

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	SPIRIT
Langtitel:	Supporting climate service Providers by distilling information about future precipitation extremes
Zitervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	ACRP11
Dauer:	01.10.2019 bis 31.12.2023
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	University of Graz, Wegener Center for Climate and Global Change - Assoc. Prof. Dr. Douglas Maraun
Kontaktperson Name:	Douglas Maraun
Kontaktperson Adresse:	Wegener Center für Klima und Globalen Wandel Brandhofgasse 5, 8010 Graz
Kontaktperson Telefon:	0316380-8448
Kontaktperson E-Mail:	douglas.maraun@uni-graz.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	GeosphereAustria (ZAMG) Dr. Andreas Gobiet (Wien/Steiermark)
Schlagwörter:	
Projektgesamtkosten:	249.971 €
Fördersumme:	249.971 €
Klimafonds-Nr:	KR18AC0K14748
Erstellt am:	01.03.2024

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Starkniederschläge sind eine große Naturgefahr und können schwerwiegende Auswirkungen haben. Es wird erwartet, dass sich die Eigenschaften extremer Niederschläge infolge der anthropogenen globalen Erwärmung ändern werden, doch Projektionen des zukünftigen Wasserkreislaufs sind höchst unsicher. Verschiedene Datenquellen zu solchen Änderungen liefern, insbesondere auf der regionalen Skala und für Niederschläge, zumindest scheinbar widersprüchliche oder unplausible Ergebnisse. Daher wurde der Ruf nach Destillation von Klimainformation laut. SPIRIT hat solch eine Destillation für Extremniederschläge durchgeführt, basierend auf verfügbaren Modellensembles, inklusive aktueller konvektionserlaubender Regionalmodelle (RCMs), physik-basierten konzeptionellen Modellen, prozess-basierter Modellevaluation und der Zerlegung und Attribution von Projektionsunsicherheiten. Die Ziele von SPIRIT waren

- 01** mit regionalen operativen Meteorologen des österreichischen Wetterdienstes, die auch als Klimaberater fungieren, zusammenarbeiten um lokale klimatische Verhältnisse und Informationsbedürfnisse in Bezug auf extreme Niederschläge zu bewerten, Wissen auszutauschen und die Ergebnisse als operationelle Climate Services bereitzustellen;
- 02** die Einflüsse von groß- und kleinskaligen Modellfehlern und interner Variabilität auf Änderungen von Extremniederschlägen verstehen;
- 03** ein großes Ensemble von Änderungen in extremen Niederschlägen konstruieren, das verschiedene aktuelle Modell-Ensembles, Beobachtungsdaten und meteorologisches Expertenwissen kombiniert;
- 04** glaubwürdige Informationen über Änderungen in lokalen extremen Niederschlagsereignissen zu destillieren, diese Informationen mit den regionalen ZAMG-Klimaberatern zu untersuchen und zu interpretieren, regionsspezifische Narrative entwickeln, die für Endnutzer weiter zugeschnitten werden können, und Wissenslücken identifizieren;
- 05** ein Konzept für die Destillation von Klimainformationen entwickeln und Schulungen für Klimadienstleister in ganz Österreich anbieten;
- 06** die daraus resultierenden Informationen an Nutzergruppen und die breitere Öffentlichkeit weitergeben.

Die wichtigsten Ergebnisse waren

- Projektionen extremer Tagesniederschläge sind wesentlich unsicherer als Projektionen des mittleren Niederschlags. Dennoch sind sie über eine Reihe von Modell-Ensembles hinweg in den meisten Jahreszeiten für die meisten Regionen Europas im Vorzeichen konsistent. Sommerprojektionen sind jedoch selbst im Vorzeichen sehr unsicher.
- Atmosphärendynamik ist die wichtigste Unsicherheitsquelle für Projektionen extremer Tagesniederschläge, insbesondere im Sommer.

- Für die aktuellen EURO-CORDEX- und ÖKS15-Projektionen schlagen wir vor, die Simulationen des IPSL-CM5A-MR/WRF331F zu verwerfen.
- CMIP6 verringert die Projektionsunsicherheiten von extremen Tagesniederschlägen im Vergleich zu CMIP5.
- Für die Alpen zeigen die Projektionen extremer Tagesniederschläge durchweg positive Trends zu höheren Intensitäten, und die verschiedenen Modelltypen und -ansätze kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Nur für den Sommer hängen die Projektionen stark von der Modellauflösung ab. Unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse können die Unsicherheiten verringert werden, und auch für den Sommer wird ein Anstieg erwartet.
- Ein wichtiger Schwerpunkt von SPIRIT war die Verwendung mehrerer Evidenzlinien, wie sie auch im jüngsten IPCC-Bericht propagiert wird. Der Vergleich verschiedener Generationen von GCMs, RCMs, konvektionsauflösender RCM-Ensembles und zwei physikalisch basierter konzeptioneller Ansätze hat das Vertrauen in die Ergebnisse stark erhöht.
- Die Daten der Feuerwehren stellen eine nützliche und relevante Ergänzung zu den direkten Beobachtungsdaten dar. Sie haben sich nicht nur für Nowcasting, sondern auch für die Klimawissenschaft als Referenzdaten als wertvoll erwiesen.
- Wie die Prognosen für extreme Niederschlagsereignisse im Sommer zeigen, ist Prozessverständnis essenziell zur Gewinnung verlässlicher Klimainformationen.
- Der Climate-Service-Ansatz mit Klimaberatern als operative Multiplikatoren hat sich als sehr vielversprechend erwiesen. Er ermöglicht eine nachhaltige Interaktion sowohl zwischen Klimawissenschaftlern und Klimaberatern als auch zwischen Klimaberatern und lokalen Nutzern.
- Die Erkenntnisse von SPIRIT sind in die Abschnitte über die Climate Information Distillation und Climate Services im jüngsten Bericht des IPCC AR6 WG1 sowie in die EURO CORDEX-Auswahl der CMIP6-GCMs eingeflossen.

Weitere Bemühungen sind notwendig um Climate Information Distillation zu etablieren. Dies erfordert einen besseren Austausch zwischen den GCM und RCM Communities, speziell im Hinblick auf prozessbasierte Modellevaluation und GCM Selektion. Weitere Forschung ist auch nötig zur Repräsentation lokaler Prozesse in hochauflösenden RCMs. Solche Studien benötigen einen besseren Datenaustausch von 3-dimensionalen subtäglichen Feldern. Emulatoren können eine Schlüsselrolle bei der statistischen Kombination gut funktionierender GCMs mit gut funktionierenden RCMs spielen. Solche Ansätze können auch die Destillation unterstützen, indem sie die Ergebnisse verschiedener Modelltypen zu einem gemeinsamen Typ von hochauflösenden Ergebnissen zusammenführen.

2 Executive Summary

Heavy precipitation is a major natural hazard and may cause severe impacts. The character of extreme precipitation is expected to change in response to anthropogenic global warming. But projections of the future water cycle are highly uncertain, and different available data sources about such changes provide, in particular at the regional scale and for precipitation, at least apparently contradicting and sometimes implausible conclusions. Hence a call for climate information distillation (CID) has emerged at the interface between the climate modelling and the impacts, adaptation and vulnerability (IAV) community. SPIRIT has conducted such a distillation for extreme precipitation building upon a range of available model ensembles, including newly available convection permitting regional climate models (RCMs), physics-based conceptual models, a process-based model evaluation and the separation and attribution of projection uncertainties. The specific objectives of SPIRIT were:

- 01** engage with regional operational weather forecasters of the Austrian weather service ZAMG (now GeoSphere Austria), who also act as climate consultants, to assess local climatic challenges and information needs regarding extreme precipitation, to exchange knowledge throughout the project, and to operationalise the results in climate service provision;
- 02** understand the influences of large- and small-scale model errors and internal variability on changes of extreme precipitation;
- 03** construct a grand ensemble of changes in extreme precipitation that combines different state-of-the-art and cutting-edge model ensembles, observational evidence and meteorological expert understanding;
- 04** distil credible information about changes in local extreme precipitation events, explore and interpret this information with the regional GeoSphere climate consultants, develop region-specific narratives that can be further tailored for end-users, and identify knowledge gaps;
- 05** develop a framework for climate information distillation and provide training for climate service providers across Austria;
- 06** disseminate and communicate the resulting information to stakeholders and the wider public.

It was found that

- Projections of extreme daily precipitation are substantially more uncertain than projections of mean precipitation. Nevertheless, they are consistent in sign across a range of model ensembles over most seasons for most regions of Europe. Summer projections, however, are highly uncertain even in sign.

- Atmospheric dynamics are the most important source of projection uncertainties of extreme daily precipitation, in particular during summer.
- For the current EURO-CORDEX and ÖKS15 projections we suggest to discard the simulations of the IPSL-CM5A-MR/WRF331F.
- The CMIP6 ensemble of global climate models (GCMs) reduces projection uncertainties in extreme daily precipitation compared to CMIP5.
- For the Alps, projections of extreme daily precipitation show consistently positive trends towards higher intensities, and different model types and approaches come to similar conclusions. Only for summer, projections depend strongly on model resolution. Considering process understanding uncertainties can be reduced, and an increase also for summer is expected.
- A key focus of SPIRIT was the use of multiple lines of evidence, as also propagated in the most recent IPCC report. The comparison of different generations of GCM, RCM, convection permitting RCM ensembles and two physics-based conceptual approaches strongly increased the confidence in the results.
- Data from the fire brigades provide a useful and relevant line of evidence in addition to direct observational data. They have been shown to be valuable not only for nowcasting but also for climate science as reference data.
- Process-understanding is key to distill trustworthy climate information, as demonstrated by the projections for summer extreme precipitation events.
- The climate service approach with climate consultants as operational multipliers has proven to be very promising. It allows for a sustained interaction between both climate scientists and climate consultants as well as climate consultants and local stakeholders.
- SPIRIT insights have entered the distillation and climate service sections in the most recent IPCC AR6 WG1 report as well as the EURO CORDEX selection of CMIP6 GCMs.

Further efforts are required to mainstream climate information distillation. This requires a better knowledge exchange between the GCM and RCM communities, in particular with respect to process-based model evaluation and model GCM selection. Further research is also required on the representation of local processes in high resolution RCMs. To enable such evaluation studies, data exchange needs to be improved to enable the analysis of 3-dimensional sub-daily fields. Statistical emulators could play a key role in statistically combining well performing GCMs with well performing RCMs. Such approaches can also aid distillation by unifying output from different model types into a common type of high-resolution output.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Starkniederschläge sind eine große Naturgefahr und können schwerwiegende Auswirkungen haben, die von Sturzfluten über Hangrutschungen bis hin zu Muren reichen (APCC, 2014). Es wird erwartet, dass sich die Eigenschaften extremer Niederschläge infolge der anthropogenen globalen Erwärmung ändern werden.

Dennoch sind Projektionen des zukünftigen Wasserkreislaufs und insbesondere von Starkniederschlägen höchst unsicher. Es gibt viele Datenquellen zu solchen Änderungen (Barsugli et al. 2013): verschiedene Generationen von Ensembles globaler und regionaler Klimamodelle (GCMs und RCMs), Projektionen, die auf statistischem Downscaling beruhen, Extrapolationen von beobachteten Trends und Expertenwissen. Diese Quellen liefern, insbesondere auf der regionalen Skala und für Niederschläge, zumindest scheinbar widersprüchliche Ergebnisse (Hewitson et al. 2014). Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass operationelle RCMs Änderungen in extremen Sommerniederschlägen nicht abbilden (Kendon et al. 2014; Kendon et al., 2017; Meredith et al. 2015).

Daher wurde an der Schnittstelle zwischen der Klimamodellierung und der Klimafolgenforschung der Ruf nach Destillation von Klimainformation (Climate Information Distillation, CID) laut. Das Ziel von CID ist es, Datenprodukte mit artikuliertem Vertrauen bereitzustellen, indem (1) mehrere Datenquellen verstanden und integriert werden; (2) Fehlereinflüsse auf die resultierende Unsicherheit bewertet werden; und (3) das Thema aus der Nutzerperspektive angegangen wird (Hewitson 2016).

In Österreich bietet ÖKS15 ein Standard-Ensemble von Projektionen mit einer Auflösung von 12 km auf der Grundlage der EURO-CORDEX-Simulationen (Jacob et al. 2014), das leicht zugänglich ist und daher wahrscheinlich in Klimafolgenstudien verwendet wird. Ein neues Ensemble konvektionsauflösender RCM-Simulationen für Mitteleuropa wurde mit Unterstützung des ACRP EASICLIM-Projekts im Rahmen der CORDEX Flagship Pilot Study (FPS) zu Konvektion erstellt (Coppola et al., 2021).

In der Praxis ist die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern und tatsächlichen Nutzern aufgrund begrenzter Kapazitäten und Ressourcen auf ausgewählte Projekte beschränkt. Daher ist es wichtig, die Anbieter von Klimadienstleistungen in den Destillationsprozess einzubeziehen, um sie in die Lage zu versetzen, die Informationen weiter an die tatsächlichen Nutzer anzupassen.

Zielsetzung des Projekts

Die Ziele des SPIRIT Projekts lauten deshalb wie folgt:

- 01** mit regionalen operativen Meteorologen des österreichischen Wetterdienstes, die auch als Klimaberater fungieren, zusammenarbeiten um lokale klimatische Verhältnisse und Informationsbedürfnisse in Bezug auf extreme Niederschläge zu bewerten, Wissen während des Projekts auszutauschen und die Ergebnisse als operationelle Climate Services bereitzustellen;
- 02** die Einflüsse von groß- und kleinskaligen Modellfehlern und interner Variabilität auf Änderungen von Extremniederschlägen verstehen;
- 03** ein großes Ensemble von Änderungen in extremen Niederschlägen konstruieren, das verschiedene aktuelle Modell-Ensembles, Beobachtungsdaten und meteorologisches Expertenwissen kombiniert;
- 04** glaubwürdige Informationen über Änderungen in lokalen extremen Niederschlagsereignissen zu destillieren, diese Informationen mit den regionalen ZAMG-Klimaberatern zu untersuchen und zu interpretieren, regionsspezifische Narrative entwickeln, die für Endnutzer weiter zugeschnitten werden können, und Wissenslücken identifizieren;
- 05** ein Konzept für die Destillation von Klimainformationen entwickeln und Schulungen für Klimadienstleister in ganz Österreich anbieten;
- 06** die daraus resultierenden Informationen an Nutzergruppen und die breitere Öffentlichkeit weitergeben.

4 Projektinhalt und Ergebnisse

Die Projektarbeit wurde in 5 wissenschaftlichen Arbeitspaketen (WPs) organisiert. Die Ergebnisse dieser Arbeitspakete werden im Folgenden erörtert.

2.2.3.1 Integration, Kommunikation und Climate Services (WP2)

Dieses Arbeitspaket überwacht die Interaktion der Beteiligten und organisiert geeignete Maßnahmen für Co-Design, Co-Produktion und Co-Exploration.

Ein Hauptziel dieses Arbeitspakets war die Einbindung regionaler operativer Meteorologen des österreichischen Wetterdienstes GeoSphere, die auch als Klimaberater tätig sind. Diese Experten verfügen über ein fundiertes Wissen über die regionalen klimatischen Bedingungen sowie über typische Auswirkungen und Bedürfnisse regionaler Nutzer. Die Erkenntnisse dieses Arbeitspaketes hinsichtlich der Herausforderung, Informationen aus dem Co-Design-Prozess für viele Nutzer zu optimieren, flossen in den jüngsten Bericht der IPCC AR6 Working Group 1 ein, nämlich in die Cross Chapter Box 12.2: Climate Services and Climate Change Information, mitverfasst von D. Maraun.

