

# Publizierbarer Endbericht

## Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

# A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt				
Kurztitel:	HighEnd: Extremes			
Langtitel:	The Future of Extreme Precipitation Events in the Alpine Region under High End Climate Change Conditions			
Zitiervorschlag:	The Future of Extreme Precipitation Events in the Alpine Region under High End Climate Change Conditions			
Programm inkl. Jahr:	Austrian Climate Research Programme (ACRP), 6. Ausschreibung			
Dauer:	01.04.2014 bis 31.08.2018			
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Mag. Dr. Heimo Truhetz			
Kontaktperson Name:	Mag. Dr. Heimo Truhetz			
Kontaktperson Adresse:	Karl-Franzens-Universität Graz (Uni Graz), Wegener Center für Klima und Globalen Wandel (WEGC), Brandhofgasse 5, A-8010 Graz			
Kontaktperson Telefon:	++43 (0)316 380 8442			
Kontaktperson E-Mail:	heimo.truhetz@uni-graz.at			
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Climate Service Center Germany (GERICS) der Helmholtz-Geesthacht GmbH (HZG), Deutschland			
Schlagwörter:	Klimawandel, Extremereignisse, konvektions- erlaubende Klimamodellierung			
Projektgesamtkosten:	298.018,00 €			
Fördersumme:	298.018,00 €			
Klimafonds-Nr:	KR13AC6K10981			
Erstellt am:	26.02.2019			





## B) Projektübersicht

## 1 Kurzfassung

Die globale Klimaerwärmung für (1) zu einer Beschleunigung des Wasserkreislaufs, (2) zu einer Intensivierung von Niederschlagsereignissen durch den Clausius-Clapeyron'schen Zusammenhang und dessen exponentieller Abhängigkeit von der Klimaerwärmung (bekannt als Super Clausius-Clapeyron'scher Skalierungseffekt) und (3) zu physikalischen Änderungen in Extremereignissen.

Der Raum der Europäischen Alpen ist durch ausgeprägte Gradienten im Klima, häufiges Auftreten von extremen Niederschlagsereignissen, mehrjähriger Schnee- und Eisbedeckung in hohen Lagen sowie durch vielfältige orographisch ausgelöste Strömungsphänomene charakterisiert. Diese Komplexität ist speziell für jedes Vorhersagesystem ob für Wetter oder Klima herausfordernd. Um mit Unsicherheiten im Klimasystem adäguat umzugehen, hat das Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) das "Coordinated Downscaling Experiment" (CORDEX) gestartet, dessen Aufgabe es ist regionale Klimaprojektionen für den Europäischen Kontinent (EURO-CORDEX) mit einer räumlichen Auflösung von 12,5 km und anderen Regionen der Welt zur Verfügung zu stellen. Mittlerweile (ko-beantragt von WEGC und GERICS) wurde eine neue Pilotstudie für konvektive Phänomene, die "Flag Ship Pilot Study (FPS) on convective phenomena over Europe and the Mediterranean" (CORDEX-FPS), durch CORDEX initiiert, um die internationalen Aktivitäten in der Klimamodellierung zu bündeln und um konvektions-erlaubende (3 km Ausflösung) Klimasimulationen in koordinierter Weise durchzuführen. Simulationen dieser Art profitieren von der hohen Auflösung, da Konvektion (z.B. bei Gewitter) (teilweise) numerisch aufgelöst werden.

Parallel dazu hat der Mensch die bedeutende Rolle von Treibhausgasen im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung erkannt. 2010 hat die EU das "2°C Ziel" formuliert. 2015 hat sich die Konferenz der Vertragsparteien UNFCCC auf ein "1,5 °C Ziel" geeinigt. So bedeutend solche Stellungnahmen auch sind, sie stehen in klarem Widerspruch zum beobachteten Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen. Angesichts stetig steigender Treibhausgasemissionen, die mit steigenden Extremereignissen und deren Gefährdungspotentialen antizipiert werden, sind Fragen wie "Was wird geschehen, wenn das 2°C Ziel verfehlt wird?" und "Wie werden extreme Niederschlagsereignisse im Alpenraum aussehen?" von öffentlichem Interesse.

HighEnd: Extremes zielt darauf ab, die Auswirkungen einer starken (RCP8.5) globalen Erwärmung auf extreme Niederschlagsereignisse im Alpenraum zu untersuchen (auch prozessorientiert) und die Vorteile einer moderaten (+2°C/+1,5°) Erwärmung aufzuzeigen. Dazu wurden neue europaweite Klimaprojektionen in Standardauflösung (12,5 km Gitterweite) und mit



konvektions-erlaubender (3 km) Gitterweite für den Alpenraum durchgeführt, sorgfältig ausgewertet und an EURO-CORDEX und CORDEX-FPS geliefert, um auf diese Weise zu multi-Modell Ensembles an Klimaprojektionen beizutragen sowie dem Datenzentrum des Climate Change Center Austria (CCCA).

