GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FONA Research for sustainability

CLIMXTREME Climate Change and Extreme Events

# ClimXtreme Modul A – Physik und Prozesse

## Teilprojekte KIT

## Abschlussbericht Teil I: Kurzbericht und Teil II: eingehende Darstellung

| Zuwendungsempfänger: | Förderkennzeichen: |
|---|---|
| Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO), Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) | 01LP1901A |

Vorhabenbezeichnung:

ClimXtreme Verbundprojekt Modul A: Physik und Prozesse, Teilprojekt 1: AEVERE (A1): Koordination und Extremniederschläge; DynProHeat (A5): Dynamik der Atmosphäre und Hitzewellen; CyclEx (A6): Stürme; VarClust (A7): Konvektive Extreme

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2019 – 30.09.2022, kostenneutrale Verlängerung bis 31.05.2023

Teilprojekt A1 SEVERE: **Skalenabhängige Wiedergabe der relevanten Prozesse und Sensitivitätsanalyse für sehr extreme Niederschlagsereignisse (inklusive Modul-Koordination)**
Joaquim. G. Pinto, Christoph Kottmeier, Hendrik Feldmann, Alberto Caldas-Alvarez, Armenia Franco-Díaz

Teilprojekt A5 DynProHeat: **The role of multi-scale Dynamical Processes in shaping recent and future extreme Heat waves over Germany**
Andreas Fink, Joaquim G. Pinto, Florian Becker

Teilprojekt A6 CyclEx: **Intensity and structural changes of extreme mid-latitude cyclones change in a warming climate**
Joaquim G. Pinto, Aiko Voigt, Ting-Chen Chen, Hilke Lentink, Christoph Braun

Teilprojekt A7 VarCluST: **Langzeitliche Variabilität und serielles Clustering von schweren Gewittern in einem sich verändernden Klima**
Michael Kunz, Susanna Mohr, Markus Augenstein

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01LR2002A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

# Teil I: Kurzbericht

## A1 SEVERE: Skalenabhängige Wiedergabe der relevanten Prozesse und Sensitivitätsanalyse für sehr extreme Niederschlagsereignisse (inklusive Modul-Koordination)

J.G. Pinto, C. Kottmeier, H. Feldmann, A. Caldas-Alvarez, A. Franco-Díaz

### 1. Aufgabenstellung

Das Projekt SEVERE Projekt befasste sich mit Extremniederschläge bis hin zu einer Wiederkehrperiode von mehr als 100 Jahren. Dazu wurden zum einen große Ensembles (LAERTES-EU und MPI-GE CMIP6) verwendet, um robuste Abschätzungen solch hoher Wiederkehrperioden zu ermöglichen und die zugehörigen Ereignisse charakterisieren zu können. Gleichzeitig wurden konvektionserlaubende Simulationen auf der Kilometer-Skala verwendet um die Prozesse, Intensitäten und räumlichen Strukturen derartiger Extremereignisse angemessen beschreiben zu können. Die Kombination beider Ansätze soll dazu führen das Risiko starker Ereignisse wie den Überflutungen im Juli 2021 besser erfassen zu können.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

ClimXtreme schloss sich zeitlich an das MiKlip Projekt zu dekadischen Prognosen an. Im Rahmen von MiKlip wurden mehrere Generationen von initialisierten dekadischen Hindcast-Ensembles im Umfang von insgesamt mehr als 12.000 Simulationsjahren erzeigt. Die regionale Komponente wurde mit COSMO-CLM in einer Auflösung von ca. 25 km realisiert. Diese Simulationen wurden im LAERTES-EU zusammengefasst und auf ihre Konsistenz und ihre Güte getestet (Ehmele et al., 2020) und konnten anschließend in SEVERE zu Untersuchung sehr extremer Niederschlagsereignisse verwendet werden. Andere sogenannte SMILEs (Single Model Initial-condition Large Ensembles, Maher et al., 2021) globaler Modelle wurden gegen Beginn des Projekts verfügbar und boten sich für die Untersuchung zukünftiger Klimaänderungssignale an.