Vorbereitung des Co-Designs und Workshop

Plan zur Einbeziehung der Interessenvertreter. Vor Beginn der Co-Design-Aktivitäten wurde ein Plan zur Einbindung der Stakeholder mit vier Hauptsäulen (Nutzergruppen) entwickelt. Um die Effizienz der Verbreitung zu erhöhen, lag der Schwerpunkt auf den so genannten "Super-Stakeholdern" (Multiplikatoren). Dies sind zum einen die regionalen und nationalen Klimawandelberater von GeoSphere (Säule eins) und zum anderen die Gestalter von Klimadienstleistungen für verschiedene Sektoren (Säule zwei). Säule drei steht für die angewandte Klimafolgenforschung und Säule vier für den spezifischen Bereich des Katastrophenmanagements.

- **Säule eins** konzentriert sich auf **Multiplikatoren** für bestimmte Nutzer und die Öffentlichkeit. Diese Gruppe besteht aus regionalen Klimaberatern (zuständig für Gutachten, allgemeine Beratung zum Klimawandel und Präsentationen vor unterschiedlichem Publikum von der Gemeinde- bis zur Landes- und Bundesebene) und operativen Meteorologen mit täglichem Kontakt zu den Medien. Drei operationelle Meteorologen mit einer Zusatzausbildung in Klimawandelberatung wurden ausgewählt, um diese Gruppe zu vertreten.
- **Die zweite Säule** konzentriert sich auf die **Anbieter von Climate Services** für spezifische Anwendungen/Sektoren. Diese Gruppe wird durch die Leiter

der Abteilungen Klimafolgenforschung und Klimadienstleistungen von GeoSphere Austria vertreten.

- **Säule drei** konzentriert sich auf **Impaktforscher** und wird von Mitgliedern der Technischen Universität Graz (Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau) und der Steiermärkischen Landesstelle für Hydrographie vertreten.
- **Die vierte Säule** konzentriert sich auf die Nutzer im Bereich des **Naturkatastrophenmanagements** und wird durch die Landesleitzentrale der Feuerwehr (zuständig auch für Hochwassereinsätze) und der Holding Graz (zuständig für die Planung des Stadtnähsystems) vertreten.

Kontaktaufnahme mit relevanten Stakeholdern. Es wurden verschiedene Stakeholder kontaktiert und sieben Personen ausgewählt, die sich bereit erklärt haben, dem Stakeholder Board von SPIRIT beizutreten: Heinz Reinbacher (Landesfeuerwehrkommando, Landesleitzentrale Stmk.), Dirk Muschalla (TU Graz, Inst. für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau), Werner Sprung (Holding Graz), Hildegard Kaufmann (GeoSphere Österreich, Leiterin der Abteilung Klimadienste), Alexander Ohms (GeoSphere Österreich, Regionalbüro Salzburg und Oberösterreich), Andreas Gobiet (GeoSphere Österreich, Regionalbüro Steiermark, Mitglied des SPIRIT-Projektteams), Alexander Ohms (GeoSphere Österreich, Regionalbüro Salzburg und Oberösterreich), Andreas Gobiet (GeoSphere Österreich, Regionalbüro Steiermark, Mitglied des SPIRIT-Projektteams), Hannes Rieder (GeoSphere Österreich, Regionalbüro Steiermark), Christian Pehsl (GeoSphere Österreich, Regionalbüro Steiermark).

Co-Design-Workshop. Der Planungsworkshop mit den Stakeholdern wurde am 17.5.2020 durchgeführt (15 Teilnehmer, Projektmitglieder und Stakeholder-Beirat; aufgrund von COVID-19 Beschränkungen im virtuellen Format). Vertreter aller vier Säulen der Stakeholder und das Projektteam diskutierten und definierten die Stakeholder-Anforderungen. Das daraus resultierende **Stakeholder-Anforderungsdokument** war ein wichtiger Leitfaden für die Forschungsaktivitäten innerhalb von SPIRIT.

Dialog mit den "Super Stakeholdern"

Während der Laufzeit von SPIRIT wurde eine intensive Kommunikation mit den Super-Stakeholdern über viele informelle Kontakte (hauptsächlich das Projektteam, das auf Ad-hoc-Informationsanfragen von Klimawandel-Beratern reagierte) und zwei größere **Co-Exploration Workshops** aufrechterhalten: Workshop eins wurde in Wien abgehalten (5.4.2020) und beinhaltete eine Präsentation über den Stand des Wissens über die Auswirkungen des Klimawandels auf extreme Niederschläge sowie eine Diskussion über aktuelle Wissenslücken. Workshop zwei fand online (mehr als 20 Teilnehmer) am 19.12.2023 statt, beinhaltete einen Vortrag über zukünftige Szenarien

konvektiver Extremniederschläge (basierend auf SPIRIT-Ergebnissen, G. Pistotnik) und wurde ergänzt durch vorläufige Ergebnisse einer neuen Studie über Trends in Niederschlagsextremen in Österreich basierend auf untertägigen Beobachtungsdaten (K. Haslinger). Beide Präsentationen ergaben einen umfassenden Überblick über vergangene und zukünftige Trends bei extremen Niederschlägen. Eine anschließende Diskussion diente dazu, die wichtigsten unterstützenden Materialien zu identifizieren, die von den Klimawandelberatern benötigt werden.

Vorbereitung von Material für Climate Service Anbieter

Basierend auf den Ergebnissen des Stakeholder-Workshops im ersten Projektjahr wurde ein technischer Leitfaden für Klimadienstleister entwickelt, der hauptsächlich technische Aspekte der von verschiedenen Sektoren benötigten Informationen zum Klimawandel enthält. Auf der Grundlage der Ergebnisse der kontinuierlichen Diskussion mit den Klimaberatern während des Projekts wurde unterstützendes Material für ihre Arbeit erstellt. Dazu gehören eine kurze wissenschaftliche Zusammenfassung über die Auswirkungen des Klimawandels auf extreme Niederschläge (die sich an wissenschaftlich geschulte Personen richtet) und ein modularer Satz von Präsentationsfolien. Beide stützen sich nicht nur auf die Ergebnisse von SPIRIT, sondern bieten auch einen allgemeineren Überblick über den aktuellen Stand des Wissens zu extremen Niederschlägen im Klimawandel. Darüber hinaus wurde mit dem Climate Change Centre Austria (CCCA) vereinbart, dass dieses Material in einem CCCA-Factsheet (<https://ccca.ac.at/wissenstransfer/fact-sheets>) zusammengefasst und im Herbst 2024 über die CCCA-Kanäle einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Disseminationsworkshop für Stakeholder

Die Verbreitung der Ergebnisse an die Stakeholder der Säulen drei und vier sowie an eine breitere Gruppe von Praktikern in den Bereichen Siedlungswasserwirtschaft und Gebäudesicherheit erfolgte durch eingeladene Vorträge auf **drei Fachtagungen**: Fachtagungen "Regenwasser und Abwasser im Klimawandel", 11.10.2023 in Wien und 12.10.2023 in Graz; Fachtagung "Fachtagung - Linzer Brandschutz- und Gebäudesicherheitstage". Über diese Konferenzen konnten mehrere hundert Key-Stakeholder angesprochen werden.

2.2.3.2 Großräumige Änderungen (WP3)

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war es, Änderungen und Unsicherheiten in den großräumigen Prozessen, die extreme Niederschläge steuern, besser zu verstehen.

Unterschiede zwischen Änderungsmustern

Ursprünglich war dieser Task einem Vergleich der Änderungen in extremen Niederschlägen nur in ENSEMBLES und EURO-CORDEX RCMs gewidmet. Zusätzlich betrachteten wir jedoch auch Änderungen, die von einer Reihe relevanter GCMs simuliert wurden. Konkret haben wir die GCM-Ensembles CMIP3 (Meehl et al., 2007), CMIP5 (Taylor et al., 2012), CMIP6 (Eyring et al., 2016) und das von CMIP6 unterstützte HighresMIP (Haarsma et al., 2016) sowie die RCM-Ensembles ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell, 2009) und EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014, 2020) mit Randbedingungen von CMIP3 bzw. CMIP5 betrachtet. Um den Vergleich von GCM- und RCM-Ensembles zu erleichtern, betrachten wir zusätzlich Untermengen derjenigen CMIP3- und CMIP5-GCMs, die als Randbedingungen für ENSEMBLES und EURO-CORDEX verwendet wurden. Um den Einfluss der internen Variabilität zu minimieren, haben wir für die meisten Ensembles das stärkste Szenario verwendet: das SRES A1B-Szenario für CMIP3 und ENSEMBLES, das RCP8.5-Szenario für CMIP5 und EURO-CORDEX und das SSP5-8.5-Szenario für CMIP6. Im Falle der SRES-Szenarien haben wir aufgrund der Datenverfügbarkeit nicht das stärkste Szenario A2, sondern A1B verwendet, um so viele Modelle jedes Ensembles wie möglich einzubeziehen zu können. Um einen direkten Vergleich der verschiedenen Szenarien zu ermöglichen, haben wir die simulierten Änderungen pro Grad Kelvin Erwärmung ausgedrückt (d. h. implizit unter Verwendung eines Patternscaling-Ansatzes).

Abbildung 1 zeigt die simulierten mittleren Änderungen der extremen Niederschläge, gemessen durch den 20-Jahres-Wiederkehrwert, separat für jede Jahreszeit. Die projizierten Änderungen sind fast überall positiv oder vernachlässigbar, was die dominante Rolle der Clausius-Clapeyron-Beziehung für extreme Niederschläge in vielen europäischen Regionen verdeutlicht. Obwohl das Vorzeichen des Signals weitgehend konsistent und robust ist, unterscheidet sich das tatsächliche Ausmaß zwischen den Ensembles, wobei EURO-CORDEX den stärksten Anstieg simuliert.

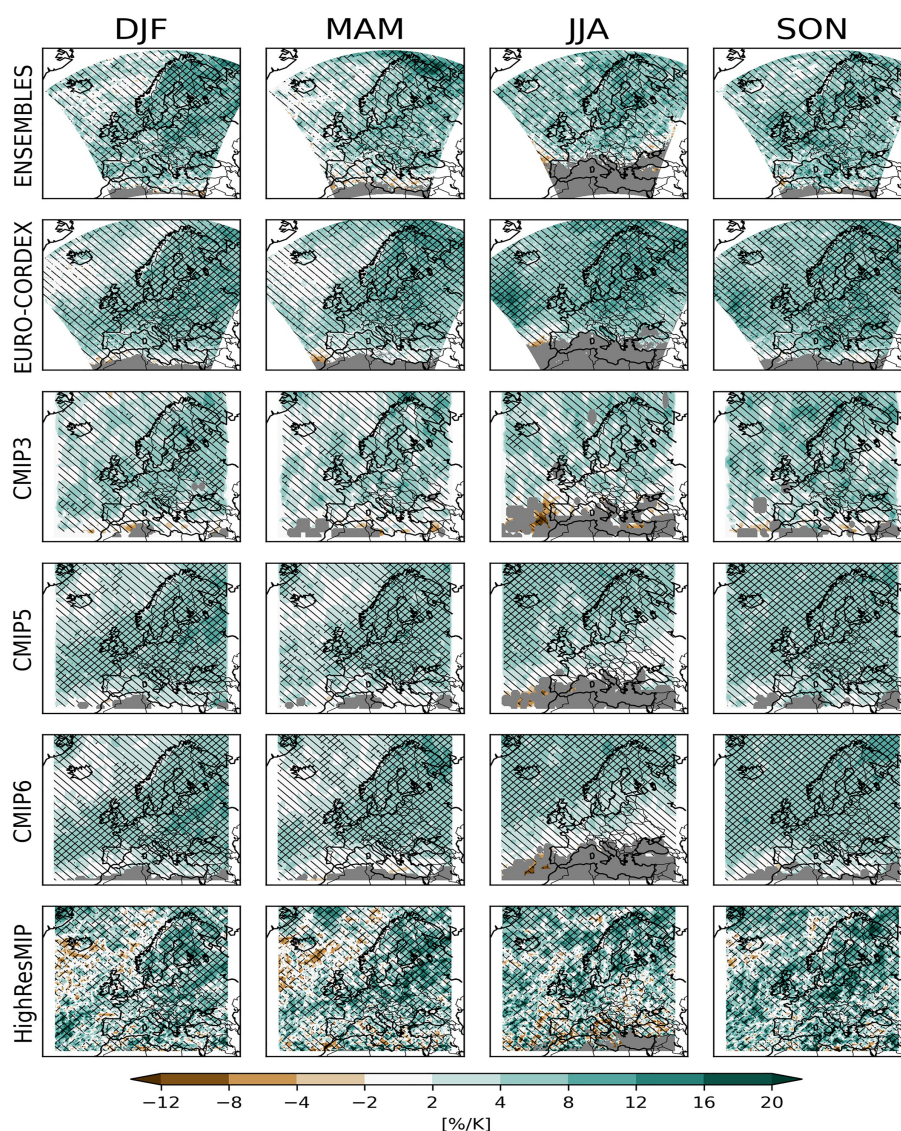


Abbildung 1:
 Ensemblemediane
 der saisonalen
 Änderungen in
 Niederschlags-
 extremen pro Grad
 Erwärmung [% K -
 1]. Die Schraffur
 zeigt Gebiete mit
 robusten ("/") und
 signifikanten ("\\")
 Änderungssignalen.
 Aus Ritzhaupt &
 Maraun (2023).

Die regionalen Änderungen sind in den meisten Ensembles für die meisten Regionen und Jahreszeiten weitgehend konsistent (Abbildung 2). Über den Alpen zeigt sich eine klare Abhängigkeit von der Modellauflösung: Während alle GCMs mit Standardauflösung keine Änderungen in Extremen täglicher Sommerniederschläge projizieren, simulieren die RCM-Ensembles ENSEMBLES und EURO-CORDEX sowie die hochauflösenden GCMs von HighResMIP alle eine Zunahme dieser Ereignisse. Dieses Resultat bestätigt die Ergebnisse von Giorgi et al. (2016), die feststellten, dass RCMs Änderungen sommerlicher konvektiver Niederschläge in den Alpen aufgrund einer erhöhten potenziellen Instabilität durch einen wärmeren und feuchteren Boden in hohen Lagen realistischer simulieren als GCMs.

Zusätzlich haben wir die paarweise Überlappung der verschiedenen Ensembles analysiert (Ritzhaupt & Maraun, 2023 für Details).