Die Resultate demonstrieren die Vorteile konvektions-erlaubender Klimasimulationen in Hinblick auf Sommerniederschlag, der Darstellung von Extremereignissen (insbesondere auf der Sub-Tagesskala) und bei der Vermeidung tiefer Unsicherheit, die in allen nicht-konvektions-erlaubenden Klimaprojektionen auftreten kann. Allerdings existieren Modellbias und diese verlangen (1) nach weiterer Modellentwicklung und (2) nach geeigneten Korrekturtechniken die in Klimawandelimpact-Studien eingesetzt werden können. Die Auswertungen betonen weiters die Bedeutung synoptischer Situationen für Niederschlag und der Entwicklung von Extremereignissen – auch im Sommer.

Mit einem neu entwickelten methodischen Ansatz auf Basis der Wettertypisierung (der auch neue Möglichkeiten für die Modellevaluierung und Untersuchungen zum Klimawandel eröffnet) wird zusätzlich gezeigt, dass solche Skalenabhängigkeiten auch unter zukünftigen klimatischen Bedingungen bestehen bleiben (Szenario RCP8.5, Ende des 21. Jahrhunderts). Erste prozessorientierte Untersuchungen (eine gegebene Modellierungskette) zeigen beispielhaft auf, dass die Niederschlagsintensitäten bei heutigen Extremereignissen im Sommer um ca. 25% zunehmen und einen Nord-Süd-Gradienten aufweisen. Im Winter ergibt sich ein schwächerer Anstieg (etwa 10%), der stärker auf Italien, Bayern und die Adria ausgerichtet ist. Diese Änderungen sind in den unterschiedlichen Auflösungen (12,5 km und 3 km) konsistent, aber nicht die Änderungen der saisonalen Mittel. Vor allem über dem Golf von Genua, dem Ligurischen Meer und der Adria im Sommer sind sich die Modelle nicht einig: Das 12,5-km Modell steigt um etwa 40%, während das 3-km Modell geringfügige Abnahmen oder keine Veränderungen anzeigt.

Statistische Analysen nutzerrelevanter Indizes auf Basis des EURO-CORDEX-Ensembles bei globalen Temperaturzunahmen von +1,5 °C, +2,0 °C und +3,0 °C machen die bedeutende Rolle anthropogener Aktivitäten auch bei extremen Niederschlägen im Alpenraum deutlich: während für die +1,5 °C und +2,0 °C Ziele keine signifikanten oder nur geringfügige Veränderungen festgestellt werden konnten, wird für Tage mit Extremereignissen (bei höheren Temperaturzunahmen) eine weitere Zunahme um etwa 10 Tagen südwestlich der Alpen, der Adria und im Südwesten der pannonischen Tiefebene erwartet.

Insgesamt sprechen diese Ergebnisse für (1) eine drastische Reduktion der Treibhausgaskonzentrationen (2) für eine Weiterentwicklung der Klimamodelle und (3) für eine Ausweitung der Modellevaluation und der Analyse von Klimaänderungen insofern, dass sie auch spezifische, Phänomen-bezogene Auswertungen enthalten sollen. Letzteres ist auch ein notwendiger Schritt, wenn die Klimafolgenforschung, Stakeholder und die Öffentlichkeit angemessen (im Sinne einer "Climate Information Distillation") unterstützt werden soll.





## 2 Executive Summary

Global climate warming is assumed to (1) accelerate the hydrological cycle, (2) intensify precipitation events by means of the Clausius-Clapeyron relationship and its exponential dependency from climate warming (known as Super Clausius-Clapeyron Scaling effect, and (3) lead to changes in the physics of extreme events.

The European Alpine region is characterised by distinct climatic gradients, frequent occurrence of extreme precipitation events with associated hazards, perennial snow and ice cover in elevated regions as well as by various orographically triggered flow phenomena. This complexity is specifically challenging any prediction or projection system for weather or climate. In order to properly treat uncertainties in the climate system the World Climate Research Programme (WCRP) has launched the Coordinated Downscaling Experiment (CORDEX) that provides regional climate projections for the European continent (EURO-CORDEX) with a spatial resolution of 12.5 km grid spacing and other regions of the world. Meanwhile, co-applied by WEGC and GERICS, a novel "Flag Ship Pilot Study (FPS) on convective phenomena over Europe and the Mediterranean" (CORDEX-FPS), has been initiated via CORDEX, in order to concentrate international climate modelling activities and to conduct convectionpermitting (3 km grid spacing) climate simulations in a coordinated ensemblebased manner. Such simulations benefit from the high resolution, because deep convection (thunderstorms) becomes (partly) numerically resolved.

In parallel, human society has recognised the important role of greenhouse gases in relation to global climate warming. In 2010, the European Union formulated its "2°C target". In 2015, the Conference of the Parties of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) agreed on the formulation of a "1.5°C target". As important as these statements are, they drastically contradict the observed increase of greenhouse gas concentrations. In the face of continuously increasing greenhouse gas emissions that anticipate an increase in extreme events and the potential damage in populated areas, questions like "What happens, if the '2°C target' is missed?" and "How will extreme precipitation events look like in the Alpine region?" are of public interest.