In der CORDEX FPS Convection Initiative wurde unter Beteiligung des KIT ein Ensemble aus konvektionserlaubenden Simulationen auf der Kilometer-Skala erzeugt und ausgewertet (Ban et al., 2021, Pichelli et al., 2021).

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt enthält die Koordinationsaufgaben für Modul A inklusive der Vertretung in der ClimXtreme Steuergruppe. Der wissenschaftliche Teil basiert im Wesentlichen auf den unter 2. genannten Datensätzen. LAERTES wurde vor allem dazu verwendet robuste Wiederkehrwerte für Extremniederschläge im Gegenwartsklima sowie deren zeitliche Trend und Variabilitätsmuster zu untersuchen. Die Skalen-Abhängigkeit der Ergebnisse wurde mit der Modellkette aus FPS Convection untersucht. Der PSI-Index (Caldas-Alvarez et al., 2023) wurde dazu angepasst um verschiedene Extrem-niederschlags-Ereignisse in verschiedener Datensätzen identifizieren und vergleichen zu können. In der Kombination wurden die Erkenntnisse und Methoden dazu verwendet, um ein episodisches Downscaling von Extremniederschlagsereignissen aus großen Ensembles zu ermöglichen.

### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zeitreihen von Beobachtungsdaten moderner Messnetze stehen erst seit einigen Jahrzehnten flächendeckend für Mitteleuropa zu Verfügung. Diese Zeiträume sind zu kurz, um die Risiken extremer Niederschlagsereignisse robust abschätzen zu können. Basierend auf theoretische Überlegungen und

Klimasimulationen wurde ein Anstieg der Intensität von Extremniederschlägen in Europa erwartet. Die regionalen dynamischen und thermodynamischen Prozesse dabei sind aber noch unsicher. Globale Klimasimulationen sind zu grob aufgelöst, um die Prozesse adäquat darstellen zu können. Hochaufgelöste Simulationen auf der Kilometer-Skala standen als experimenteller Ansatz nur in geringem Maße zur Verfügung.

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb von ClimXtreme, ist A1 SEVERE Teil der Steuergruppe und damit für die Organisation mitverantwortlich. Alberto Caldas-Alvarez (ko-)koordinierte die Projekt- und Modul-übergreifende Topic-Gruppe „Precipitation Indices“ und ist Erstautor der daraus entstandenen Publikation. Darüber hinaus fand eine Beteiligung and der Topic Gruppe „Compound Events“ und „Plugins“ statt. Das Projekt SEVERE arbeitete mit mehreren Stellen außerhalb von ClimXtreme zusammen. Dabei sind die Übernahmen von Daten und Werkzeugen (FREVA Plug-Ins) aus MiKlip zu nennen. Eine wichtige Kooperation besteht mit der „CORDEX Flagship Pilot Study on Convection“ bezüglich konvektionserlaubender Simulationen. Des Weiteren wurde innerhalb der CLM-Community an der Entwicklung das verwendeten Modells COSMO-CLM gearbeitet. Die Beiträge zu den Publikationen zu den Überflutungen im Juli 2021 erfolgten in Zusammenarbeit mit dem „Center for Disaster Management and Risk Reduction (CEDIM)“ am KIT. Bei der Untersuchung der Wiederkehrwerte von Starkregenereignissen mittels konvektionserlaubender Klimasimulationen wurde mit den Projekten „Integrative stadt-regionale Anpassungsstrategien in einer polyzentrischen Wachstumsregion: Modellregion – Region Stuttgart (ISAP)“ und „Nutzbare lokale Klimainformationen für Deutschland (NUKLEUS)“ aus dem BMBF Forschungsvorhaben RegIKlim (Regionale Informationen zum Klimahandeln) kooperiert.