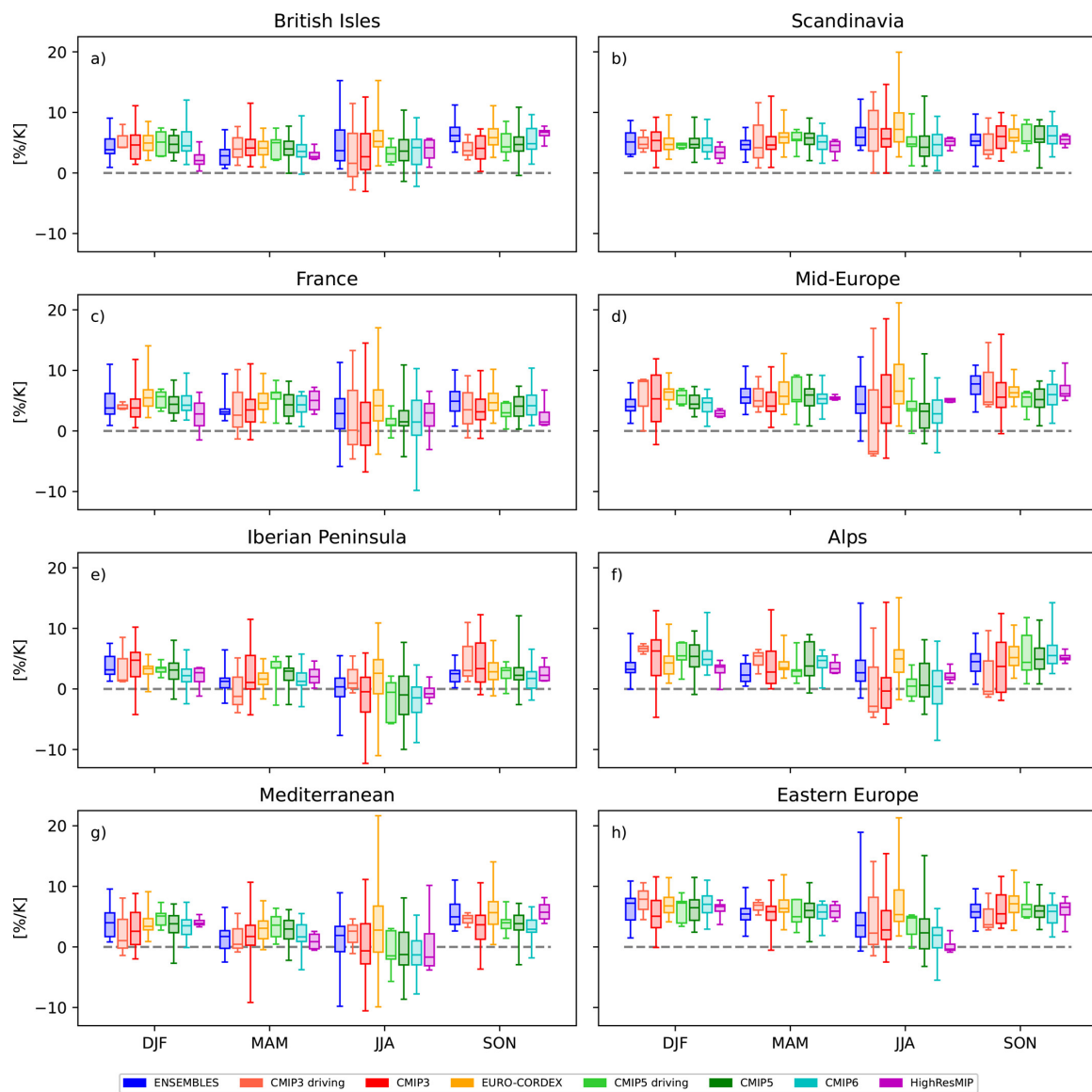


Abbildung 2: Verteilung der mittleren Änderungen der saisonalen Extremniederschläge [% K⁻¹] für europäische Unterregionen. Der Median des Ensembles ist als dicke Linie dargestellt, die Boxen decken den Bereich zwischen dem 25. und 75. Perzentil ab. Für CMIP3 und CMIP5 ist die gesamte Bandbreite der Modelle dargestellt sowie die entsprechenden Sub-Ensembles, die als Antrieb der ENSEMBLES bzw. EURO-CORDEX RCMs verwendet werden. Aus Ritzhaupt & Maraun (2023).

Identifizierung der synoptisch-skaligen Einflussfaktoren; Evaluation anhand von Reanalysen

Wir untersuchten synoptische Wassertypen (Lamb Weathertypes, Jones, 1993) über Mitteleuropa, ihre Rolle für Extremniederschläge über den Alpen und ihre Häufigkeitsbiase in CMIP5/EURO CORDEX Modellen (die in den österreichischen Klimaprojektionen ÖKS15 verwendet werden) sowie in CMIP6 Modellen.

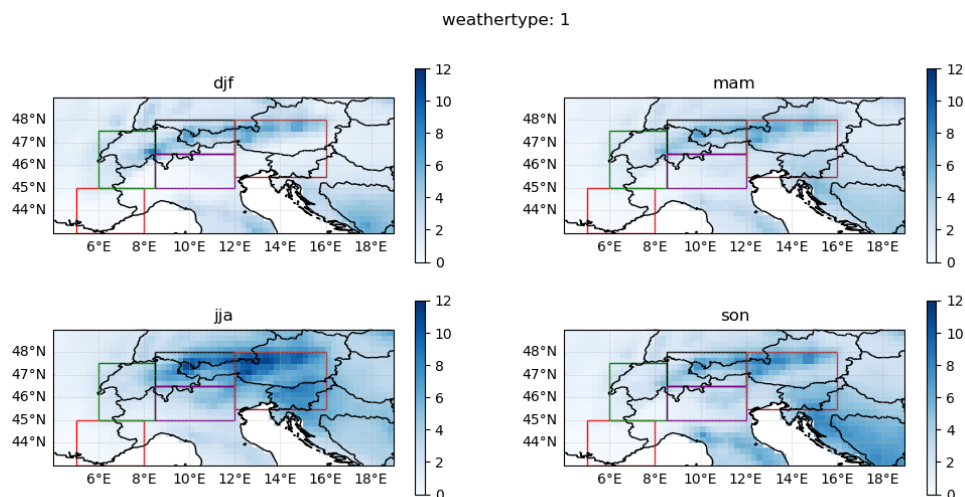


Abbildung 3: Niederschläge in den Alpen bei Nordströmung in den vier Jahreszeiten.

Als Beispiel zeigt Abbildung 3 die Niederschlagsintensitäten an Tagen mit nördlicher Strömung (Wettertyp 1). Dieser Wettertyp führt eindeutig zu einer sogenannten Stau-Wetterlage mit starken Niederschlägen am Alpennordrand. Abbildung 4 zeigt die Biase im Auftreten von Wettertypen für die im ÖKS15-Ensemble verwendeten CMIP5/CORDEX-Modelle. Es wird deutlich, dass ein Modell schlechter abschneidet als alle anderen, während einige Wettertypen von vielen Modellen überrepräsentiert werden (WT6, schwacher Südwind und WT5, Südwind) und andere unterrepräsentiert sind (WT2, Ostwind und WT1, Nordwind). Die CMIP6-Modelle verbessern die Darstellung dieser Wettertypen (nicht gezeigt).

Schließlich haben wir mögliche planetarische Einflüsse auf extreme Niederschläge über Europa in CMIP5- und CMIP6-Modellen analysiert. Modelle mit einer starken polaren Amplifikation zeigen einen starken Anstieg der sommerlichen Extremniederschläge über weiten Teilen Europas einschließlich Österreichs, während Modelle mit einer starken tropischen Amplifikation das gegenteilige Signal zeigen. Beide Ergebnisse sind zu erwarten: eine starke arktische Amplifikation erwärmt die untere Atmosphäre, verursacht dadurch Instabilität und somit stärkere Niederschläge, während eine starke tropische Amplifikation eine Erwärmung der oberen Troposphäre, erhöhte Stabilität und somit weniger Niederschläge verursacht. Es ist bekannt, dass der indische Sommermonsun vertikale Geschwindigkeitsanomalien über dem Mittelmeerraum hervorruft, ein Signal, das leider nicht sichtbar ist (weil es über der Region zu wenige extreme Ereignisse gibt, um Wiederkehrwerte quantifizieren zu können). Die Atlantische Multidekadische Oszillation (AMO) verstärkt extreme Niederschläge über dem östlichen Mitteleuropa erheblich.

Abbildung 4: Biase im Auftreten von Wassertypen (April-September). 1 Nördlich, 2 Östlich (Nordseehoch), 3 Südlich (Tief über der Keltischen See), 4 Westlich (mitteleuropäisches Tief), 5 südlich (Alpentief), 6 Schwacher Südwind (Alpenhoch), 7 Östlich (Genuatief), 8 Südwestlich (Atlantiktief), 9 westlich (skandinavisches Tief). Aus Maraun et al. (2021).

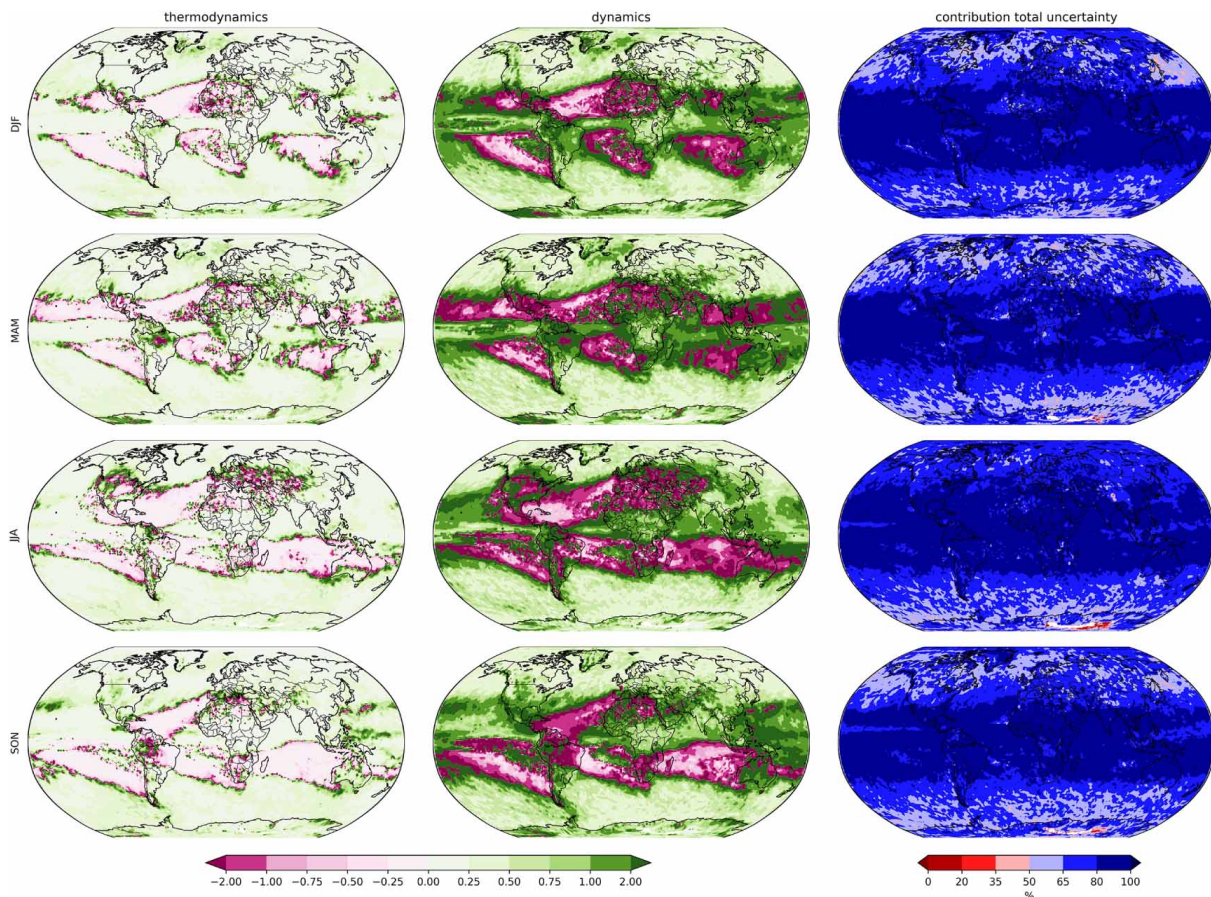
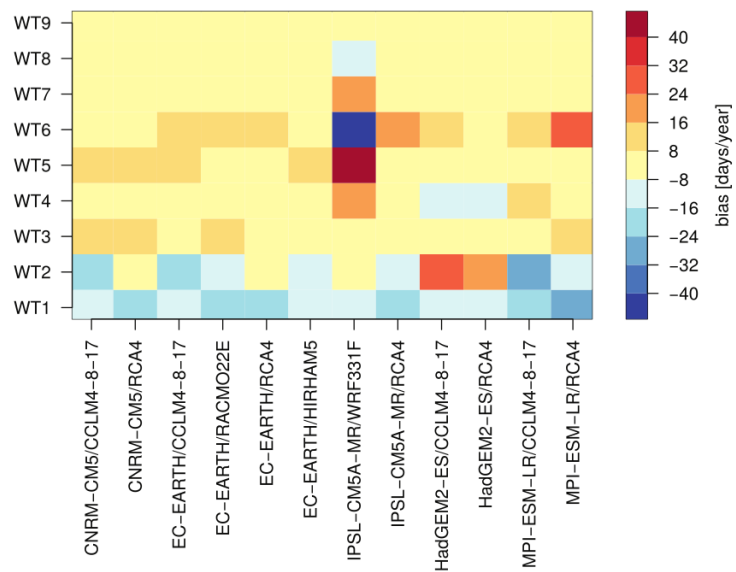


Abbildung 5: Relative Unsicherheit der thermodynamischen und dynamischen Änderungen und Beitrag der dynamischen Unsicherheit zur Gesamtunsicherheit für CMIP6. Standardabweichungen der thermodynamischen (links) und dynamischen (Mitte) Änderungen im Verhältnis zum Multimodell-Mittelwert der vollständigen Skalierungsänderungen. Beitrag der relativen Unsicherheit der dynamischen Änderungen zur relativen Unsicherheit der vollständigen Skalierungsänderungen (rechts). Jede Zeile steht für eine Saison. Aus Ritzhaupt & Maraun (2024).

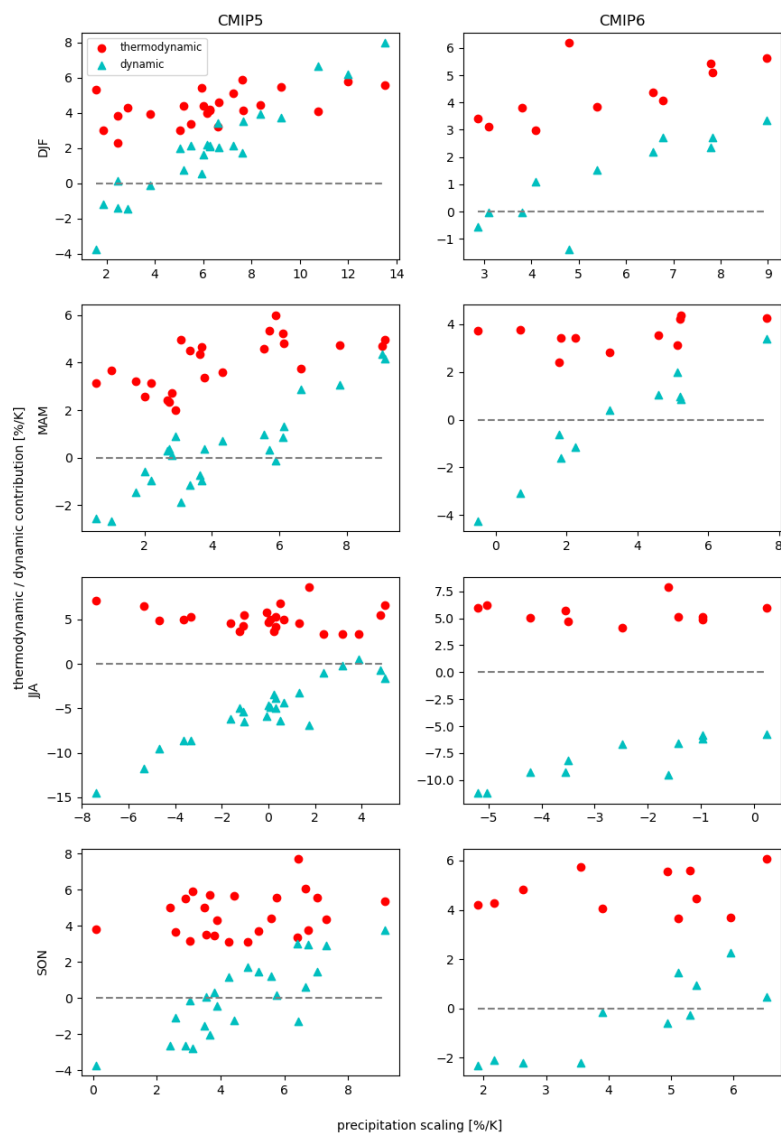
Prozessbasierte Unsicherheitsanalyse

Um Änderungen der großräumigen Einflussfaktoren mit Änderungen der lokalen Niederschlagsextreme zu verknüpfen und um Unsicherheiten zu separieren, haben wir das konzeptionelle Modell für extreme Niederschläge aus WP4 (siehe unten) verwendet, das den täglichen extremen Niederschlag in seine thermodynamischen und dynamischen Beiträge zerlegt.