HighEnd: Extremes aims at investigating the effects of severe (RCP8.5) global warming on extreme precipitation events (also in an process-oriented manner) in the Alpine region and elaborates on the benefits from moderate (+2°C/+1.5°C) warming. By doing so, new pan-European climate projections with a standard resolution (12.5 km grid spacing) and convection-permitting (3 km grid spacing) climate simulations for the Alpine region have been conducted, thoroughly evaluated, and delivered to international initiatives to contribute to multi-model ensembles of climate projections (EURO-CORDEX and CORDEX-FPS) as well as to the datacentre of the Climate Change Center Austria (CCCA).



The results demonstrate the advantage of convection-permitting climate simulations with respect to summer time precipitation, the representation of extreme precipitation events (especially on the sub-daily scale), and in avoiding deep uncertainty that may occur in any non-convection-permitting climate projection. However, biases still exist and ask for (1) further improvements of the models and (2) proper correction/adjustment techniques to be applied in climate change impact studies. The evaluation activities further point out the importance of synoptic constellations for precipitation and the formation of extreme events also during summer time.

From a newly developed methodological approach based on weather typing (that also opens up new opportunities in model evaluation and climate change investigations) it is additionally demonstrated that such dependencies across the scales remain also under future climate conditions (RCP8.5 scenario at the end of the 21st century). First process-oriented climate change impact analyses exemplarily (one given modelling chain) indicate that changes in extreme daily precipitation intensities (>95th percentile) of current extreme events give increases of about 25% in summer with a north-south gradient and weaker (about 10%) increase in winter that is more focused on Italy, Bavaria, and the Adriatic Sea. This is consistently represented in the two resolutions (12.5 km and 3 km grid spacing) but changes for seasonal means: especially, over the Gulf of Genoa, the Ligurian and the Adriatic Sea the models with different grid spacing disagree during summer: the 12.5 km model gives increases of about 40%, while the 3 km model gives slight decreases or no changes.

Statistical analyses of user-relevant indices based on the EURO-CORDEX ensemble under global warming levels of +1.5 °C, +2.0 °C, and +3.0 °C demonstrate the important role of anthropogenic activities also on extreme precipitation in the Alpine region: while no significant or only marginal changes are detected for the +1.5 °C and +2.0 °C targets, days with extreme events with a daily precipitation above the 99<sup>th</sup> percentile are expected to increase by about 10 (compared to the 1.5 °C level) southwest of the Alps, the Adriatic Sea, and in southwestern parts of the Pannonian low land.

These results speak for (1) a drastic reduction of greenhouse gas concentrations in the upcoming years (2) further model development and (3) an extension of model evaluation and climate change impact analysis in such a way, that they should contain analysis specifically bounded to the phenomenon of concern. The latter is also a required step when the climate change impact communities, stakeholders, and the general public shall be adequately supported in the sense of climate information distillation.



#### 3 Hintergrund und Zielsetzung

Im Alpenraum werden Prozesse zur Entstehung von Niederschlag stark von der Orographie beeinflusst (Auer et al., 2005; Isotta et al., 2014). Es gibt zahlreiche Effekte, die zu einer höhenabhängigen Verstärkung führen (Houze, 2012). Diese Einflüsse werden besonders bei Nord / Süd-Strömungen ("Nordstau", "Südstau"; Seibert et al., 2007) am deutlichsten und führen zu charakteristischen Niederschlagsmustern und -extremen. Aber auch frontale Aktivitäten destabilisieren häufig die Grenzschicht und lösen tiefe Konvektion aus (Jenkner et al. 2010; Schemm et al. 2017). Solche Prozesse sind jedoch in globalen Klimamodellen (GCMs) und regionalen Klimamodellen (RCMs), die mit einer horizontalen Gitterweite von 10 km und mehr betrieben werden, nur unzureichend erfasst (z.B. Maraun et al, 2010; Frei et al., 2003; Awan et al., 2011; Suklitsch et al., 2008; Jacob et al., 2007; Vidale et al., 2007). Die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung hydrologischer Extremereignisse ist daher mit großen Unsicherheiten verbunden. Um mit diesen Unsicherheiten adäguat umzugehen, hat das Weltklimaforschungsprogramm (WCRP) das "Coordinated Downscaling Experiment" (CORDEX) (Giorgi et al., 2009) gestartet, dessen Aufgabe es ist regionale Klimaprojektionen für den Europäischen Kontinent (EURO-CORDEX) (Jacob et al., 2014) mit einer räumlichen Auflösung von 12,5 km und anderen Regionen der Welt zur Verfügung zu stellen. Mittlerweile, und auch ko-beantragt von WEGC und GERICS, wurde eine neue Pilotstudie für konvektive Phänomene, die "Flag Ship Pilot Study (FPS) on convective phenomena over Europe and the Mediterranean" (CORDEX-FPS) (Coppola et al., 2018), durch CORDEX initiiert, um die internationalen Aktivitäten in der Klimamodellierung zu bündeln und um konvektions-erlaubende (3 km Auflösung) Klimasimulationen in koordinierter Weise durchzuführen.