## A5 DynProHeat: The role of multi-scale Dynamical Processes in shaping recent and future extreme Heat waves over Germany

A. Fink, J. G. Pinto, F. Becker

### 1. Aufgabenstellung

Das Teilprojekt A5 DynProHeat befasste sich mit der Rolle der Dynamik der Atmosphäre für die Entwicklung von sommerlichen Hitzewellen in Deutschland im jetzigen und zukünftigen Klima. Die Klimaprojektionen zeigten mit großer Vertrauenswürdigkeit, dass Hitzewellen in Mitteleuropa gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutlich intensiver ausfallen werden als heute Während die verstärkende Rolle ausgetrockneter Böden und Vegetation im Hitzewellengebiet im Jetzt- und zukünftigen Klima in zahlreichen Studien untersucht wurde, war die Bedeutung der atmosphärischen Dynamik und damit verknüpft des Zustands der Landoberfläche in entfernteren Gebieten für das Jetztklima vor Projektbeginn erst in wenigen, und für das zukünftige Klima noch gar nicht untersucht worden. Hier setzte DynProHeat an.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

DynProHeat konnte existierende Rossbywellen-Diagnosesoftware einsetzen (e. g. Fragkoulidis et al. 2018), um das Verhalten der obertroposphärischen Strömung in globalen CMIP-Modellsimulationen für das Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Jetztklima zu beschreiben. Weiterhin bestand eine große Expertise in der Anwendung des Trajektorien-Pakets LAGRANTO, durch welches die Bedeutung der Erwärmung durch Absinken und durch die sensible Wärmeflüsse vom Boden her analysiert werden

kann. Letzteres erlaubt den nicht-lokalen Einfluss der Rolle der Landoberflächencharakteristik abzuschätzen.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in drei Aufgaben („Task“) aufgeteilt. Für die Task A5-1 „Rossbywellen-Diagnostik von Hitzwellen im zukünftigen Klima“ wurden drei Globalmodelle ausgesucht (EC-Earth, MPI, ESM, und CESM), deren zeitliche und räumliche Auflösung es auch erlaubte, das Trajektorien-Paket LAGRANTO anzuwenden, welches in der Task Task A5-2 „Eulersche und Lagrangsche Diagnostik von Hitzewellen im zukünftigen Klima“ angewendet wurde. In der Task A5-3 „Synthese der Rolle der „schnellen“ dynamischen und langsamen Bodenoberflächenprozesse für zukünftige Hitzewellen“ wurde die Rolle der Höhenströmung gegenüber der Bodenoberfläche abgeschätzt. Arbeiten im Projekt wurden durch die Corona Epidemie verzögert, jedoch konnte diese bis zum Ende des Projektes durch die kostenneutrale Verlängerung weitgehend aufgeholt werden.

### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Klimaprojektionen zeigen mit großer Vertrauenswürdigkeit, dass Hitzewellen in Mitteleuropa gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutlich intensiver ausfallen werden – ein Trend, der derzeit auch schon in den Beobachtungen auszumachen ist. Während die verstärkende Rolle ausgetrockneter Böden und Vegetation in den Hitzewellengebieten im Jetzt- und zukünftigen Klima in zahlreichen Studien untersucht wurde, ist die Bedeutung der atmosphärischen Dynamik und damit verknüpft des Zustands der Landoberfläche in entfernteren Gebieten für das Jetztklima erst in wenigen, und für das zukünftige Klima noch gar nicht untersucht worden.

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine Zusammenarbeit erfolgte mit Dr. Fragkoulidis (Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz) im Zusammenhang mit dem von ihm entwickelten Diagnostik zu Rossbywellen-Paketen. Weiterhin erfolgte eine Zusammenarbeit mit Pedro Sousa (Universität Lissabon), der dem Projekt die von ihm entwickelte Diagnostik der obertroposphärischen Strömung zur Verfügung stellte. Die Arbeiten in A5 würden durch Beiträge der Freie Universität Berlin ergänzt (siehe separaten Bericht der FU Berlin zu A5).