Abbildung 5 zeigt die thermodynamischen (links) und dynamischen (Mitte) Unsicherheiten und den Beitrag der dynamischen Unsicherheiten zu den Gesamtunsicherheiten in den Projektionen des extremen täglichen Niederschlags für CMIP6 für alle Jahreszeiten (Spalten). Die Unsicherheiten in der Dynamik sind der dominierende Beitrag zu den Gesamtunsicherheiten.

Ein Vergleich mit CMIP5 zeigte eine Verringerung der Projektionsunsicherheiten (gemessen als Modellstreuung) durch CMIP6, die hauptsächlich auf eine Verringerung der dynamischen Unsicherheiten zurückzuführen ist (siehe Abbildung 6 für die Alpen und Ritzhaupt & Maraun, 2024).

Abbildung 6: Verteilungen der thermodynamischen und dynamischen Beiträge in GCMs. Streudiagramme, in denen die thermodynamischen (rote Punkte) und dynamischen (blaue Dreiecke) Änderungsbeiträge (y-Achse) im Verhältnis zu den vollständigen Skalierungsänderungen (x-Achse) für die Alpen dargestellt sind. Die Spalten stellen CMIP5 und CMIP6 dar, während die Reihen die vier Jahreszeiten darstellen.



2.2.3.3 Verknüpfung von Grid-Scale-Variablen mit lokaler Gewitteraktivität (WP4)

WP4 ergänzte die direkten Informationen über Niederschlagsextreme aus regionalen Klimamodellen durch indirekte Ansätze, nämlich ein physikalisch-statistisches Modell (PSM) und ein auf first Principles basierendes konzeptionelles Modell (FPCM). Der Wert dieser Methoden beruht auf ihrer Eigenschaft, sich nicht direkt auf den simulierten Niederschlag zu stützen, der von modellspezifischen Parametrisierungen von nicht aufgelösten Prozessen abhängt. Stattdessen verwenden sie Prädiktoren, die von Klimamodellen aufgelöst werden und daher als glaubwürdiger angesehen werden können. Diese indirekten Methoden liefern daher physikalisch fundierte alternative Schätzungen künftiger Niederschlagsextreme, die die Modellinformationen auf robuste Weise ergänzen. Sie tragen zudem zu unserem Verständnis der für die Entstehung von Externiederschlägen relevanten Prozesse und deren räumlicher Struktur bei.

Beschaffung von Beobachtungen und Modelldaten

Vorhersagen für tiefe feuchte Konvektion und damit für das Auftreten lokaler Niederschlagsextreme beruhen auf vertikalen Profilen von Temperatur, Feuchtigkeit, Wind und Geopotential. Für ihre Berechnung sind Informationen über diese Parameter aus möglichst vielen vertikalen (Druck-)Ebenen erforderlich. Das ECMWF veröffentlichte die erste Tranche seiner neuesten Generation von Reanalysen, ERA5, kurz nach unserem Projektstart und erweiterte sie im Laufe des Projekts rückwirkend bis 1951. Dank ihrer beispiellosen horizontalen, vertikalen und zeitlichen Auflösung ermöglichte ERA5 die Berechnung konvektiver Vorhersagen auf einem 0,25°-Gitter und in einstündigen Zeitschritten für den gesamten Zeitraum 1951-2023.

Ein schwierigeres Unterfangen war es, zumindest annähernd so gut aufgelöste Informationen aus Klimamodellen zu erhalten. Aufgrund von Speicherplatzbeschränkungen verzichteten viele EURO-CORDEX-Partner auf die Speicherung von Daten aus der freien Atmosphäre und in subtäglich Auflösung, die für konvektive Parameter entscheidend wären. Zwei RCMs, nämlich COSMO und RCA4, erfüllten jedoch die notwendigen Anforderungen. Diese Simulationen mit jeweils vier verschiedenen treibenden GCMs (CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES und MPI-ESM-LR) bildeten unser Ensemble. Wir haben also acht RCM-Simulationen für einen historischen Zeitraum (1951-2005 für COSMO, 1970-2005 für RCA4) und ein RCP8.5-Szenario (2006-2100) ausgewertet.

Die "ground truth"-Informationen über das Auftreten von schadensrelevanten konvektiven Niederschlagsereignissen wurden aus Feuerwehrdaten gewonnen. Die Echtzeit-Übertragung dieser Daten von den Dachorganisationen der Feuerwehren auf Landesebene an die ZAMG / GeoSphere Austria wurde zwischen 2017 und 2021 Stück für Stück etabliert. Die Hauptmotivation für die Nutzung

dieser Daten war ihr offensichtlicher Wert für eine Echtzeit-Validierung und, falls erforderlich, eine sofortige Aktualisierung von Unwetterwarnungen, deren Genauigkeit wiederum die Planung der Feuerwehr unterstützen würde (eine ausgezeichnete Win-Win-Situation!). Diese neuartigen und innovativen Daten haben uns jedoch bald dazu verleitet, sie auch für klimatologische Studien zu nutzen. Ihr einzigartiges Merkmal ist, dass sie einen vollwertigen "Fußabdruck" von Unwetterereignissen liefern, da jeder Ort von einer bestimmten Feuerwehreinheit abgedeckt wird und diese die ersten sind, die jegliche Art von wetterbedingten Auswirkungen bemerken. Andererseits sind die verfügbaren Informationen der Feuerwehr zunächst rein qualitativ und gelegentlich mehrdeutig, so dass sie noch verfeinert werden müssen. Zu diesem Zweck haben wir mehrere Schritte unternommen: (1) Erweiterung des Feuerwehr-Datensatzes bis zurück ins Jahr 2016 durch aktive Recherche auf den Homepages der Feuerwehren, (2) Ausarbeitung von Kriterienkatalogen, um die Einsatzkategorie und (falls vorhanden) zusätzliches Text- oder Fotomaterial in einen Unwettertyp und ein dreistufiges Intensitätsschema ("gelbe", "orange" und "rote" Ereignisse, entsprechend den Unwetterwarnfarben) zu übersetzen, und (3) eine detaillierte Qualitätskontrolle und Kategorisierung des gesamten Datensatzes.

Auswahl der Prädiktoren anhand von Prozessverständnis

Bei der Auswahl der Prädiktoren haben wir uns an den bekannten "Zutaten" für schwere Gewitter orientiert (Doswell et al., 1996): Instabilität (d.h. ein ausreichend starker vertikaler Temperaturgradient in der Troposphäre); Feuchtigkeit (eine ausreichende Menge, um die Kondensation in Luftpaketen zu ermöglichen); Auftrieb (der "Auslöser"); und vertikale Windscherung. Während die ersten drei Bedingungen für Gewitter an sich notwendig sind, ermöglicht eine verstärkte vertikale Windscherung (d. h. eine ausgeprägte Änderung des Windvektors mit der Höhe) die räumliche Organisation von Gewittern, indem sie deren Auf- und Abwinde trennt, was ihre Langlebigkeit und Intensität erhöht. Organisierte Gewitter unter starker vertikaler Windscherung sind für die überwiegende Zahl der schädlichen Hagel- und Windereignisse verantwortlich (z. B. Púčik et al. 2017; Rädler et al., 2019). Ihre Rolle für hohe Niederschlagsmengen wurde jedoch bisher kaum untersucht. Die Erforschung dieser Beziehung war ein weiterer neuer Aspekt unseres Projekts.

Entwicklung eines physikalisch-statistischen Modells für das Auftreten lokaler Gewitter

Verallgemeinerte additive Modelle stellen eine Beziehung zwischen einer additiven Kombination von (beliebig vielen) unabhängigen Prädiktoren und einer Antwortvariablen, dem so genannten additiven Prädiktor, her, die anschließend durch die Definition einer bestimmten Transferfunktion in einen aussagekräftigen

Prädiktorwert übersetzt werden kann. Wird eine Logit-Transformation benutzt, wird der resultierende Prädiktor automatisch auf den Bereich [0,1] beschränkt und kann daher als Eintrittswahrscheinlichkeit interpretiert werden. Die Regressionsparameter werden durch das Maximum-Likelihood Verfahren geschätzt (Wilks, 2006). Da unsere Definition von "gelben" Starkregenereignissen hauptsächlich vorbeugende Maßnahmen und, wenn überhaupt, nur geringfügige Schäden impliziert, wird ihre Abbildung in den Feuerwehrdaten als recht unvollständig angesehen. Wir haben daher nur die "orangefarbenen" (Schäden und/oder Störungen der Infrastruktur) und die "roten" Ereignisse (Katastrophensituation) des Zeitraums 2016-2023 als unsere Beobachtungen verwendet.

Wir führten die additive logistische Regression mit der Funktion *gam* ("generalized additive models with integrated smoothness estimation") des Pakets *mgcv* ("mixed GAM computation vehicle with GCV/AIC/REML smoothness estimation") in der Open-Source-Programmiersprache R (Wood, 2006) durch. Likelihood-Ratio-Tests wurden eingesetzt, um eine sinnvolle Anzahl an Prädiktoren und die Modelkomplexität zu ermitteln. Die Tests zeigten, dass die Hinzufügung eines zusätzlichen Prädiktors für jeden der vier "Zutaten" für schwere Gewitter tatsächlich zulässig und vorteilhaft war, so dass die optimale Version unserer additiven logistischen Regression vierdimensional ist. Weitere Anpassungen zur Verbesserung der Fitqualität umfassten z. B. eine Anpassung der Berechnung der vertikalen Windscherung an komplexes und erhöhtes Gelände und eine Anpassung auf täglicher statt stündlicher Basis (wodurch subtägliches Rauschen entfernt wurde, da Gewitter oft nicht zu der Stunde auftreten, in der die Prädiktorwerte am stärksten ausgeprägt sind, sondern einige Stunden danach).

Konzeptuelles Modell für lokale extreme Niederschlagsintensitäten

Zur Erklärung lokaler Extremniederschläge und ihrer Änderungen wenden wir den Skalierungsansatz von O'Gorman und Schneider (2009) an. Diese Beziehung zerlegt den extremen täglichen Niederschlag in seine thermodynamischen und dynamischen Beiträge: Die Intensität eines extremen Niederschlagsereignisses skaliert mit der höhenintegrierten Nettokondensationsrate und kann in eine dynamische Komponente, die durch die vertikale Geschwindigkeit gegeben ist, und eine thermodynamische Komponente, die durch die vertikale Ableitung der spezifischen Sättigungsfeuchte unter der Annahme einer feuchtadiabatischen Temperaturabnahme gegeben ist, zerlegt werden. Sowohl die Temperatur als auch die vertikale Geschwindigkeit werden an den Tagen der Extremereignisse ausgewertet.

Dieser Ansatz erklärte sehr gut die räumlichen Muster extremer Niederschläge und deren Änderungen (für Details siehe Ritzhaupt & Maraun, 2024). Die mit

diesem Ansatz erzielten Ergebnisse werden in den entsprechenden Arbeitspaketen WP3 (siehe oben) und WP5 (siehe unten) erläutert.

Evaluation anhand hochauflösender Beobachtungsdaten

Eine Auswertung gewitterbedingter Feuerwehreinsätze mit nahegelegenen Niederschlagsmessungen (von ZAMG / GeoSphere und vom WegenerNet) wurde in Erwägung gezogen, erwies sich aber aufgrund fehlender Vorarbeiten und Erfahrungen als zu kompliziert und zeitaufwändig. Wir schlugen daher eine einfache, aber vielversprechende Beziehung vor, indem wir eine historische Starkregen-Definition anpassten, die ursprünglich von Wussow (1922) vorgeschlagen wurde und den Niederschlag P mit dem Zeitintervall t verknüpft:

Für gelbe Ereignisse ("Warnung"): $P \text{ [mm]} > \sqrt{5 \cdot t \text{ [min]}}$

Für orangefarbene Ereignisse ("Schäden"): $P \text{ [mm]} > \sqrt{20 \cdot t \text{ [min]}}$

Für rote Ereignisse ("Katastrophe") $P \text{ [mm]} > \sqrt{45 \cdot t \text{ [min]}}$

Erste Pilotvergleiche ergaben eine recht gute Übereinstimmung, aber es sind noch detailliertere Auswertungen erforderlich, um den positiven ersten Eindruck zu bestätigen. Insbesondere muss, auch wenn die Einfachheit im Vordergrund steht, untersucht werden, ob die hydrologischen Beziehungen sich zwischen verschiedenen geologischen und morphologischen Gegebenheiten, oder zwischen trockenen und feuchten meteorologischen Vorbedingungen nicht zu sehr unterscheiden, um feste Schwellenwerte für Österreich und den Alpenraum (ganz zu schweigen von anderen Teilen der Welt) zu rechtfertigen. Wir planen, diese Bewertung in einem anderen Projekt in der Zukunft wieder aufzugreifen. Um das PSM dennoch zu bewerten, führten wir eine Kreuzvalidierung durch, indem wir den Trainingsdatensatz in zwei Hälften mit geraden und ungeraden Tagen aufteilten. Mit durchschnittlichen Vorhersagefehlern von weniger als 20 % der erwarteten Starkregentage pro Jahr und Gitterbox schnitt es recht gut ab.

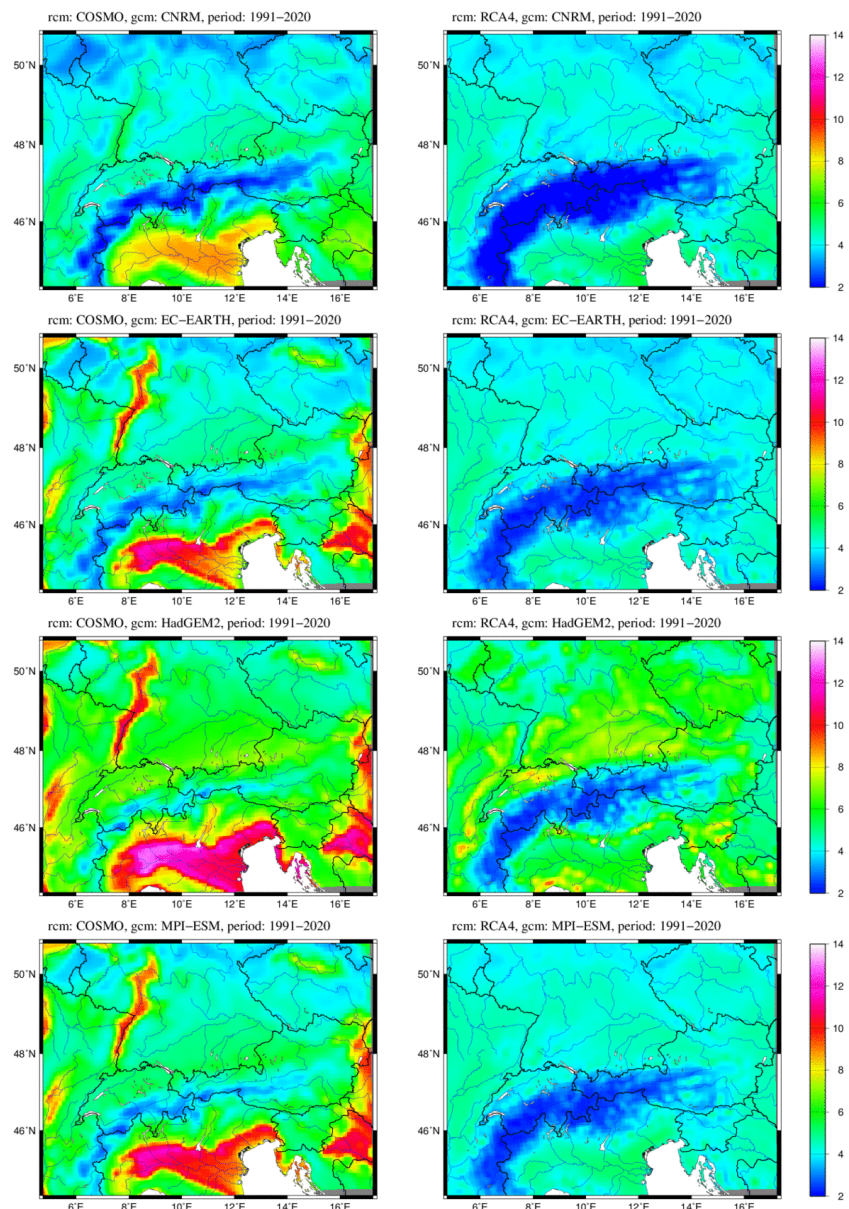
Projektionen und steuernde Prozesse

Eine Summierung der täglichen Auftretenswahrscheinlichkeiten aus dem PSM über ein Jahr ergibt die erwarteten jährlichen konvektiven Starkregenereignisse pro Gitterbox. Die Anwendung des statistischen Modells auf ERA5 (1951-2023) liefert daher eine Annäherung an die "ground truth", und die Anwendung auf die EURO-CORDEX RCM-Simulationen (1951-2100) eine unabhängige Projektion des vergangenen und zukünftigen Gewitterklimas, die nur auf robusten Variablen auf Gitterebene basiert.