Die Situation in Österreich war zu Beginn des Projekts (2014) von einer Aufbruchsstimmung gekennzeichnet: Studien zu regionalen Klimafolgen von extremen Niederschlägen im Alpenraum fanden immer mehr Interesse (z. B. APCC, 2014) und erste Ergebnisse einer neuen Modellierungstechnik, die sogenannten "konvektions-erlaubenden Modelle" (CPMs) zeigten an, dass die Einschränkungen der grobaufgelösten (>100 km Gitterweite) GCMs und Standard-RCMs umgangen werden können. Auch wenn erste kurzfristige Simulationen mit CPMs vielversprechende Ergebnisse zeigten (z. B. Hohenegger et al., 2008; Prein et al., 2013; Kendon et al., 2014), aufgrund ihres hohen Bedarfs an Rechenleistung gab es Langzeitklimasimulationen mit einer Gitterweite von <4 km für den Alpenraum zu dieser Zeit noch nicht und auch das Potential solcher CPMs war (und ist) noch weitgehend unbekannt. Erschwerend kommt hinzu, dass es aufgrund interner Variabilität (Alexandru et al., 2007) im Allgemeinen bei RCMs und CPMs zu Entkopplungen zwischen den Modellen und deren Antriebsdaten kommt (Kida et al., 1991), was es speziell bei prozessbasierten Analysen (etwa durch die Fehlerfortpflanzung entlang der Modellierungskette, z.B. Addor et al., 2016) zu berücksichtigen gilt.



Bei dieser Ausgangslage hat sich HighEnd: Extremes auf die Bearbeitung folgender Ziele konzentriert:

- (1) Untersuchung der Auswirkungen einer starken globalen Erwärmung auf extreme Niederschlagsereignisse und auf nutzerrelevanter Klimaindizes im Alpenraum.
- (2) Analyse des Unterschiedes in den Auswirkungen zwischen moderater (+2°C) und starker globaler Erwärmung auf extreme Niederschlagsereignisse und auf nutzerrelevanter Klimaindizes im Alpenraum.
- (3) Einen Beitrag zu internationalen Initiativen zum Aufbau von Multi-Modell Ensembles an regionalen Klimaprojektionen für Europe zu leisten um deren Aussagekraft zu stärken.

Der methodische Ansatz stützte sich auf zwei Säulen: (1) Untersuchung anwendungsrelevanter Klimaindizes und ihre Abhängigkeit vom Klimawandel im Alpenraum in einem Multi-Modell-Ensemble-Ansatz aus EURO-CORDEX-Projektionen (Jacob et al., 2014) und (2) Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf extreme Niederschlagsereignisse und deren zugrunde liegende Prozesse bei starker und moderater globaler Erwärmung durch einen prozessorientierten Ansatz, der auf den Einsatz von Langzeitklimasimulationen mit konvektions-erlaubender Auflösung basiert. Der Einsatz eines geeigneten Wettertypisierungsverfahrens sollte in den prozessorientierten Studien den Einfluss der internen Variabilität verringern und für Vergleichbarkeit (auf synoptischer Ebene) der untersuchten Phänomene in den einzelnen Simulationen sorgen.

Dazu war die Durchführung neuer Langzeitklimasimulationen für EURO-CORDEX (12,5 km Gitterweite; Zeitraum 1971 bis 2100) für den europäischen Raum und erste langzeitige konvektions-erlaubende (3 km-Raster) Klimasimulationen (CPCS) – auch für die Teilnahme an CORDEX-FPS (Zeitscheiben-Experimente: Perioden 1996 bis 2005 und 2090 bis 2099) – für den Alpenraum mit den drei regionalen Klimamodellen (RCMs), CCLM (Böhm et al., 2006), WRF (Skamarock et al., 2005) ) und REMO (Jacob und Podzun, 1997) geplant.

Letztlich sollten sämtliche Klimasimulationen der breiten Öffentlichkeit durch die Datenportale der Earth System Grid Federation (ESGF; <u>esgf-</u> <u>data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz</u>) sowie dem Datenzentrum des Climate Change Centers Austria (CCCA; <u>data.ccca.ac.at</u>) zur Verfügung gestellt werden.



## 4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Das Projekt war in fünf Arbeitspakete (WPs) strukturiert:

**WPO** wurde eingeführt um die inhaltlichen Arbeitspakete, den Arbeitsablauf zwischen Projektpartnern (WEGC und GERIC) zu koordinieren, um für die Dissemination von Resultaten zu sorgen und um den Anschluss an die internationalen Forschungsaktivitäten (EURO-CORDEX, CORDEX-FPS, CLM- und WRF Modellierungsgruppen) zu koordinieren. Dazu wurden zahlreiche Projekttreffen im Rahmen der jährliche Konferenzen von EURO-CORDEX (2015 bis 2018, in Hamburg), der European Geoscience Union (EGU) (Wien, von 2016 bis 2018) sowie dem Jahrestreffen von CORDEX-FPS (2017, Triest) organisiert.