## A6 CyclEx: Intensity and structural changes of extreme mid-latitude cyclones change in a warming climate

J.G. Pinto, A. Voigt, T.-C. Chen, H. Lentink, C. Braun

### 1. Aufgabenstellung

Das Hauptziel des CyclEx-Projekts ist es, zu untersuchen, wie extreme außertropische Wirbelstürme (ETCs), die damit verbundenen extremen Winde und Niederschläge sowie deren Entstehungs-mechanismen durch den Klimawandel beeinflusst werden.

Inwieweit die derzeitigen grob aufgelösten GCMs systematische Abweichungen enthalten, welche die zukünftigen ETC-Projektionen beeinflussen, bleibt eine zentrale wissenschaftliche Frage. In dieser Hinsicht zielt das Projekt darauf ab, diese Lücken mit vier Aufgaben zu füllen, die sich in zwei Teilen zusammenfassen lassen:

**Teil 1 Zyklonenstatistiken** (Aufgaben A6-1, A6-2 im ursprünglichen Antrag) sollen Zyklonen Statistiken auf der Grundlage von Reanalyse Daten und globalen Klimamodellen (CMIP6) unter historischen und projizierten zukünftigen Klimabedingungen berechnen. Anschließend soll die Drucktendenzgleichung (PTE) von Fink et al. (2012) für eine quantitative Bewertung des Beitrags der großskaligen Temperaturadvektion und der kleinskaligen diabatischen Prozesse zur Intensität von ETCs verwendet werden.

**Teil 2: Idealisierte ICON-Simulationen und PTE-Analyse** (Aufgaben A6-3, A6-4) sollen idealisierte Wirbelsturmsimulationen mit verschiedenen anfänglichen Erwärmungsbedingungen und unterschiedlichen Modellgitterabständen (80 km vs. 2,5 km) durchführen und mit den in Teil 1 erzielten Ergebnissen vergleichen.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde/ 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Mit steigenden Oberflächentemperaturen prognostizieren globale Klimamodelle (GCMs) geringfügige Veränderungen in der Häufigkeit extremer Winter Zyklonen und der damit verbundenen Winde über Westeuropa sowie eine starke Zunahme der damit verbundenen Niederschläge (Zappa et al., 2013). Aufgrund der beträchtlichen Modellstreuung und - bias ist es jedoch schwierig, die Veränderungen in der Struktur und Intensität extremer Wirbelstürme schlüssig zu quantifizieren und die zugrunde liegenden Antriebsmechanismen zu klären (z. B. Zappa et al., 2013; Priestley et al., 2022). Ein Großteil der Unsicherheit ist auf die grobe Modellauflösung und die Unsicherheit bei der Parametrisierung kleinskaliger diabatischer Prozesse zurückzuführen (Seiler und Zwiers, 2016), die die ursprüngliche Zyklone verstärken können.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für Teil 1 berechneten wir zunächst Zyklonen Züge für ERA-Interim, ERA-5 und alle verfügbaren Modelle des CMIP6 (historisch, SSP1, SSP2, SSP3, SSP5) unter Verwendung des ZYKPAK-Tools in FREVA. Anschließend wurden Zyklonen Statistiken (Zugdichte und Intensitätsverteilung) berechnet, und die mit den Zyklonen verbundenen Felder wurden zusammengesetzt und analysiert. Parallel zu dieser Aufgabe wurden die CMIP6-Temperaturfelder als Input für die ICON-Simulationen in Teil 2 extrahiert. Für Aufgabe A6-2 stellten wir fest, dass CMIP6 nicht genügend Variablen für die PTE-Analyse bereitstellt. Daher haben wir das PTE-Tool nur für einige historische Fälle unter Verwendung von ERA5 getestet. Außerdem entdeckten wir einen kleinen Fehler im Parameter-Setup von ZYKPAK, der eine Diskontinuität der Zyklonen bahnen über Jahreswechsel hinweg (von Dezember auf Januar) verursachte. Dieser Fehler wurde für ERA5 behoben, aber nicht für alle CMIP6-Daten. Obwohl dies keine nennenswerten Auswirkungen auf unsere bisherigen Ergebnisse haben sollte, haben wir beschlossen, mit Teil 2 fortzufahren, um den geplanten Zeitplan des Projekts einzuhalten.