Unser Ensemble aus acht verschiedenen COSMO- und RCA4-Simulationen zeigt plausible Größenordnungen und räumliche Strukturen der erwarteten jährlichen konvektiven Regenereignisse (Abb. 7). Insbesondere die Maxima im Alpenvorland sind qualitativ bekannt und physikalisch erklärbar, da sich in diesem Bereich

starke vertikale Temperaturgradienten (aufgrund der Erwärmung des trockenen, hochgelegenen Geländes) und reichlich Feuchtigkeit in der unteren Troposphäre (aufgrund der Advektion von Feuchtigkeit mit den thermischen Windsystemen talaufwärts und hangaufwärts) am häufigsten überlagern. Andere Strukturen, wie z.B. das Maximum der konvektiven Starkregengefahr entlang des deutschen Rheintals in den COSMO-Realisierungen, erscheinen eher als Artefakte oder zumindest als Überschätzungen.

Abb. 7: Erwartete Anzahl von konvektiven Starkregenereignissen (Intensitätsstufe "orange" = Schäden) pro $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ und Jahr basierend auf einer Anwendung des PSM auf ein Ensemble von acht EURO-CORDEX RCMs. Linke Spalte: COSMO-Simulationen (CLMcom-Konsortium), rechte Spalte: RCA4-Simulationen (SMHI), jeweils mit vier verschiedenen Randbedingungen (obere bis untere Reihe: CNRM, EC-EARTH, HadGEM2, MPI-ESM).



Trotz der insgesamt realistischen Muster ist die Streuung sowohl zwischen den beiden RCMs als auch zwischen den Simulationen des RCM mit unterschiedlichen Randbedingungen ebenfalls ziemlich groß. Vorhersageunsicherheiten scheinen sowohl von den GCM-Randbedingungen geerbt zu werden als auch innerhalb der RCM-Realisierungen selbst zu entstehen. In jedem Fall simuliert RCA4 eine deutlich weniger konvektionsanfällige Umgebung als COSMO.

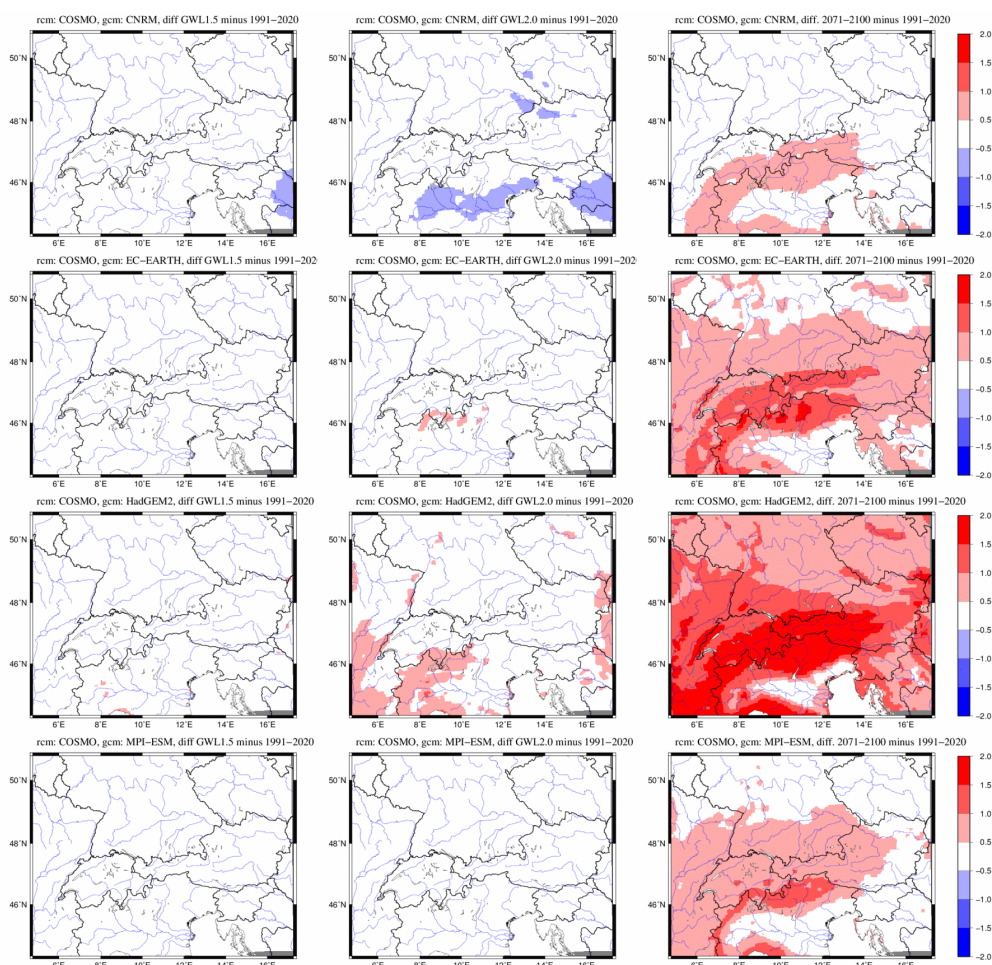


Abbildung 8: Änderungen der erwarteten Anzahl von konvektiven Starkregenereignissen (Intensitätsstufe "orange" = Schäden) von 1971-2000 zu einer 30-Jahres-Zeitscheibe entsprechend einem globalen Erwärmungsniveau von 1,5K (links), einem globalen Erwärmungsniveau von 2,0K (Mitte) und dem Zeitraum 2071-2100 (rechts) gemäß COSMO-Simulationen mit vier verschiedenen Randbedingungen (von oben nach unten: CNRM, EC-EARTH, HadGEM2, MPI-ESM). Zeitscheiben für die globalen Erwärmungsgrade aus Kjellström et al. (2018).

Abb. 8 zeigt die projizierte Änderung der jährlichen konvektiven Starkregenereignisse für die verschiedenen COSMO-Simulationen. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für RCA4 erzielt (nicht gezeigt). Bei einer globalen Erwärmung von 1,5 K (linke Spalte) oder 2,0 K (mittlere Spalte) bleiben die simulierten Änderungen neutral und meist unter 0,5 Ereignissen pro Gitterbox und Jahr. Je nach Simulation liegt das Zentrum eines 30-Jahres-Zeitraums, in dem ein globales Erwärmungsniveau von 1,5K (2,0K) erstmals überschritten wird, zwischen 2011 und 2032 (zwischen 2027 und 2046) - für die genauen Zahlen siehe Kjellström et al. (2018). Erst eine weiter verstärkte globale Erwärmung würde die Gefahr konvektiven Regens deutlich erhöhen. Allerdings nehmen die Unterschiede innerhalb der Modelle eher zu als ab: Den stärksten Anstieg der erwarteten jährlichen konvektiven Starkregenereignisse zeigen die Simulationen

mit HadGEM2-Randbedingungen, die bereits die höchsten Zahlen für den Zeitraum 1991-2020 simulieren (Abb. 7).

Für die höhere Intensitätsstufe ("rote" Ereignisse, die als Katastrophensituation interpretiert werden können) sehen die räumlichen und langfristigen zeitlichen Merkmale sehr ähnlich aus, während die Gesamtgefahr um mehr als eine Größenordnung geringer ist.

Die Projektionen, die auf dem Skalierungsansatz von O'Gorman und Schneider (2009) beruhen, einschließlich einer Diskussion der Änderungen in den treibenden Prozessen, werden in WP3 bzw. WP5 vorgestellt.

2.2.3.4 Verständnis kleinräumiger Änderungen (WP5)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, kleinräumige Änderungen in extremen Niederschlägen auf der Grundlage von Klimamodellsimulationen und meteorologischen Prozessen besser zu verstehen. Dieses WP wurde in enger Zusammenarbeit mit Stefan Sobolowski von NORCE (Bergen, Norwegen) durchgeführt.

Die Beschaffung von CORDEX-FPS-Simulationen erwies sich aus zwei Gründen als schwierig: Erstens verzögerte sich die Veröffentlichung der Daten (selbst jetzt sind die Simulationen noch nicht auf den ESGF-Servern verfügbar). So mussten wir die Daten von den einzelnen Modellierungsgruppen anfragen. Zum anderen benötigten wir detaillierte dreidimensionale Felder von Temperatur und vertikalen Geschwindigkeiten, die aufgrund ihrer Größe nur schwer zu übertragen und (für mehrere Modelle) auf unseren Servern zu speichern waren. Daher beschlossen wir, eng mit den Datenanbietern zusammenzuarbeiten: Wir entwickelten für jedes RCM maßgeschneiderte Skripte, die von den Anbietern auf ihren eigenen Computern ausgeführt werden sollten. Nur die Ergebnisse wurden dann übertragen und gespeichert. Insgesamt hatten vier Anbieter die Ressourcen, um zu unserer Analyse beizutragen: NORCE (Norwegen), DWD (Deutschland), GERICS (Deutschland), Uni Gießen (Deutschland) und CNRM (Frankreich), d.h. wir analysierten insgesamt fünf Modelle (einschließlich unserer Simulationen).

Evaluation anhand von Beobachtungen und konzeptionellem Modell

Die Darstellung extremer Niederschläge in den CORDEX-FPS-RCMs im Vergleich zu Beobachtungen wurde im Rahmen der CORDEX-FPS-Gemeinschaftsarbeit (Ban et al., 2021) mit Beiträgen des WEGC (D. Maraun & H. Truhetz, die den ACRP-Projekten EASICLIM und reclip:convex zugeordnet sind) durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass konvektionsauflösende RCMs eine realistischere Darstellung des Niederschlags liefern als grob aufgelöste RCMs, insbesondere für Starkniederschläge und die Niederschlagshäufigkeit im Sommerhalbjahr.

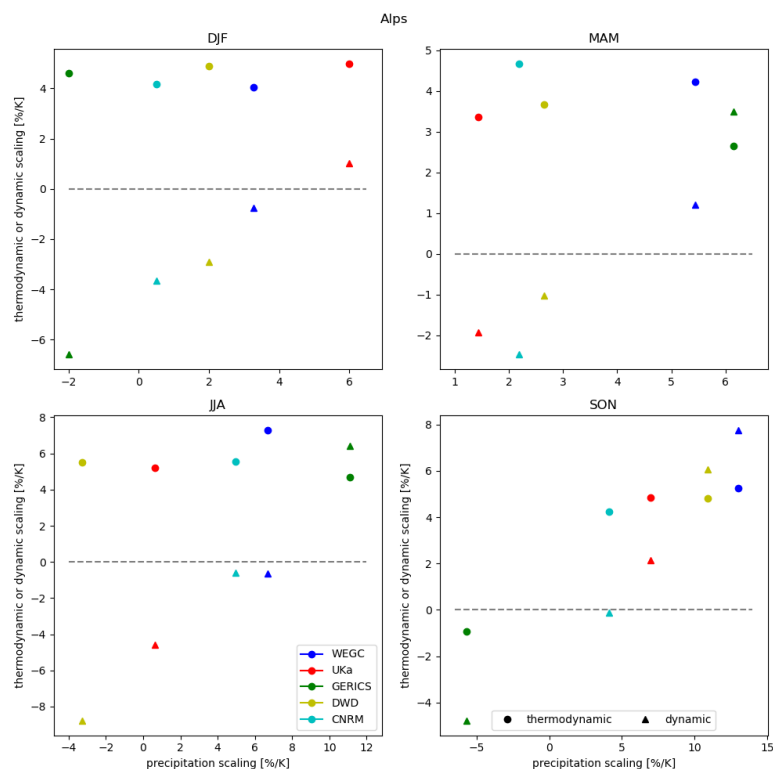
Der Skalierungsansatz von O'Gorman und Schneider (2009, siehe WP4) wurde für großräumige Extreme des täglichen Niederschlags entwickelt, wie sie von GCMs oder relativ grob aufgelösten RCMs simuliert werden. Hier wenden wir diesen Ansatz zum ersten Mal auf sehr hoch aufgelöste RCM-Simulationen an. Daher haben wir die Eignung dieses Ansatzes für diese Anwendung getestet. Wir fanden heraus, dass Vorhersagen von rezenten Extremniederschlägen mittels der Skalierungsbeziehung sehr verrauscht waren, wahrscheinlich weil die Niederschlagszellen während der täglichen Niederschlagsaggregation typischerweise über mehrere Gitterboxen wandern, so dass die täglichen Gitterboxwerte der vertikalen Geschwindigkeit das Verhalten der resultierenden extremen Niederschläge nicht gut repräsentieren. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Berücksichtigung räumlich geglätteter Beziehungen und regionaler Durchschnittswerte die extremen Niederschläge und ihre prognostizierten Änderungen erfolgreich erklären konnte.

Änderungen in Extremniederschlägen und Interpretation der Unterschiede

Die Projektionen der täglichen Extremniederschläge mit den CORDEX-FPS-RCMs (Pichelli et al., 2021, mit Beiträgen von WEGC, H. Truhetz, zurückzuführen auf die ACRP-Projekte EASICLIM und reclip:convex) stimmen weitgehend mit denen der RCMs mit Standardauflösung überein. Erhebliche Unterschiede, sogar im Vorzeichen, ergeben sich jedoch bei den Projektionen der stündlichen Niederschlagsextreme.

Auch die Zerlegung in thermodynamische und dynamische Änderungen (Ritzhaupt et al., in Vorbereitung) führte zu Signalen, die mit denen vergleichbar sind, die in Modellen mit gröberer Auflösung gefunden wurden (Abbildung 9 für die Alpen, siehe auch WP3). Um diese Änderungen weiter zu verstehen, berechneten wir Änderungen der vertikalen Geschwindigkeiten, Temperaturen, CAPE und CIN (nicht gezeigt). Diese Analysen bestätigen die Rolle der vertikalen Geschwindigkeiten für den Anstieg extremer Tagesniederschläge im Sommer über den Alpen.