WP1 war unter anderem für das Management von Daten und HPC Ressourcen verantwortlich. Wie sich herausstellte, war diese Aufgabe nicht einfach: (1) Von November 2014 bis September 2015 wurden die Maschinen im Jülich Supercomputing Centre (JSC) aufgerüstet. Während dieser Zeit standen Rechenressourcen nur sehr begrenzt zur Verfügung. (2) In Österreich wurde der Ausbau des Vienna Scientific Clusters (VSC) zwar bereits 2015 genehmigt, wurde aber bis heute nicht umgesetzt. (3) 2017 hat Österreich die Mitgliedschaft in PRACE (www.prace-ri.eu) ausgesetzt, wodurch es unmöglich wurde Rechenzeitanträge am JSC einzureichen. Die Simulationen wurden letztendlich mit zahlreichen Verzögerungen am JSC und am (völlig überlasteten) VSC durchgeführt. Schließlich hat diese für die Österreichische Regionale Klimamodellierung äußerst fragile Situation dazu geführt, dass das das Kooperationsprojekt GEOCLIM Data Infrastructure Austria (https://wegcenter.uni-graz.at/en/research/arsclisys-researchgroup/projects/geoclim), geleitet von Prof. Dr. Gottfried Kirchengast (Leiter des Wegener Centers), erfolgreich beim Hochschulraumstrukturmittelfonds (HRSM) eingereicht und genehmigt wurde. In GEOCLIM werden unter anderem Datenspeicher und ein kleiner HPC (50 Knoten) für die Österreichische

Klimamodellierung installiert.

WP1 inkludierte auch die Akquise und Analyse von Beobachtungsdaten, der Bereitstellung der Antriebsdaten aus einem geeigneten GCM als Antrieb für die geplanten Simulationen, die Durchführung des Datenaustausches zwischen den Projektpartnern, der ESGF und dem CCCA. Außerdem wurde in WP1 auch die Auswahl eines geeigneten GCMs, welches das

Treibhausgaskonzentrationsszenario RCP8.5 (Riahi et al., 2007) mit einer globalen Erwärmung von 4,9 (+1,2/-0,9) °C (Rogelj et al., 2012) umsetzt, durchgeführt. Die Auswahl wurde nach zwei Gesichtspunkten durchgeführt: (1) das GCM muss seine Fähigkeiten das globale Klimasystem abzubilden und seine Sensitivität bezüglich klimatischer Veränderungen unter Beweis gestellt haben und (2) das GCM sollte potentiell die bestehenden Klimasimulationen von EURO-CORDEX und jene am CCCA Datenzentrum erweitern. Ein geeignetes Modell wurde im **MPI-ESM-LR** (Stevens et al., 2013) gefunden, gestützt durch die Untersuchungen von Jury et al. (2015) über die Performanz von GCM bezüglich



ihrer Darstellung von bodennaher Variablen und Variablen der mittleren Troposphäre.

Da Beobachtungsdaten gerade in gebirgigen Regionen mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, wurde zunächst eine ausführliche Qualitätsuntersuchung durchgeführt. Insgesamt wurden im Rahnem von HighEnd: Extremes 10 gerasterte Beobachtungsdatensätze mit Re-Analyse-getriebenen RCMs aus EURO-CORDEX verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Unterschiede zwischen den Beobachtungsdatensätzen bei Monatsdaten etwa im selben Wertebereich liegen wie die RCMs (**Abbildung 1**). Diese Resultate wurden in Prein und Gobiet (2017) publiziert.



Abbildung 1: Überblick über regionale gerasterte Beobachtungsdatensätze (die Zahlen entsprechen der Zahl an involvierten Stationen) (links). Jahresgänge von beobachteten und modellierten (EURO-CORDEX) Monatsmittel von Tagesniederschlagssummen im Alpenraum (rechts). Die Ergebnisse unterschiedlicher Beobachtungsdatensätze sind als durchgehende Linien eingetragen, die Modelldaten sind punktiert. Veröffentlicht in Prein und Gobiet (2017).

In **WP2**, wurden zunächst bestehende konvektions-erlaubende Simulationen (CPSs) in internationalem Kontext hinsichtlich ihres Nutzens geprüft. Eine der Hauptaussagen ist, dass CPSs hauptsächlich von der expliziten numerischen Behandlung tiefereichender Konvektion profitieren. Das kann exemplarisch am durchschnittlichen Tagesgang des Niederschlags im Sommer gezeigt werden (**Abbildung 2**). Weitere Vorteile ergeben sich bei Interaktionen zwischen dem Boden, der Vegetation und der Atmosphäre und in Gebieten ausgeprägter Topographie. Erste Klimaänderungssignale deuten weiters eine Verschiebung in den Niederschlagsarten hin zu einem höheren Flüssiganteil hin, der potentiell in Zukunft das Risiko für Hagel senken dafür jenes für Überflutungen steigen lassen könnte. Mit der Veröffentlichung dieser Resultate in Prein et al. (2015) ist es gelungen, ein international beachtetes Paper in der Geschichte der konvektionserlaubenden Klimasimulationen zu platzieren.