Für Teil 2 haben wir die idealisierten ICON-Simulationen eines intensiven außertropischen Wirbelsturms aufgesetzt und verschiedene Experimente mit unterschiedlichen Ausgangswerten und Erwärmungsmustern durchgeführt. Da unser geplanter vollständiger Satz von Simulationen noch nicht abgeschlossen war, als das vorherige HPC-System (Mistral) des DKRZ Mitte 2022 außer Betrieb genommen wurde, führten wir alle Simulationen auf dem neuen HPC-System (Levante) erneut durch, um eine konsistente Konfiguration sicherzustellen. Wir arbeiteten auch an der Verbesserung des PTE-Tools, bevor wir es auf die hochauflösenden ICON-Simulationen anwendeten. Anschließend analysierten wir die Simulationsergebnisse wie geplant und konzentrierten uns dabei auf die Rolle diabatischer Prozesse bei der Entwicklung von Wirbelstürmen und deren Abhängigkeit von der Modellauflösung im Rahmen des Klimawandels.

**Teil 1 Zyklonen Statistik:** Nach sorgfältigen Tests der zeitlichen Auflösung und der verschiedenen Parametereinstellungen (Suchradius, Wahrscheinlichkeitsfunktion, Mindestabstand zwischen zwei gleichzeitigen Zyklon Zentren usw.) im Zyklonen Verfolgungsalgorithmus ZYKPAK haben wir aktualisierte, durch Beobachtungen verifizierte, kontinuierliche ERA5-Zyklonverfolgungsdaten für einen längeren Zeitraum von 1959 bis 2021 erstellt. Diese Daten wurden mit anderen Partnern des ClimXtreme-Projekts geteilt und für gemeinsame Studien über (1) serielle Zyklonen Cluster über Westeuropa (Hauser et al., 2023) und (2) Wind-Niederschlag-Verbindungen über Deutschland (Xoplaki et al., 2023) verwendet.

Für die Wirbelsturmbahnen in den GCMs untersuchten wir zunächst die Verzerrung der Bahndichte, indem wir die Differenz zwischen dem Mittelwert der CMIP6-Multimodelle (19 Modelle wurden verwendet) und ERA5 ermittelten. Die Ergebnisse zeigen, dass die CMIP6-Modelle im Vergleich zu ERA5 dazu neigen, die Sturmbahn über dem Nordatlantik zu schwach und über Europa zu zonal ausgedehnt darzustellen, während intensive Wirbelstürme über Nordamerika überbewertet werden. Für die Zukunftsprojektion unter dem Emissionsszenario SSP5-8.5 sind 10 CMIP6-Modelle verfügbar. Die Ergebnisse zeigen eine weit verbreitete Abnahme aller Wirbelstürme (lokal >7 Wirbelstürme weniger pro Jahr) und intensiver Wirbelstürme, außer über einer Region westlich des Vereinigten Königreichs. Wir haben die PTE-Analyse auf historische Ereignisse auf der Grundlage von ERA5 (laufende Arbeiten) angewandt, nicht aber auf CMIP6, da die erforderlichen Variablen mit ausreichend hoher vertikaler Auflösung fehlen.