Abbildung 9: Verteilungen der thermodynamischen und dynamischen Beiträge zur Konvektion, die RCMs ermöglichen Streudiagramme, in denen die thermodynamischen (Kreise) und dynamischen (Dreiecke) Änderungsbeiträge (y-Achse) im Verhältnis zu den vollständigen Skalierungsänderungen (x-Achse) für die Alpen dargestellt sind. Aus Ritzhaupt et al. (in Vorbereitung).



2.2.3.5 Climate Information Distillation (WP6)

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 3 bis 5 zusammenzufassen und, in Zusammenarbeit mit WP2, für Klimadienstleistungen relevante Informationen über Änderungen der täglichen Extremniederschläge über den Alpen zu destillieren.

Verwerfen von Modellen, die die Zirkulation schlecht simulieren

Unsere Analyse der Wassertypen (siehe WP3) zeigt deutlich, dass die IPSL-CM5A-MR/WRF331F GCM/RCM-Kombination aus dem ÖKS15-Ensemble ausgeschlossen werden sollte, da sie für Extremniederschläge wichtige Wassertypen wie Genua-Tiefs falsch darstellt. Unsere Analyse zeigt auch, in Übereinstimmung mit anderen veröffentlichten Forschungsarbeiten (z.B. Cannon, 2020; Schiemann et al., 2020; Davini & D'Andrea, 2020; Harvey et al., 2020), dass CMIP6-Modelle bei der Darstellung großräumiger Zirkulationsmuster über Europa besser abschneiden als CMIP5-Modelle. Daher sind neue CORDEX-Simulationen für Europa auf der Grundlage der CMIP6-GCMs dringend erforderlich.

Im Rahmen von SPIRIT beteiligte sich WEGC daher an einer großen Community-Leistung zur Auswahl der treibenden GCMs für die kommenden EURO-CORDEX-Simulationen (Sobolowski et al., eingereicht). Im Rahmen dieser Bemühungen haben wir eine Liste transparenter Kriterien für die Auswahl von GCMs entwickelt.

Diese Bemühungen gehen weit über den Rahmen von SPIRIT hinaus. Zusätzlich zu den Kriterien der Verfügbarkeit und der Modellunabhängigkeit umfasst die Liste auch GCM-Plausibilitätskriterien und die Streuung der Ensemble-Projektion. Die für SPIRIT relevanten Plausibilitätskriterien umfassen die Darstellung der großräumigen Zirkulation (Jetstream, Sturmszugbahnen, synoptische Wassertypen), die optische Aerosoltiefe und damit verbundene Trends sowie regionale Muster der Meeresoberflächentemperatur. Die endgültige Liste enthält neun GCMs. Hinsichtlich der RCMs und der konvektionsauflösenden RCMs wurden keine unplausiblen Simulationen identifiziert (siehe WP3-5).

Extrahieren der verfügbaren Informationen

Insgesamt sind die Projektionen der extremen Tagesniederschläge in den Alpen aus den verschiedenen Ensembles für Winter, Frühling und Herbst weitgehend konsistent (Abbildung 2). Alle Ensembles zeigen Zunahmen, wenn auch mit unterschiedlichen Amplituden. Für den Sommer ist die Situation jedoch schwieriger. Während alle Standard-GCM-Ensembles um den Nullpunkt streuen, projizieren die RCMs und die HighresMIP-GCMs eindeutig eine Zunahme der extremen Niederschläge (Abbildung 2). Die letztgenannten Simulationen stimmen auch mit den Ergebnissen der Gewitteränderungen aus WP4 und den konvektionsfähigen RCMs aus WP5 überein. Wie bereits erwähnt, hängt der Unterschied mit der Darstellung der vertikalen Geschwindigkeiten in komplexem Gelände zusammen, die in RCMs besser aufgelöst ist als in Standard-GCMs. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass die Projektionen extremer täglicher Sommerniederschläge, wie sie von Standard-GCMs simuliert werden, unplausibel sind. Infolgedessen erwarten wir eine Zunahme der extremen Tagesniederschläge über den Alpen auch im Sommer.

Bewertung potenzieller tiefer Unsicherheiten

Die sich daraus ergebenden Projektionen für die Alpen basieren auf der Annahme, dass die betrachteten Modellensembles - von akuten CMIP6 GCMs bis hin zu neuartigen konvektionsauflösenden RCMs - die gesamte Unsicherheit des Klimasignals abdecken, d.h. wir würden erwarten, dass die tatsächlichen Änderungen extremer Tagesniederschläge (pro Kelvin Erwärmung) innerhalb der Bandbreite der betrachteten Ensembles liegen. Diese Annahme wäre falsch, wenn es Hinweise auf mögliche großräumige Zirkulationsänderungen in den mittleren Breiten sowie auf lokale Änderungen außerhalb der Streuung aller Modelle gäbe. Was die großskaligen Zirkulationsmuster betrifft, die für die extremen täglichen Niederschläge relevant sind, haben wir in der veröffentlichten Literatur keine derartigen Hinweise gefunden. Was die Prozesse auf lokaler Ebene betrifft, führte eine Masterstudentin am WEGC eine Analyse auf Grundlage von Pseudo-Global-Warming-Simulationen durch (Kohlhauser, 2023). Kohlhauser betrachtete das extreme Niederschlagsereignis, das im ACRP-Projekt EASICLIM

(Maraun et al., 2022) analysiert wurde, und simulierte das Ereignis unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen. Um mögliche tiefe Unsicherheiten abzuschätzen, variierte sie systematisch die für extreme Niederschläge relevanten Parametrisierungen innerhalb plausibler Bereiche und simulierte das Ereignis sowohl bei konvektionserölaubender (3 km) als auch bei Large-Eddy-Auflösung (300 m). Die Ergebnisse zeigten keinen größeren Unsicherheitsbereich als die in SPIRIT betrachteten Modelle und auch keinen systematischen Unterschied zwischen konvektionsauflösenden und Large-Eddy Simulationen. Wir kommen daher zu dem Schluss, dass es derzeit keine Anzeichen für tiefe Unsicherheiten in den Projektionen extremer täglicher Niederschläge über den Alpen gibt.

Entwicklung eines Destillationskonzepts

Die Erkenntnisse aus SPIRIT flossen nicht nur in die Modellauswahl von EURO-CORDEX ein (Sobolowski et al., eingereicht), sondern auch in den Abschnitt über die Destillation im jüngsten Bericht des IPCC AR6 WG1 (Abschnitt 10.5, mitverfasst von D. Maraun). Dieser Abschnitt enthält klare Richtlinien für die Destillation von Klimainformationen, einschließlich einer umfassenden Liste von Informationsquellen und einer Liste von Ansätzen zur Kombination von Informationen (Doblas-Reyes et al., 2021).

Darüber hinaus organisierte das WEGC im Juni 2020 einen internationalen virtuellen Workshop zur Destillation von Klimainformationen (<https://homepage.uni-graz.at/en/douglas.maraun/regional-climate-information/>). Dieser Workshop stieß einen anhaltenden internationalen Austausch zwischen Klimawissenschaftlern, Klimafolgenmodellierern, Sozialwissenschaftlern, Philosophen und Praktikern über die Rolle von Werten, Machtverhältnissen und Sprache bei der Konstruktion von Klimainformationen an (Maraun et al., in Vorbereitung).

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

- Projektionen extremer Tagesniederschläge sind wesentlich unsicherer als Projektionen des mittleren Niederschlags. Dennoch sind sie über eine Reihe von Modell-Ensembles hinweg in den meisten Jahreszeiten für die meisten Regionen Europas im Vorzeichen konsistent. Sommerprojektionen sind jedoch selbst im Vorzeichen sehr unsicher. Für die aktuellen EURO-CORDEX- und ÖKS15-Projektionen schlagen wir vor, die Simulationen des IPSL-CM5A-MR/WRF331F zu verwerfen.
- Die atmosphärische Dynamik ist die wichtigste Quelle für Projektionsunsicherheiten von extremen Tagesniederschlägen, insbesondere im Sommer.
- CMIP6 verringert die Projektionsunsicherheiten von extremen Tagesniederschlägen im Vergleich zu CMIP5.
- Für die Alpen zeigen die Projektionen extremer Tagesniederschläge durchweg positive Trends zu höheren Intensitäten, und die verschiedenen Modelltypen und -ansätze kommen zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Nur für den Sommer hängen die Projektionen stark von der Modellauflösung ab. Unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse können die Unsicherheiten verringert werden, und auch für den Sommer wird ein Anstieg erwartet.
- Die Erkenntnisse von SPIRIT sind in die Abschnitte über die Climate Information Distillation und Climate Services im jüngsten Bericht des IPCC AR6 WG1 sowie in die EURO CORDEX-Auswahl der CMIP6-GCMs eingeflossen.
- SPIRIT profitierte von Synergien mit anderen ACRP-Projekten, vor allem EASICLIM und reclip:convex (hauptsächlich in Bezug auf Aspekte der hochaufgelösten Modellierung).

Lessons Learned

- Ein wichtiger Schwerpunkt von SPIRIT war die Verwendung mehrerer Evidenzlinien, wie sie auch im jüngsten IPCC-Bericht propagiert wird. Der Vergleich verschiedener Generationen von GCMs, RCMs, konvektionsauflösender RCM-Ensembles und zwei physikalisch basierter konzeptioneller Ansätze hat das Vertrauen in die Ergebnisse stark erhöht.
- Die Daten der Feuerwehren stellen eine nützliche und relevante Ergänzung zu den direkten Beobachtungsdaten dar. Sie haben sich nicht nur für Nowcasting, sondern auch für die Klimawissenschaft als Referenzdaten als wertvoll erwiesen.

- Wie die Prognosen für extreme Niederschlagsereignisse im Sommer zeigen, ist Prozessverständnis essenziell zur Gewinnung verlässlicher Klimainformationen.
- Für die Evaluation relevanter Prozesse werden andere Daten benötigt als die, die üblicherweise von den Nutzern angefordert werden. Solche Daten, insbesondere 3-dimensionale Felder, werden aus Speichergründen oft nicht zur Verfügung gestellt. Auch der Austausch von Daten zwischen Forschungsgruppen ist aufgrund der Datengröße begrenzt. Daher müssen neue Wege der Zusammenarbeit, z. B. die Arbeit in einer gemeinsamen Datencloud, erforscht werden, um eine prozessbasierte Analyse und die Erstellung zuverlässiger Informationen zu ermöglichen.
- Die GCM-Community hat bereits viele prozessbasierte Evaluationsstudien zur großskaligen atmosphärischen Dynamik durchgeführt. Diese Studien sind für die RCM-Community von großer Bedeutung, aber weitgehend unbekannt. Die EURO-CORDEX-Modellauswahl, an der SPIRIT beteiligt war, ist ein wichtiger Schritt zur Verbesserung dieses Austauschs.
- Der Climate-Service-Ansatz mit Klimaberatern als operative Multiplikatoren hat sich als sehr vielversprechend erwiesen. Er ermöglicht eine nachhaltige Interaktion sowohl zwischen Klimawissenschaftlern und Klimaberatern als auch zwischen Klimaberatern und lokalen Nutzern.
- Die Extraktion pseudo-quantitativer Informationen aus Feuerwehrdaten (dreistufiges Intensitätsschema) und mehr noch die Nutzung dieser Daten für eine klimatologische Studie sind Pionierarbeit. Zu Beginn von SPIRIT gab es weder einen „proof of concept“ noch Vorarbeiten, und es war noch nicht bekannt, wie man diese Daten am besten konvertiert und verfeinert. Die von uns gewählte „erwartete Anzahl von Unwetterereignissen pro Flächeneinheit und Jahr“ erwies sich als aussagekräftige und dennoch leicht verständliche Größe, was durch die positiven Rückmeldungen der Beteiligten - von Katastrophenschutzbehörden über Medien bis hin zur breiten Öffentlichkeit - bestätigt wurde. Bereits in diesem frühen Stadium der Anwendung gibt es vielversprechende Hinweise darauf, dass dieser Ansatz das Potenzial hat, den Dialog über mögliche und notwendige Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf eine neue Ebene zu heben. Er kann eine verbesserte, objektive Grundlage für ein breites Spektrum von Überlegungen liefern, von der strategischen Planung von Katastrophenschutzeinheiten bis hin zu Risikoabschätzungen für Entscheidungsträger. Die Ergebnisse von SPIRIT haben GeoSphere Austria geholfen, mit der Regierung Ressourcen für die Aufrechterhaltung und Intensivierung des Stakeholder-Dialogs und die Erkundung weiterer Anwendungsbereiche, insbesondere im Hinblick auf die EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten, einzufordern.

Laufende und weitere geplante Forschung

Das SPIRIT-Projekt inspirierte eine Reihe neuer Forschungsarbeiten.

- Ein wichtiges Ergebnis war, dass CMIP6-Modelle die atmosphärische Dynamik besser simulieren als CMIP5-Modelle und auch die Projektionsunsicherheiten verringern. Allerdings liefern diese Simulationen keine nützlichen Informationen für sommerliche konvektive Ereignisse, insbesondere über komplexem Terrain. Die aktuell verfügbaren CORDEX- und CORDEX-FPS-Simulationen werden jedoch mit den alten, schlechteren, CMIP5-Modellen getrieben. Hier können Emulatoren eine Schlüsselrolle bei der statistischen Kombination gut funktionierender GCMs mit gut funktionierenden RCMs spielen. Solche Ansätze können auch die Destillation unterstützen, indem sie die Ergebnisse verschiedener Modelltypen zu einem gemeinsamen Typ von hochauflösenden Ergebnissen zusammenführen. Der PI hat daher das vom ACRP finanzierte Projekt CHIANTI gestartet, in dem ein einfacher analoger Emulator entwickelt wurde, um CMIP6-GCMs mit den konvektionsauflösenden RCM-Projektionen von CORDEX-FPS zu kombinieren. Weitere Forschungsarbeiten könnten verbesserte Emulatoren entwickeln, z. B. auf der Grundlage von maschinellem Lernen.
- Das vom ACRP finanzierte Projekt ÖKS Nextgen Preval (unter der Leitung von M. Jury, einem Postdoc in der Forschungsgruppe von D. Maraun) erweiterte die Evaluation großräumiger Zirkulationsmuster auf Wettertypen, die für andere Phänomene relevant sind. In diesem Projekt werden auch sogenannte Single Model Initial Conditions Large Ensembles (SMILES) berücksichtigt, um die interne Variabilität genauer zu untersuchen. Weitere Forschungsarbeiten könnten diese Ensembles nutzen, um das Auftreten sehr seltener Extremereignisse zu untersuchen.
- Das vom ACRP finanzierte Projekt HighResMountains (D. Maraun ist Co-PI) konzentriert sich speziell auf die Bewertung von Klimamodellen über komplexem Gelände (die europäischen Alpen). Hier ist weitere Forschung dringend erforderlich, insbesondere prozessbasierte Analysen, um ein besseres Verständnis des zukünftigen lokalen Wetters in den Alpen zu entwickeln. Das eingereichte MoCCA-Projekt würde diese Forschungslücke durch die Untersuchung mesoskaliger konvektiver Systeme über den Alpen schließen. Andere Forschungsarbeiten könnten, aufbauend auf dem im ACRP-Projekt EASICLIM entwickelten Ansatz, Storylines für künftige risikorelevante Wetterlagen entwickeln.