Abbildung 2: Mittlerer Tagesgang des Niederschlags (a) in der Schweiz im Sommer, (b) in Südengland übers Jahr, (c) in der Schweiz speziell im Juli 2006, (d) im Ostalpenraum im Sommer, und (e) in Baden-Württemberg, Deutschland, im Sommer. Alle konvektions-erlaubenden Simulationen zeigen Verbesserungen in der Form (Startzeitpunkt und Höchstwert) des Tagesganges im Vergleich zu ihren gröber aufgelösten Geschwistersimulationen. Veröffentlicht in Prein et al. (2015).

Angespornt durch den Erfolg von CPSs (Prein et al., 2015) wurden unter Verwendung höchst aufgelöster gerasteter Beobachtungsdaten, die zuvor geprüft wurden (siehe Prein und Gobiet, 2017, und in Absprache mit Kollegen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG: Michael Hofstätter, Alexander Kann und Klaus Haslinger), die Modelle WRF und CCLM hinsichtlich der Verstärkung des Niederschlags durch die Orographie untersucht. Dazu wurden die Modelldaten aus Re-Analyse-getriebener (ERA-Interim; Simmons et al., 2007) Simulationen aus dem FWF Projekt NHCM-2 (nhcm-2.uni-graz.at) (Projektnummer P24758-N29) und aus EURO-CORDEX verwendet. Anhand der Analysefelder des Nowcasting-Systems INCA (Haiden et al., 2011), die aus mit Bodenstationen kalibrierten Radardaten bestehen, konnte festgestellt werden, dass beide Modell in Gebieten auf einer Seehöhe kleiner 600 m eine reduzierte Nachmittagsspitze im Niederschlag aufweisen. Allerdings aus unterschiedlichen Gründen: in CCLM wird die Erstreckung der Niederschlagsgebiete unterschätzt, in WRF sind die Niederschlagsintensitäten geringer. Der Vergleich mit INCA zeigt weiters, dass CCLM mit 12,5 km (3 km) Auflösung die stündlichen Niederschlagsintensitäten bis zum 90. Perzentil (97. Perzentil) im Winter überund darüber in zunehmendem Maß unterschätzt, während im Sommer diese Intensitäten generell in CCLM 12,5 km unterschätzt werden und es in CCLM 3 km zu deutlichen Verbesserungen kommt. Allerdings ist die Verlässlichkeit bei INCA bei diesen hohen Niederschlagsintensitäten fragwürdig. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die Modellbias in CCLM 3 km (die sich Großteils verringern, wenn interne Modellvariabilität vermieden werden kann) im Winter, aber vor allem auch im Sommer, hauptsächlich von der Aktivität von Fronten herrühren.



Dies unterstreicht die dominante Rolle von synoptischen Vorgängen auch im Sommer. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden bei der *Meteorologischen Zeitschrift* eingereicht und sind derzeit in Revision (Piazza et a.).

In einer großangelegten (30 Modellierungsgruppen) Untersuchung im Kontext von CORDEX-FPS konnte mit Unterstützung von HighEnd: Extremes die Anwendbarkeit von CPCSs für die Klimamodellierung hinsichtlich der Erfassung von Extremereignissen unter Beweis gestellt werden. Weiters wurde hier auch die bedeutende Rolle von interner Variabilität bei der Entstehung von Extremereignissen aufgezeigt. Diese Resultate wurden in Coppola et al. (2018) publiziert.

Da Extremereignisse im Alpenraum und deren zugrundeliegenden Prozesse ("ingredients of extremes", Doswell et al., 1996; Lin et al., 2001) zum Teil spezifischen Wettersituationen zugeordnet werden können (Seibert et al., 2007) wurde ein spezielles Wettertypisierungsverfahren für Extremereignisse entwickelt und zur (synoptischen) prozessbasierten Modellevaluation und zu (synoptischen) prozessbasierten Untersuchungen des Klimawandels herangezogen. Damit konnten die negativen Auswirkungen der internen Variabilität bei der Modellevaluation und den Untersuchungen zum Klimawandel (WP3) umgangen und einzelne Extremereignisse isoliert werden. Im Zuge der COST-Aktion 733 (Tveito und Pasqui, 2007) wurden bereits zahlreiche Wettertypisierungsverfahren wie sie von den Wetterdiensten verwendet werden bewertet. Von den 71 betrachteten Verfahren sind jene, die auf der Hauptkomponentenanalyse (PCA) und einer hierarchischen Clusteranalyse (HCA) basieren, für den Alpenraum am geeignetsten (Schiemann und Frei, 2010). In HighEnd: Extremes wurde das Schema PCACA27 (Philipp et al., 2014), nachdem die zwei folgenden wesentlichen Änderungen vorgenommen wurden, implementiert. (1) Es wurde eine technische Verbesserung vorgenommen, um die Zuordnungen von Wettersituationen zu deren zuvor im Hauptkomponentenraum (PC-Raum) definierten Wettertypen auch im PC-Raum zu gewährleisten und (2) wurde die gesamte Klassifizierungsstrategie überarbeitet, da es sich herausstellte, dass Wettertypisierungsverfahren mit einer höheren Anzahl von Wettertypen (Clustern) numerisch instabil werden. Eine Publikation, die diese beiden wichtigsten Änderungen zusammenfasst, ist derzeit unter der Mitwirkung von Andreas Philipp, Universität Augsburg, Leiter von COST 733, in Vorbereitung.

