022): Meteorological, impact and climate perspectives of the 29 June 2017 heavy precipitation event in the Berlin metropolitan area. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 22, 11, 3701-3724. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3701-2022>

Farrag, M., Brill, F., **Nguyen, D.**, Sairam, N., Schröter, K., Kreibich, H., **Merz, B.**, de Bruijn, K. M., & **Vorogushyn, S.** (2022). On the role of floodplain storage and hydrodynamic interactions in flood risk estimation. *Hydrological Sciences Journal*, 67(4), 508-534. doi:10.1080/02626667.2022.2030058.

*Guan, X., Nissen, K., **Nguyen, D.**, **Merz, B.**, Winter, B., **Vorogushyn, S.** (2023): Multisite temporal rainfall disaggregation using methods of fragments conditioned on circulation patterns. *Journal of Hydrology*, 621, 129640. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129640>

Nguyen, D., **Merz, B.**, Hundecha, Y., Haberlandt, U., **Vorogushyn, S.** (2021): Comprehensive evaluation of an improved large-scale multi-site weather generator for Germany. *International Journal of Climatology*, 41, 10, 4933-4956. <https://doi.org/10.1002/joc.7107>

Sairam, N., Brill, F., Sieg, T., Farrag, M., Kellermann, P., **Nguyen, D.**, Lüdtke, S., **Merz, B.**, Schröter, K., **Vorogushyn, S.**, Kreibich, H. (2021): Process-based flood risk assessment for Germany. *Earth's Future*, 9, 10, e2021EF002259. <https://doi.org/10.1029/2021EF002259>

Ullrich, S., Hegnauer, M., **Nguyen, D.**, **Merz, B.**, Kwadijk, J., **Vorogushyn, S.** (2021): Comparative evaluation of two types of stochastic weather generators for synthetic precipitation in the Rhine basin. *Journal of Hydrology*, 601, 126544. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126544>

Konferenzbeiträge:

***Nguyen, V. D.**, **Vorogushyn, S.**, Nissen, K., and **Merz, B.** (2023): A non-stationary gridded weather generator conditioned on large-scale weather circulation patterns for Central Europe, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-15475, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15475>, 2023.

***Vorogushyn, S., Nguyen, D., Nissen, K., Guse, B., & Merz, B.** (2023): Process-based flood risk assessment in German basins for future climate. In XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences. doi:10.57757/IUGG23-4965.

Veröffentlichungen in Vorbereitung:

Nguyen, Vorogushyn, Merz et al.: Developing a non-stationary weather generator for central europe: using large-scale circulation patterns and downscaling future climate model projections (in Vorbereitung) inkl. Datenbereitstellung aus RWG Simulationen über open-access GFZ Data Repository.

Vorogushyn, Nguyen, Merz et al.: Future flood risk changes in Germany (in Vorbereitung)

Zu folgender Publikation im ClimXtrem Projekt LASLI hat das Projekt FLOOD Zuarbeit geleistet:

Nissen, K.M., Rupp, S., Kreuzer, T.M., **Guse, B.**, Damm B. & Ulbrich, U. (2022): Quantification of meteorological conditions for rockfall triggers in Germany, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 22, 2117–2130, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2117-2022>.

6. Weitere Referenzen

Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171–182. <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>

Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., & Bianchi, A. (2015). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004> Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., ... Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>

Brunner, L., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Merrifield, A. L., Lorenz, R., & Knutti, R. (2020). Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics*, 11(4), 995–1012. <https://doi.org/10.5194/esd-11-995-2020>

Cannon, A. J. (2020). Reductions in daily continental-scale atmospheric circulation biases between generations of global climate models: CMIP5 to CMIP6. *Environmental Research Letters*, 15(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7e4f>

Falter, D., Dung, N. V., Vorogushyn, S., Schröter, K., Hundecha, Y., Kreibich, H., Apel, H., Theisselmann, F., & Merz, B. (2016). Continuous, large-scale simulation model for flood risk assessments: Proof-of-concept. *Journal of Flood Risk Management*, 9(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12105>

Hattermann, F. F., Huang, S., Burghoff, O., Willems, W., Österle, H., Büchner, M., & Kundzewicz, Z. (2014). Modelling flood damages under climate change conditions-a case study for Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(12), 3151–3169. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3151-2014>

Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>

Huang, S., Hattermann, F. F., Krysanova, V., & Bronstert, A. (2013). Projections of climate change impacts on river flood conditions in Germany by combining three different RCMs with a regional eco-hydrological model. *Climatic Change*, 116(3–4), 631–663. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0586-2>

Huang, S., Krysanova, V., & Hattermann, F. (2015). Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. *Regional Environmental Change*, 15(3), 461–473. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0606-z>

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC, 2022: Annex I: Global to Regional Atlas [Pörtner, H.-O., A. Alegria, V. Möller, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, S. Götze (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2811–2896, doi:10.1017/9781009325844.028.

Fernandez-Granja, J. A., Casanueva, A., Bedia, J., & Fernandez, J. (2021). Improved atmospheric circulation over Europe by the new generation of CMIP6 earth system models. *Climate Dynamics*, 56(11–12), 3527–3540. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05652-9>

Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C. J. H., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U., & Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2(9). <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>

Paprotny, D., Kreibich, H., Morales-Nápoles, O., Castellarin, A., Carisi, F., Schröter, K. (2020a): Exposure and vulnerability estimation for modelling flood losses to commercial assets in Europe. - *Science of the Total Environment*, 737, 140011. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140011>

Paprotny, D., Kreibich, H., Morales-Nápoles, O., Terefenko, P., Schröter, K. (2020b): Estimating exposure of residential assets to natural hazards in Europe using open data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1, 323–343. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-323-2020>.

Philipp, A., Beck, C., Huth, R., and Jacobbeit, J. (2016): Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software, *Int. J. Climatol.*, 36, 2673–2691.

Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S. (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5).

<https://doi.org/10.1029/2008WR007327>

Schröter, K., Kunz, M., Elmer, F., Mühr, B., 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://doi.org/10.5194/hess-19-309-2015>