**Teil 2 Idealisierte ICON-Simulationen und PTE-Analyse:** Was die technischen Errungenschaften betrifft, so haben wir das PTE-Tool verbessert, um die Residuen zu reduzieren und die Recheneffizienz zu erhöhen, was für seine künftige Anwendung bei großen und hochauflösenden Daten von Bedeutung sein kann. Aus wissenschaftlicher Sicht haben wir idealisierte barokline Lebenszyklus-Simulationen mit dem ICON-NWP-Modell unter verschiedenen anfänglichen wärmeren Klimabedingungen durchgeführt, um zu untersuchen, wie sich intensive ETCs in einem wärmeren Klima verändern könnten. Insbesondere konzentrieren wir uns auf zwei Experimente: in Bezug auf das heutige Klima eine gleichmäßige Erwärmung von 4K und ein realistischeres Erwärmungsmuster für das späte 21. Eine detaillierte Bewertung der physikalischen Prozesse, die zur Vertiefung der ETC beitragen, wurde mit Hilfe der PTE-Analyse durchgeführt. Wir untersuchten auch die Abhängigkeit von der horizontalen Modellauflösung, indem wir zwei Versuchsreihen gegenüberstellten, eine mit einem groben Gitterabstand von 80 km und die andere mit konvektionserlaubender Auflösung von 2,5 km. Unsere Ergebnisse zeigten, dass unsere simulierten ETCs in erster Linie baroklin getrieben sind und von der horizontalen Warmluftadvektion in der Luftsäule über dem Oberflächentief dominiert werden. Mit zunehmender Erwärmung und Befeuchtung des Klimas verstärkt sich dieser dominante Antrieb jedoch nur um 10 %. In der Zwischenzeit verdoppelt sich der direkte Beitrag der diabatischen Erwärmung zum Druckabfall an der Oberfläche fast und zeigt eine positive Rückkopplung zur horizontalen Warmluftadvektion. Obwohl ihre kombinierte Reaktion auf die Erwärmung ausgeprägt ist, wird sie durch die verstärkte adiabatische Abkühlung (17 %) aufgrund verstärkter Aufwärtsbewegungen in wärmeren und feuchteren ETCs weitgehend ausgeglichen, was zu einer geringfügigen ETC-Intensivierung im Reifestadium (~ 5 %) führt. Der minimale Kerndruck wird in den wärmeren Experimenten nur mäßig gesenkt um ca. 1,5-4 hPa. Dennoch nehmen die oberflächennahen Auswirkungen zu, und zwar um bis zu 28 % für den gemittelten Niederschlag im Gebiet und um 56 % für lokale Extremniederschläge. Die konvektionserlaubenden und die grobmaschigen Simulationen zeigen qualitativ konsistente ETC-Reaktionen auf die globale Erwärmung. Die systematisch schwächeren ETCs (mit höherem Zentraldruck) in 2,5 km-Simulationen im Vergleich zu 80 km-Simulationen und eine weitere Untersuchung deuten darauf hin, dass dies in erster Linie durch Modellunsicherheiten bei der Darstellung der konvektiv-diabatischen Erwärmung über der Warmfront in der Nähe des Zyklonen Kerns verursacht wird.

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Forschungsarbeiten arbeitete A6 CyclEx unter anderem mit Victoria Sinclair (University Helsinki) and Jennifer Catto (University of Exeter) zusammen.

## A7 VarCluST: Langzeitliche Variabilität und serielles Clustering von schweren Gewittern in einem sich verändernden Klima