Mit Hilfe dieses überarbeiteten Wettertypisierungsverfahrens wurden zunächst Abhängigkeiten von Extremereignissen von ihren synoptischen Treibern (Prädiktoren) auf Basis von Re-Analyse Feldern (ERA-Interim) und dem hochaufgelösten (6 km Gitterweite) Niederschlagsdatensatz EURO4M-APGD (Isotta et al., 2014) untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass es einige Extremereignisse mit einem Tagesniederschlag größer als das 99isgte Perzentil gibt, die nur selten etwa bis zu 5 mal in der Periode 1979 bis 2011 vorkamen, welche mit dem neuen Wettertypisierungsverfahren jedoch eindeutig identifiziert werden konnten. Mit zunehmender Häufigkeit von Wettertypen sinkt die Anzahl



der damit verbunden Extremereignisse ab. Das neue Verfahren kann somit auch zur Identifizierung von Nicht-Extremereignissen verwendet werden.

Als Beispiel sei hier der Wettertyp "BCCA" genannte, der in den Sommern der Periode 1979 bis 2011 21 Mal vorkam und an einem Ort Extremniederschlagsereignisse mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 40% getroffen hat. Im Gegensatz kam der Wettertyp "BCCF" 122 mal vor, hat das 99. Perzentil aber kein einziges Mal erreicht (**Abbildung 3**).



Abbildung 3: Perzentilränge prognostizierter Tagesniederschläge in den Sommern von 1979 bis 2011 von ausgewählten Wettertypen. Links: Typ "BCCA" und rechts Typ "BCCF".

Um die Anwendbarkeit des neuen Verfahrens zu demonstrieren wurde dessen "Vorhersagefähigkeit" für Tagesniederschläge jenseits des 99isten Perzentils in der Periode 1979 bis 2011 auf Basis ERA-Interim untersucht und mit bestehenden Verfahren verglichen. Als Vergleichsmaß wurde der Brier Skill Score (BSS) verwendet. Dieselbe Evaluierungsstrategie wurde bereits während der COST Action 733 von Schiemann und Frei (2010) angewandt. Hier konnte bereits gezeigt werden, dass alle Wettertypisierungsverfahren relativ niedrige BSS Werte bei Extremereignissen aufweisen: das 80igste Perzentil konnte im Mittel über dem Alpenraum nur mit einem BSS von bestenfalls 0,16 prognostiziert werden, das 95igste Perzentil nur noch mit 0,08. Der BSS für das 99igste Perzentil liegt für PCACA27 nur noch bei 0,02. Eine bessere Leistung erbringen manuelle Verfahren, wie beispielsweise jene der ZAMG (von Thomas Krennert zur Verfügung gestellt). Das neue in HighEnd: Extremes entwickelte Verfahren erreicht jedoch deutlich bessere BSS Werte von ~0,1 und darüber (siehe **Abbildung 4**).



Abbildung 4: Brier Skill Score (BSS) zur Prognose von Tagesniederschlägen jenseits des 99igsten Perzentils im Alpenraum basierend auf dem Beobachtungsdatensatz EURO4M-APGD und ERA-Interim. Links: das Originalverfahren PCACA27 aus COST 733. In der Mitte: ein manuelles Verfahren der ZAMG. Rechts: das HighEnd:Extremes-Verfahren.



Mit Hilfe des Wettertypisierungsverfahrens wurden Modellbias bei mit ERA-Interim angetriebenen Simulationen entlang deren Downscaling-Kette (12,5 km Gitterweite → 3 km Gitterweite) untersucht. Dazu wurde zunächst der Modelloutput am 12,5 km Gitter, der auch als Antrieb des Modells im 3 km Gitter diente, mithilfe einer konservativen Remapping-Methode in das ERA-Interim-Gitter gebracht. Anschließend wurde das auf ERA-Interim kalibrierte Typisierungsverfahren auf den ge-remappten 12,5 km Modelloutput angewandt. Damit entsprachen die modellierten und beobachteten (EURO4M-APGD) Tagesniederschläge denselben synoptischen Zuständen und waren unmittelbar vergleichbar. Als beispielhaftes Ergebnis sind die Abweichungen der Modelle vom Beobachtungsdatensatz vom Wettertyp "BCCA" in **Abbildung 5** dargestellt. Im Falle des Wettertyps BCCA weichen die Muster der Niederschlagsbias in den unterschiedlichen Modellauflösungen kaum voneinander ab. Im 3 km Gitter sind sie etwas stärker ausgeprägt.



Abbildung 5: Niederschlagsbias [mm d-1] des Wettertyps BCCA im Modell mit (links) 12,5 km Gitterweite und (rechts) 3 km Gitterweite gemittelt über die Periode 1989 bis 2010.