Relevanz für andere Zielgruppen

Die SPIRIT-Ergebnisse sind für eine Reihe verschiedener Zielgruppen relevant. Zunächst sind die Ergebnisse selbst von hoher Relevanz für die Bewertung von Klimarisiken über Europa und den Alpen. Darüber hinaus sind aber auch die methodischen Erkenntnisse wichtig:

- Die Ergebnisse in Bezug auf die Darstellung der atmosphärischen Dynamik und der synoptischen Wittertypen, einschließlich der CMIP6-Modellselektion, informieren die GCM-Community über die Schwächen von GCMs und die Bedürfnisse der regionalen Klimamodellierungs-Community in Bezug auf GCM-Output.
- Die RCM-Community konzentriert sich derzeit ausschließlich auf CORDEX-Simulationen. Unsere Ergebnisse zeigen jedoch, wie wichtig es ist, mehrere Evidenzlinien zu berücksichtigen, um zu zuverlässigen regionalen Klimainformationen zu gelangen. Unsere Forschung liefert ein Beispiel für die Kombination verschiedener Informationsquellen und Evidenzlinien und kann andere CORDEX-Projekte inspirieren. Dieser Punkt ist besonders wichtig für die Erstellung von nationalen Klimaszenarien, die sich sehr oft nur auf die neuesten RCMs stützen. Sie unterschätzen daher sehr wahrscheinlich Projektionsunsicherheiten und sind möglicherweise nicht für alle von den verschiedenen Nutzern gewünschten Zwecke geeignet (z. B. sehr seltene Ereignisse, lokale Extremereignisse usw.). Der PI setzt sich in seiner Rolle als Mitglied der Steering Group der Österreichischen Klimaszenarien für eine solche breitere Sichtweise ein.
- Der Climate Service Ansatz kann als Vorbild für die Bereitstellung von Klimadienstleistungen in anderen Ländern mit einem Netz regionaler Meteorologen dienen. Tatsächlich hat der PI in letzter Zeit mehrere Anfragen zur Präsentation des Ansatzes erhalten (z. B. bei einem WCRP RifS-Treffen während der EGU oder bei einem OURANOS-Workshop in Kanada...).
- Schließlich sind die Ergebnisse auch für Nutzer und Förderorganisationen im Bereich angewandter Forschung von großer Bedeutung. Häufig fordern die Nutzer von Klimainformationen sehr spezifische Datenprodukte, z. B. eine kleine Auswahl von CORDEX-Simulationen, für ihre Zwecke an (z. B. Als Input für Klimafolgenmodelle) und beantragen keine Mittel für gründliche prozessbasierte Evaluationsstudien oder für die Berücksichtigung mehrerer Evidenzlinien. Oftmals bieten Förderorganisationen der angewandten Forschung auch keine ausreichenden Mittel für eine solche umfassende Destillation von Klimainformationen an. Die Erkenntnisse aus SPIRIT machen deutlich, dass die Ergebnisse solcher Projekte, insbesondere wenn sie sich mit Extremereignissen befassen, von sehr begrenztem Wert sein können. Klimafolgenmodellierer und Geldgeber sollten daher berücksichtigen, dass regionale Klimaprojektionen immer noch sehr unsicher sind und ausreichend Mittel für die Destillation von Klimainformationen bereitgestellt werden müssen, um zu vertrauenswürdigen regionalen Klimainformationen zu gelangen.

Nutzung der SPIRIT-Ergebnisse durch Stakeholder: Allgemeine Erkenntnisse

Die Erfahrungen aus der intensiven Interaktion mit den Stakeholdern haben gezeigt, dass SPIRIT in verschiedener Hinsicht erheblich zu einer besseren Aufnahme und Nutzung der wissenschaftlichen Ergebnisse beigetragen hat.

Die regionalen Klimaberater (Pillar 1), die in vielen Fällen ausgebildete Meteorologen sind, konnten von den gesamten Informationen aus SPIRIT profitieren, einschließlich der eher wissenschaftlich orientierten Ergebnisse zur Robustheit von Extremniederschlagsprojektionen (Ritzhaupt & Maraun, 2023; 2024). Darüber hinaus ermöglichte ihnen die Verknüpfung mit regionalen meteorologischen Bedingungen wie Stabilität, Feuchtigkeit und Windscherung (WP4) eine direkte Verbindung zu den SPIRIT-Ergebnissen, die auf ihrer Kernkompetenz als meteorologische Meteorologen basieren. Das allgemeine Feedback dieser Stakeholdergruppe war, dass sie sich für ihre Arbeit als Klimaberater viel besser mit Fakten ausgestattet fühlen als vor dem Projekt.

Die weniger wissenschaftlich orientierten Stakeholder-Gruppen, insbesondere Pillar 4 (Praktiker Katastrophenschutz), konnten dagegen sehr direkt an die SPIRIT-Ergebnisse anknüpfen, da ihre eigenen Daten (Feuerwehrdaten) die Grundlage für viele der Ergebnisse waren. Wir konnten auch beobachten, dass diese Gruppe die Trends, die das SPIRIT-Team präsentierte, direkt mit ihren eigenen Erfahrungen abglich und überwiegend feststellte, dass ihr subjektiver Eindruck über die Zunahme der Zahl der Katastrophenschutz-Einsätze noch größer war als die geschätzte Zunahme der extremen Niederschlagsereignisse. Dies führte zu interessanten Diskussionen über die Auswirkungen von Exposition und Verwundbarkeit (zusätzlich zum Hazard), was ein wichtiger Schritt zu einer umfassenden Risikobewertung ist. Auf diese Weise konnte SPIRIT dazu beitragen, die Lücke zwischen Hazard- und Risikobewertung zu schließen.

C) Projektdetails

6 Methodik

Climate Information Distillation

Im Kern des Projekts steht die Destillation von Informationen über regionale Klimaänderungen in Extremniederschlägen über Europa und speziell dem Alpenraum.

Der Fokus des Projekts lag auf Tagesniederschlägen. Dies ist zum einen der Datenverfügbarkeit geschuldet, zum anderen aber auch ein Kompromiss zwischen kurzen Starkniederschlägen (~1h), die zu Sturzfluten führen, und anhaltenden Niederschlägen (~3-5 Tage), die zu Hochwasser in großen Einzugsgebieten führen. Allerdings wurden auch Gewitter gesondert betrachtet.

Als Maß für Extremniederschläge wurden einen 20-Jahreswiederkehrwerte der Tagesniederschläge berechnet. Diese sind deutlich extremer als häufig analysierte „moderate“ Extremereignisse (99. Perzentil, Jahresmaxima...), aber noch so niedrig, dass sie robust auch aus einzelnen Zeitscheiben geschätzt werden können. Zum anderen wurden diskrete Intensitätsklassen für Gewitter genutzt, die aus Stellvertreterdaten abgeleitet werden konnten.

Wie eingangs erläutert gibt es viele Datenquellen zu solchen Änderungen (Barsugli et al. 2013), die allerdings insbesondere auf der regionalen Skala zumindest scheinbar widersprüchliche Ergebnisse liefern (Hewitson et al. 2014). Darüber hinaus gibt es Hinweise darauf, dass operationelle RCMs Änderungen in extremen Sommerniederschlägen nicht plausibel abbilden (Kendon et al. 2014; Kendon et al., 2017; Meredith et al. 2015).

Laut aktuellem IPCC Bericht (Doblas Reyes et al., 2021) erhöht eine Destillation, die auf verschiedenen Evidenzlinien aufbaut und den jeweiligen Nutzerkontext berücksichtigt, die Fitness, Nützlichkeit und Relevanz der Information für Entscheidungsträger:innen und erhöht das Vertrauen in diese Information. Ziel von SPIRIT war es, diesen Prozess weitestgehend umzusetzen und darüberhinaus konkret auszuformulieren und anzuwenden. Tatsächlich sind Erfahrungen aus dem SPIRIT Projekt zu Destillation in eben den IPCC Bericht eingeflossen.

Die Destillation in SPIRIT umfasste einen Vergleich verschiedener Modellensembles, eine prozessbasierte Modellevaluation, eine Analyse der Treiber von Änderungen in Extremniederschlägen, die Attribution von Projektionsunsicherheiten und den Vergleich von direktem Modelloutput mit zwei physikalisch motivierten konzeptionellen Modellen, und die Auswahl von geeigneten Klimamodellen. Darüberhinaus wurde der Nutzerkontext explizit berücksichtigt. Tatsächlich wurde ein neuer Ansatz für die Bereitstellung von nutzerrelevanten Klimaservices entwickelt. Im folgenden werden die Wahl dieser Ansätze motiviert.

Ensemblevergleich

Klimamodelle sind – wie alle Modelle – imperfekte Annäherungen an die Wirklichkeit. Verschiedene Modelle umfassen dabei unterschiedliche Skalenbereiche. Kein Modell kann zur Zeit alle für Extremniederschläge relevanten Skalen von der Konvektion (~1km) bis zu planetarischen Wellen (~10000km) auflösen. Es ist deshalb wichtig zu verstehen, welche Prozesse welche Modelltypen plausibel abbilden, für welche Zwecke sie eingesetzt werden können (engl. Fitness for Purpose; Parker, 2009), und wie sich Projektionen zwischen verschiedenen Modelltypen unterscheiden.

Aus diesem Grund wurden in SPIRIT eine Reihe von Modellensembles untersucht, die über die letzten Jahre entweder direkt für die Impaktmodellierung genutzt wurden, Randbedingungen für RCMs geliefert haben, oder die Basis für kommende RCM Ensembles bieten werden. Dies sind die RCM Ensembles ENSEMBLES und EURO-CORDEX, sowie die zugrundeliegenden GCM Ensembles CMIP3 und CMIP5 sowie das aktuelle CMIP6 GCM Ensemble. Zusätzlich wurde ein neues Ensemble hochauflösender GCMs betrachtet. Die CORDEX-FPS Simulationen mit konvektionsauflösenden RCMs waren nur verspätet verfügbar und wurden deshalb separat betrachtet.

Verschiedene Evidenzlinien

Das Vertrauen in eine Projektion steigt, wenn verschiedene Ansätze zu konsistenten Ergebnissen führen. In SPIRIT wurden deshalb verschiedene Evidenzlinien betrachtet. Zunächst wurden Niederschlagsextrema direkt aus den Modellen extrahiert. Zusätzlich wurden aber noch zwei unterschiedliche, physikalisch motivierte Ansätze verwendet.

- Ein statistisch physikalisches Modell wurde entwickelt, das regionale Prädiktoren mit dem Auftreten von Gewittern verknüpft hat. Diese Prädiktoren beschreiben physikalische Variablen und Prozesse, die schwere Gewitter begünstigen (Doswell et al., 1996): Instabilität der Troposphäre, Feuchtigkeit, Hebung und vertikale Windscherung. Dieses Modell kann sowohl zur Modellevaluation eingesetzt werden als auch zu Vorhersagen von lokalen Gewittern, die von den Modellen selbst nicht aufgelöst werden.
- Eine Skalierungsbeziehung (O’Gorman & Schneider, 2009) wurde genutzt, die den Niederschlag direkt als Funktion der vertikalen Profile von Temperatur- und vertikalem Wind berechnet. Diese Beziehung eignet sich zum einen, um Niederschlagsintensitäten zu plausibilisieren, und zum anderen, um Unsicherheiten in dynamische und thermodynamische Anteile zu zerlegen.

Prozessbasierte Evaluation

Das Auftreten von lokalem Extremwetter wird stark durch die synoptische Wetterlage bestimmt (Hofstätter et al., 2018). Das Auftreten solcher Wetterlagen wird allerdings in vielen GCMs (und direkter Folge des Downscalings RCMs) nicht korrekt simuliert. Deshalb haben wir in SPIRIT eine umfassende Evaluation der Repräsentation von Lamb-Wettertypen in CMIP5 und CMIP6 GCMs durchgeführt. Für Lamb Wettertypen haben wir uns entschieden, da sie die atmosphärische Zirkulation auf der relevanten Skala (~3000km) repräsentieren und einfach zu berechnen sind. Sie wurden bereits erfolgreich für die Analyse von Extremniederschlägen eingesetzt (e.g. Maraun et al., 2010).

Für die Evaluation regionaler Einflussfaktoren wurde das statistisch physikalische Modell genutzt.

Analyse Planetarischer Treiber

Änderungen im Auftreten synoptischer Wetterlagen der mittleren Breiten (und deshalb auch Extrem-niederschlägen), d.h. Änderungen in der Atmosphärendynamik, werden stark durch planetarische Treiber bestimmt (Manzini et al., 2014; Shepherd, 2014; Zappa & Shepherd, 2017). Verschiedene Treiber haben dabei oft gegenläufige Einflüsse (sogenanntes Tauziehen, engl. Tug of Wars; Barnes & Screen, 2015). Unsicherheiten in regionalen Klimaprojektionen sind deshalb oft groß. Deshalb ist es wichtig, den Einfluss planetarischer Treiber auf Extremniederschläge zu verstehen. Dazu wurde im SPIRIT Projekt eine Regression zwischen ausgewählten großskaligen Prozessen und regionalen Extremniederschlägen durchgeführt. Diese Analyse erhöht zum einen unser Prozessverständnis über Niederschlagsänderungen, zum anderen erklärt sie Unsicherheitsquellen in Projektionen von Extremniederschlägen und kann zur Konstruktion von Storylines (Shepherd et al., 2018; Zappa & Shepherd, 2017) genutzt werden.

Analyse lokaler Prozesse

Mehrere Studien (z.B. Kendon et al. 2014; Kendon et al., 2017; Meredith et al. 2015) deuten an, dass lokale Prozesse, die für Extremniederschläge relevant sind, von GCMs und Standard-RCMs (~12km) nicht realistisch abgebildet werden. Deshalb war ein Kernaspekt von SPIRIT die Analyse von konvektionsauflösenden RCMs (~3km) aus der CORDEX-Flagship Pilot Study zu konvektiven Phänomenen (Coppola et al., 2021). Für die Analyse wurde die Skalierungsmethode von O’Gorman & Schneider angepasst, die Extremniederschläge in thermodynamische (vertikales Temperaturprofil) und dynamische (vertikales Profil der vertikalen Geschwindigkeit) Beiträge zerlegt. Diese wurden durch die Analyse von physikalischen Variablen wie Convective Available Potential Energy (CAPE) oder Convective Inhibition (CIN) ergänzt.

Modellauswahl

Ein wichtiger Aspekt der Destillation ist die Selektion geeigneter Modelle. In der Praxis bedeutet dies häufig das Ausschließen von Modellen, die relevante Prozesse nicht realistisch oder plausibel simulieren. Solch eine Selektion vermindert die Gefahr von nicht-plausiblen Ergebnissen und reduziert idealerweise die Unsicherheiten in Projektionen. Aus diesem Grund wurden in SPIRIT zum einen die prozessbasierten Evaluationen genutzt, um Modelle zu identifizieren, die die großskalige atmosphärische Zirkulation nicht realistisch simulieren. Zum anderen wurden verschiedene Ensembles systematisch verglichen, um zu identifizieren, ob einzelne Ensembles speziell Änderungen extremer Sommerniederschläge nicht plausibel simulieren.

Nutzerrelevante Climate Services durch Climate Consultants

Wie oben erörtert, leidet die Bereitstellung von Klimadienstleistungen unter dem Dilemma, entweder maßgeschneiderte Informationen und Unterstützung anzubieten, die nur für einige wenige ausgewählte Nutzer als Ergebnisse spezifischer Projekte zur Verfügung stehen, oder ein breites Spektrum potenzieller Nutzer zu erreichen, jedoch mit eher allgemeinen Informationen und wenig Unterstützung bei der Interpretation dieser Informationen. Ein Hauptziel von SPIRIT war daher die Entwicklung und Implementierung eines neuen Ansatzes für Climate Services, der die Vorteile beider Ansätze kombiniert, d. h. maßgeschneiderte Informationen für ein breites Spektrum von Nutzern bietet. Die Idee war, regionale operative Meteorologen des österreichischen Wetterdienstes GeoSphere einzubinden, die auch als Klimaberater tätig sind. Diese Experten verfügen über ein fundiertes Wissen über die regionalen klimatischen Bedingungen sowie über typische Auswirkungen und Bedürfnisse regionaler Nutzer. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Ergebnisse von SPIRIT in operationelle regionale Climate Services integriert werden, wodurch eine nachhaltige Nutzung für ein breites Spektrum von regionalen Nutzern in ganz Österreich gewährleistet wird (Maraun et al., in Vorbereitung).