M. Augenstein, S. Mohr, M. Kunz

### 1. Aufgabenstellung

Ziel des Teilprojekts A7 VarCluST, den Zusammenhang zwischen SCS und großräumigen atmosphärischen Prozessen in Europa zu untersuchen und den Einfluss dieser Prozesse auf die jährliche Variabilität von SCS sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft genauer zu erforschen. Durch die Erforschung der Wechselwirkungen und Zusammenhänge von SCS mit großräumigen dynamischen Prozessen und Mechanismen – neben der Frage nach Trends der lokal-skaligen konvektiven Wetterextreme im Klimawandel, trug A7 VarCluST wesentlich zu den Zielen des Gesamtprojekts und des Moduls A bei.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde/ 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die statistische Analyse schwerer Gewitter (engl. *severe convective storms,* SCS) wird durch die eingeschränkte Verfügbarkeit homogener Langzeitbeobachtungen und die geringe Vorhersagbarkeit durch numerische Wettervorhersagemodelle erheblich erschwert. Daher stützen sich statistische Auswertungen auf gewitterbezogene Proxys wie beispielsweise Radar-/Satellitendaten oder Umgebungsbedingungen aus Radiosonden Aufstiegen, Reanalysen oder regionalen Klimamodellen (RCMs) (z.B. Mohr und Kunz, 2013; Puskeiler et al., 2016; Punge et al., 2014; Rädler et al., 2017). Diese Studien zeigen praktisch übereinstimmend eine Zunahme des konvektiven Potentials über Deutschland und Europa in den letzten drei Jahrzehnten (z.B. Mohr und Kunz, 2013; Rädler et al., 2017). Für zukünftige Zeiträume deuten die wenigen verfügbaren Studien eine weitere, wenn auch geringe Zunahme des Potentials für SCS an (z.B. Mohr et al., 2015; Púcik et al., 2017; Rädler et al., 2019). Zusätzlich wurde festgestellt, dass großräumige Strömungsbedingungen, wie Telekonnektionen, eine Schlüsselrolle bei der Bildung von SCS im Sommer spielen können (z.B. Piper et al., 2019).

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Grundlage für die Identifikation von SCS in West- und Mitteleuropa bildeten in dem Projekt Blitzdaten (Wolke-Boden Blize) des EUCLID-Netzwerks, die erstmalig Trendanalysen direkter Beobachtungen für einen Zeitraum von 21 Jahren ermöglichten (2001 – 2021, Mai – August). Basierend auf den Blitzdaten wurde daraus zwei Ereigniskataloge abgeleitet: Gitterpunkt-basierte Gewittertage (10 x 10 $km^2$) und sogenannte Gewittercluster mit hoher Blitzdichte (engl. *convective clustered events*, CCE). Letztere wurden mithilfe eines dichte-basierten Clusteralgorithmus in der Raum- und Zeitebene identifiziert (engl. *spatial-temporal density based spatial clustering of applications with noise*, ST-DBSCAN). Der so gewonnene, bisher einzigartige CCE-Datensatz erlaubte es, eine detaillierte statistische Analyse der jährlichen Entwicklung verschiedener Entitäten der Gewittercluster (z.B. Größe, Dauer) vorzunehmen. Die Gitterpunkt-basierten Trendanalysen der Gewittertage zeigen vorwiegend eine signifikante

Abnahme in einem Gebiet vom südlichen Frankreich, dem Zentralmassiv, den Vogesen bis nach Deutschland in die Eifel hinein (Abb. 7.1a). Außerdem zeigen Trendanalysen der CCEs eine Zunahme von räumlich kleineren und kürzer andauernden CCEs bei gleichzeitiger Abnahme von sehr großen und lange andauernden CCEs. Dies lässt Rückschlüsse darauf ziehen, dass die Abnahme der Gewittertage durch eine Abnahme großer konvektiver Systeme – gegenüber der (leichten) Zunahme kleiner Ereignisse – erklärt werden könnte.