7 Arbeits- und Zeitplan

WP2: 10/2019 bis 12/2023

pünktlich, aber die Abschlussworkshops mussten verschoben werden, um die endgültigen Ergebnisse abzuwarten;

WP3: 10/2019 bis 03/2021

pünktlich;

WP4: 12/2019 bis 12/2023

um 15 Monate verzögert;

WP5: 01/2021 bis 09/2022

um 8 Monate verzögert;

WP6: 10/2021 bis 12/2023

um 15 Monate verzögert infolge früherer Verzögerungen.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Veröffentlichungen in begutachteten wissenschaftlichen Journalen

- Maraun, D., Truhetz, H., and Schaffer, A. (2021). Regional Climate Model Biases, Their Dependence on Synoptic Circulation Biases and the Potential for Bias Adjustment: A Process - Oriented Evaluation of the Austrian Regional Climate Projections. *J. Geophys. Res. Atmos.* 126, e2020JD032824. <https://doi.org/10.1029/2020JD032824>
- Ritzhaupt, N., and Maraun, D. (2023). Consistency of seasonal mean and extreme precipitation projections over Europe across a range of climate model ensembles. *J. Geophys. Res. Atmos.* 128, e2022JD037845. <https://doi.org/10.1029/2022JD037845>
- Ritzhaupt, N. and D. Maraun (2024). State-of-the-art climate models reduce dominant dynamical uncertainty in projections of extreme precipitation. *Environ. Res.: Climate* 3, 021001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ad2eb2>
- Sobolowski, S., S. Somot, J. Fernandez, G. Evin, D. Maraun, S. Kotlarski, M. Jury, R.E. Benestad, C. Teichmann, O.B. Christensen, K. Bülow, E. Buonomo, E. Katragkou, C. Steger, S. Sørland, G. Nikulin, C. McSweeney, A. Dobler, T. Palmer, R. Wilcke, J. Boé, L. Brunner, A. Ribes, S. Qasmi, P. Nabat, F. Sevault, T. Oudar and S. Brands. EURO-CORDEX CMIP6 GCM Selection & Ensemble Design: Best Practices and Recommendations. Submitted to *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*

Veröffentlichungen in Vorbereitung

- Maraun, D., D. Bojovic, T. Shepherd, S. Sobolowski, A. Dosio, W. Parker, C. Caminade, C. Jack, A. Sorenson, S. Somot, L. Diaz, V. Hernández, L. Pereira and F. Robledo. We need to account for user values, power relationships and language in climate information construction. In preparation.
- Pistotnik, G., H. Rust, A. Gobiet, D. Maraun, H. Rieder, K. Haslinger. Identification of predictors and meteorological environments for heavy convective rain in the Alpine region. In preparation.
- Pistotnik, G., A. Gobiet, D. Maraun, T. Schellander-Gorgas, K. Haslinger. Statistical modelling of the heavy convective rain hazard in the Alpine region with EURO-CORDEX simulations. In preparation.
- Ritzhaupt, N., S. Sobolowski, D. Maraun, M. Tölle, T. Frisius, S. Brienens, S. Bastin, H. Truhetz and C. Caillaud. Importance of vertical velocity in changes of extreme precipitation in convection-permitting climate simulations. In preparation.

Vorträge und Poster

- Maraun, D. Climate Information Distillation: IPCC Discussion and Examples from Austria. EURO-CORDEX General Assembly, 2024 (online Vortrag).
- Maraun, D. Generating trustworthy regional climate change information. WetWeather Workshop, Gregynog Hall, Wales, UK, 2022 (eingeladener Vortrag)
- Ritzhaupt, N., S. P. Sobolowski, D. Maraun, and others. Applying a scaling approach for extreme precipitation to disentangle thermodynamic and dynamic contributions to CORDEX-FPS simulations. EGU General Assembly, Vienna. 2023 (Poster).
- Ritzhaupt, N., and D. Maraun. Differences in the regional pattern of projected changes in extreme precipitation over Europe are driven by the dynamic contribution. EGU General Assembly, 2022 (online Vortrag).
- Ritzhaupt, N., and D. Maraun. Robustheit von saisonalen Klimaänderungssignalen für Extremniederschläge über Europa, DACH Conference, 2022 (online Vortrag).
- Ritzhaupt, N., D. Maraun, A. Gobiet, and G. Pistotnik. Supporting climate service providers by distilling information about future precipitation extremes (SPIRIT). Austrian Klimatag, 2022 (online Vortrag).
- Ritzhaupt, N., and D. Maraun. Robustness of projections of European precipitation for seasonal means and seasonal extremes. SMILE Webinar at EGU General Assembly, 2022 (online Vortrag).
- Ritzhaupt, N., and D. Maraun. Robustness of projections of European precipitation for seasonal means and seasonal extremes. EGU General Assembly, 2021 (online Poster).
- Ritzhaupt, N., D. Maraun, A. Gobiet, and G. Pistotnik. Supporting climate service providers by distilling information about future precipitation extremes (SPIRIT). Austrian Klimatag, 2021 (online Poster).

Präsentationen und Veröffentlichungen für Stakeholder

- Gobiet, Regenwasser im Klimawandel, Fachtagungen Regenwasser in der Stadt, Vienna & Graz, 2023.
- Gobiet, Unwetter und Naturkatastrophen – Entwicklung in Vergangenheit und Zukunft, Linzer Brandschutz- und Gebäudesicherheitstage 2022, Linz, 2022.
- Gobiet, A., G. Pistotnik, G. Strommer, D. Leidinger. Meteorologische Auslöser und Auswirkungen des Klimawandels. – Proceedings, ÖWAV-Workshop „Pluviale Hochwässer“, Wien, 2020.
- Lexer, A., K. Haslinger, G. Pistotnik, M. Olefs. Klimawandel in Österreich. – KLAR!-Workshop, Klima- und Energiefonds, online, 2021.

- Maraun, D. The State of Regional Climate Research. ÖWAW, Vienna, 2023.
- Maraun, D. Climate Information for Risk Assessment - A Primer. ERSTE Bank, Wien, 2023.
- Maraun, D. Herausforderungen und Weiterentwicklungen in der Klimamodellierung – Dürre und Starkregen im Klimawandel. ÖWAW (online), 2021.
- Maraun, D. Climate Information for the Construction Sector. PORR AG, Wien, 2021.
- Pistotnik, G., 2020: „Gewitter und Starkniederschlag im Klimawandel (Teil 2)“ – „Climate-Services“-Akademie der ZAMG (interne Fortbildung), ZAMG, Wien.
- Pistotnik, G., A. Gobiet, M. Olefs, K. Haslinger, 2019: Daten und Fakten zum Thema Starkregen: Vergangenheit – Gegenwart – Zukunft. – Proceedings, UR Austria Konferenz, Wien.

Medienarbeit

- Gobiet, A. Klimawandel – Wie äußert er sich in der Steiermark und welche Auswirkungen hat er? Klima- und Energieinitiative des Landes Steiermark "Ich tu´s - für unsere Zukunft",
https://www.youtube.com/watchv=ssNrZOgo_4o
- D. Maraun, Der Klimawandel und seine Folgen ausgehend vom aktuellen IPCC Bericht. Mit dem Wasser Leben. Bezirk Mariatrost, Graz, 2022.
- D. Maraun, Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf Österreich. Hart, 2022.
- D. Maraun, Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf Österreich. Ebersdorf, 2021.
- D. Maraun, Versagt der Puls des Wetters? Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 2021.
- D. Maraun, Regionale Auswirkungen des Klimawandels und Extremwetter, MegaphonUni, Graz, 2020.
- D. Maraun, Wetterlagen sind die weißen Flecken der Klimaforschung. Die Presse, 2020.
- G. Pistotnik, Salzburger Nachrichten: Schäden im dreistelligen Millionenbereich: Hagel immer zerstörerischer, 2021.
- G. Pistotnik, Tiroler Tageszeitung: Immer mehr vermutete Straßen und Rekord-Schäden in Tirol, 2021.
- G. Pistotnik, Brandaus (Magazin der Feuerwehr): Dürre, Unwetter und Tornados, 2021.
- G. Pistotnik, radio programme Ö3-Wecker: Sind wir schon mittendrin im Klimawandel?, 2021

- G. Pistotnik, Der Standard: Ernteprognose – Nach Serie an Unwettern: Landwirten droht heuer noch mehr Hagel, 2021
- G. Pistotnik, ORF2 TV-programme Eco, 2021
- G. Pistotnik, mehrere Interviews und Berichte nach dem zerstörerischen Tornado in Tschechien (z.B. Der Standard, ORF, Kleine Zeitung, Die Presse, Kurier, Ö1, Puls24), 2021.
- G. Pistotnik, Die Presse: Forschungsfrage – Warum sind Gewitter so schwer vorherzusagen?, 2021.
- G. Pistotnik, Radio Bayern 2: Blitze - Extrem und zunehmend gefährlich, 2021.
- G. Pistotnik, Beratung der Sendung Terra X – Faszination Erde, ZDF, 2020
- G. Pistotnik, Interview mit Fridays for Future Osttirol, 2020.
- G. Pistotnik, Brandaus (Magazin der Feuerwehr): Unwetter in Niederösterreich – Warum heuer so häufig und zum größten Teil immer in den gleichen Gebieten?, 2020.
- G. Pistotnik, ORF: Klimaveränderung: Unwetter am Rand des Westwindbands, 2020.
- G. Pistotnik, Jö-Live Radio Interview, 2020.
- G. Pistotnik, Ö1: Es braut sich etwas zusammen – Extremwetter und das Leben damit, 2020.
- G. Pistotnik, Falter: Dürre trotz jeder Menge Regen – Österreichs Wetterlage wird zum Doppelspiel aus mehr Starkregenperioden und mehr Hitze, 2020
- G. Pistotnik, Der Standard: Sind Gewitter in jüngster Zeit heftiger geworden?, 2020

Überarbeitung des ZAMG (jetzt GeoSphere) Informationsportal zu Klimawandel

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/extremwerte>

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/starkniederschlag>

ZAMG Presseaussendung zur wachsenden Zahl von Extremwetterlagen, 2020

Doktorarbeiten

Nicole Ritzhaupt plant Ihre Doktorarbeit einzureichen, sobald ihr drittes Paper eingereicht ist (Ende April oder anfang Mai). Die Verteidigung ist für den Frühsommer geplant.

Literatur

APCC (2014), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2.

Ban, N. et al. incl. D. Maraun and H. Truhetz (2021): The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: Evaluation of precipitation. *Climate Dynamics*, 57, 275-302.

Barnes, E. A., & Screen, J. A. (2015). The impact of Arctic warming on the midlatitude jet-stream: Can it? Has it? Will it?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(3), 277-286.

Barsugli, JJ et al. (2013), 'The practitioner's dilemma: How to assess the credibility of downscaled climate projections', *EOS* 94(46), 424–425.

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), 064006.

E. Coppola et al. incl. D. Maraun (2021), A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean, *Clim. Dynam.*, 55, 3–34.

Davini, P., & d'Andrea, F. (2020). From CMIP3 to CMIP6: Northern Hemisphere atmospheric blocking simulation in present and future climate. *Journal of Climate*, 33(23), 10021-10038.

Doblas-Reyes, F. J., A. A. Sörensson, M. Almazroui, A. Dosio, W. J. Gutowski, R. Haarsma, R. Hamdi, B. Hewitson, W-T. Kwon, B. L. Lamptey, D. Maraun, T. S. Stephenson, I. Takayabu, L. Terray, A. Turner, Z. Zuo (2021), Linking Global to Regional Climate Change. 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*. Cambridge University Press.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.

Giorgi, F., & Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual review of environment and resources*, 40, 467-490.

Haarsma, R. J. et al. (2016). High resolution model intercomparison project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(11), 4185-4208.

Harvey, B. J., Cook, P., Shaffrey, L. C., & Schiemann, R. (2020). The response of the northern hemisphere storm tracks and jet streams to climate change in the CMIP3, CMIP5,

and CMIP6 climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23), e2020JD032701.

Hewitson, B, J Daron, RG Crane, ME Zermoglio & C Jack (2014), Interrogating empirical-statistical downscaling, *Clim. Change* 122, 539-554.

Hewitson, B (2016), Climate Information - Is something missing? Talk at the ICRC-CORDEX conference, Stockholm, May 2016.

Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M., & Blöschl, G. (2018). Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *International Journal of Climatology*, 38, e497-e517.

Jacob, D et al. (2014), 'EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research.', *Reg. Environ. Change* 14, 563–578.

Jacob D. et al. incl. D. Maraun (2020), Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg. Env. Change* 20, 51, 2020.

Jones, P.D., M. Hulme and K.R. Briffa (1993). A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Climatol.*, 13, 655-663.

Kendon, EJ, NM Roberts, HJ Fowler, MJ Roberts, SC Chan, and CA Senior (2014), Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model, *Nat. Clim. Change* 4, 570-576.

Kendon, E. J., Ban, N., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., ... & Wilkinson, J. M. (2017). Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 79-93.

Kohlhauser, I (2023), Analysing the potential of large-eddy simulations to advance projections of extreme precipitation compared to convection-permitting models, MSc thesis, University of Graz.

Manzini, E., Karpechko, A. Y., Anstey, J., Baldwin, M. P., Black, R. X., Cagnazzo, C., ... & Zappa, G. (2014). Northern winter climate change: Assessment of uncertainty in CMIP5 projections related to stratosphere-troposphere coupling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 7979-7998.

Maraun, D., Truhetz, H., & Schaffer, A. (2021). Regional climate model biases, their dependence on synoptic circulation biases and the potential for bias adjustment: A process-oriented evaluation of the Austrian regional climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(6), e2020JD032824.

Maraun, D., R. Knevels, A.N. Mishra et al. (2022), A severe landslide event in the Alpine foreland under possible future climate and land-use changes. *Communications Earth Environ.* 3, 87.

Meredith, E. P., Maraun, D., Semenov, V. A., & Park, W. (2015). Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24), 12500-12513.

Meehl, G. A. et al. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American meteorological society*, 88(9), 1383-1394.

O'Gorman, P. A., & Schneider, T. (2009). The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(35), 14773-14777.

Pichelli, E. et al. incl. H. Truhetz (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56, 3581-3602.

Ritzhaupt, N. & D. Maraun (2023), Consistency of Seasonal Mean and Extreme Precipitation Projections Over Europe Across a Range of Climate Model Ensembles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(1), e2022JD037845.

Ritzhaupt, N., & Maraun, D. (2024). State-of-the-art climate models reduce dominant dynamical uncertainty in projections of extreme precipitation. *Environmental Research: Climate*, 3, 021001.

Schiemann, R. et al. (2020). Northern Hemisphere blocking simulation in current climate models: evaluating progress from the Climate Model Intercomparison Project Phase 5 to 6 and sensitivity to resolution. *Weather and Climate Dynamics*, 1(1), 277-292.

Shepherd, T. G. (2014). Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nature Geoscience*, 7(10), 703-708.

Shepherd, T. G. et al. incl. D. Maraun (2018). Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Clim. Change*, 151, 555-571.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Van der Linden, P., & Mitchell, J. E. (2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160.

Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.

Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC.

Wussow, G. (1922). *Untere Grenzwerte dichter Regenfälle*. Vieweg.

Zappa, G., & Shepherd, T. G. (2017). Storylines of atmospheric circulation change for European regional climate impact assessment. *Journal of Climate*, 30(16), 6561-6577.

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.