Im nächsten Schritt wurden Zusammenhänge zwischen der Gewitterhäufigkeit und großräumigen (dynamischen) Prozessen und Strömungsmustern untersucht, um die (hohe) jährliche Variabilität bzw. das Änderungssignal der Gewitteraktivität besser zu verstehen. Im besonderen Fokus standen dabei verschiedene Telekonnektions Muster, aber auch Strömungseigenschaften in der mittleren Troposphäre (z.B. anhand von Wetterregimen). So weisen die jährlichen Anomalien der Nordatlantischen Oszillation (NAO) vor allem in der Dekade von 2011 bis 2020 eine ungewöhnliche Häufung von Jahren mit überwiegend negativen NAO-Werten (Mai – August) auf. Eine statistische Analyse des Zusammenhangs zwischen Jahren mit überwiegend negativen NAO-Werten und der Gewitteraktivität ergab zudem eine Verminderung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Gewittertagen – insbesondere in Teilen Frankreichs, das größtenteils deckungsgleich mit dem Gebiet der oben genannten signifikanten negativen Trends ist. Zusätzlich zeigt eine Clusteranalyse der Strömung in der mittleren Atmosphäre ein geringeres Auftreten konvektions-fördernder Strömungs-situation (südwestliche Anströmung feucht-warmer Luftmassen) in Jahren mit negativen NAO-Werten. Dieser Zusammenhang zur NAO, die bevorzugt in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums negative Werte zeigt, ist eine mögliche Erklärung für die oben beschriebenen negativen Trends der Gewittertage in West- und Mitteleuropa. Zudem kommt es in Jahren mit negativen NAO-Werten vermehrt zu räumlich kleineren Gewitterclustern mit kürzerer Lebenddauer gegenüber Jahren mit positiven NAO-Werten. Analysen weiterer Telekonnektions Indizes, wie beispielsweise East Atlantic Pattern (EA) oder Scandinavian Pattern (SCAND), zeigen ebenfalls regional vereinzelt Zusammenhänge zur Gewitterhäufigkeit, die allerdings aufgrund der hohen monatlichen Variabilität und der Länge der untersuchten Zeitreihen nur eine geringe Signifikanz des Signals ergeben.

Daran anschließend wurden der Zusammenhang zwischen der Auftretenswahrscheinlichkeit der CCEs und dominanten Wetterregimen (basierend auf Grams et al., 2017) untersucht. Letztere beschreiben die Variabilität der großräumigen atmosphärischen Zirkulation (Strömungsmuster) und sind bestimmend für die regionalen Wetterbedingungen am Boden (z. B. Windgeschwindigkeit, Temperatur, Sonneneinstrahlung) über mehrere Tage. Insbesondere das Wetterregime *Scandinavian Blocking* weist den Analysen zufolge auf eine erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit der Gewitterhäufigkeit im gesamten Untersuchungsgebiet hin. Ebenso wird beobachtet, dass dieses Regime die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von seriellem Clustering von CCEs erhöht. Auch andere Regime zeigen – allerdings regional differenzierter – statistisch signifikante Zusammenhänge. Beispielsweise sorgt das Regime *European Blocking* für eine erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit von CCEs im Mittelmeerraum bei gleichzeitiger Abnahme über der Ostsee und dem Norden Deutschlands. Bezüglich des Auftretens von seriellem Clustering von CCEs sorgen andere Blocking Regime wie das *European Blocking* oder das *Greenland Blocking* ebenfalls für eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit – allerdings regional begrenzter und im Allgemeinen betragsmäßig geringer als beim *Scandinavian Blocking*.

Abschließend wurde der Frage nachgegen, ob basierend auf Klimasimulationen (CESM, RCP8.5, 35 Modellläufe, 1990 – 2000 vs. 2090 - 2100) zukünftig eine Zu- oder Abnahme der verschiedenen Regime und damit einhergehend eine Änderung der Gewitterwahrscheinlichkeit zu erwarten ist. Erste Ergebnisse zeigen eine leichte Zunahme des *European Blocking*, welches im Zusammenhang mit einer

erhöhten Auftretenswahrscheinlichkeit von CCEs im Mittelmeerraum und einer Reduktion im Norden Deutschlands steht.

### Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund ähnlicher Fragestellungen gab es verschiedene Kooperationen mit anderen Teilprojekten in allen drei Modulen. Im Rahmen der themenspezifischen Gruppen leistete das Projekt A7-VarCluST Beiträge für die Gruppen *'Precipitation and indices*' (PI; Caldas-Alvarez et al., 2022) und *'Compound events'* (CE; Xoplaki et al., 2023). Neben dem wissenschaftlichen Austausch während den offiziellen ClimXtreme-Treffen fanden zudem mehrere Videokonferenzen mit anderen Projekten statt, um Methoden, Ansätze und Ergebnisse zu diskutieren (z.B. B1.2-AXE_G, B2.3-CHECC, B2.5-IDF-AF, C2-CARLOFFF).