**WP3** war für die Erstellung neuer EURO-CORDEX (12,5 km Gitterweite; Europa) und CPCs für den Alpenraum (3 km Gitterweite) entsprechende des CORDEX-FPS Protokolls sowie für die Prozess-orientierten Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf Extremereignisse mittels des neuen

Wettertypisierungsverfahrens (WP2) zuständig. Die Klimasimulationen wurden am Jülich Supercomputer Centre (JSC; <u>www.fz-juelich.de</u>) und – aufgrund einer Unterbrechung der PRACE (<u>www.prace-ri.eu</u>) Mitgliedschaft Österreichs 2017 – am Vienna Scientific Cluster (VSC; vsc.ac.at) durchgeführt. Die Antriebsdaten wurden aus dem in WP1 ermittelten GCM, dem MPI-ESM-LR, welches die Klimaentwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts unter Annahme des "business-as-usual" Treibhausgaskonzentrationsszenarios RCP8.5 simuliert, gewonnen und in das RCM CCLM eingespeist, welches eine EURO-CORDEX Klimasimulation und in weiterer Folge eine konvektionserlaubende Klimasimulationen für den Alpenraum erstellte. Die Simulationen wurden anschließend den Datenportalen der ESGF und CORDEX-FPS zur Verfügung gestellt. Generell kann nun gesagt werden, dass die Simulationen in beiden Auflösungen (12,5 km und 3 km Gitterweite) im Wesentlichen einen



übereinstimmenden Anstieg der extremen (über dem 95. Perzentil) Tagesniederschlagsintensitäten (gemittelt über alle Wettertypen, die in der Lage sind Extremereignisse hervor zu bringen) in allen Saisonen der Periode 2090 bis 2099 verglichen mit der Periode 1996 bis 2005 aufzeigen. Stärkste Zuwächse wurden im Sommer in der Höhe von etwa 25% mit einem Nord-Süd-Gefälle und im Herbst verzeichnet (Abbildung 6). Selbiges gilt auch für den Winter, jedoch in abgeschwächter Form (rund 10%) mit einer Verlagerung der stärksten Zuwächse auf Italien, Bayern, und der Adria (Abbildung 7). Auch Österreich ist von Zuwächsen von ca. 20% im Sommer betroffen. Sehr ähnliche Klimaänderungssignale werden erhalten, wenn keine Analyse über die Wettertypen erfolgt. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass klimawandelbedingte Änderungen in der Zusammensetzung der Wettertypen für extreme Tagesniederschlagsintensitäten über dem 95. Perzentil eine untergeordnete Rolle spielen. Auch diesbezüglich wurden keine nennenswerten Abweichungen zwischen den beiden Auflösungen (12,5 km und 3 km) festgestellt.



Abbildung 6: Klimaänderungssignale von täglichen Niederschlagsintensitäten >95. Perzentil im Sommer zwischen den Perioden 2090 bis 2099 und 1996 bis 2005. Obere Zeile: EURO-CORDEX Simulation (12,5 km Gitterweite); untere Zeile: konvektions-erlaubende (3 km Gitterweite) Simulation im Gitter der EURO-CORDEX Simulation. Links: Relative Änderung [%]; Mitte: Totale Änderung [mm d-1]; rechts: über alle Wettertypen gemittelte pro Wettertype berechnete relative Änderung [%].





Abbildung 7: Wie Abbildung 6, jedoch für die Wintermonate. .

Eine Publikation, die diese prozess-basierten Untersuchungen auf das konvektions-erlaubende Ensemble von CORDEX-FPS ausdehnt, ist derzeit in Vorbereitung (Truhetz et al.).

In **WP4** wurden neun ausgewählte, im Alpenraum nutzerrelevante Indizes für Extremereignisse und deren Abhängigkeiten vom Klimawandel unter Annahme verschiedener Erwärmungsszenarien (+1,5 °C, +2.0 °C, +3.0 °C) untersucht. Um möglichst aussagekräftige Resultate zu erhalten wurde das gesamte Ensemble an EURO-CORDEX Klimaprojektionen (16 Projektionen in einer Auflösung von 12,5 km) statistisch ausgewertet. Auf diese Weise wird der Einfluss menschlichen Handelns sichtbar gemacht. Beispielsweise ergeben sich für die Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsrate über dem 99. Perzentil für die +1,5°C und +2,0°C Ziele keine signifikanten Änderungen, während sich bei +3,0°C ein statistisch signifikanter Zuwachs von 10 Tagen und mehr südwestlich der Alpen, der Adria und im Südwesten der pannonischen Tiefebene ergibt (**Abbildung 8**). Diese Untersuchungen wurden auf ganz Europa ausgedehnt und in Teichmann et al. (2018) zusammengefasst und publiziert.





Abbildung 8: Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsrate größer als das 99. Perzentil und seine Änderungen bei verschiedenen globalen Erwärmungsszenarien. (a) repräsentiert das gegenwärtige Klima durch den Beobachtungsdatensatz E-OBS; (b) zeigt das Klimaänderungssignal bei einer globale Temperaturzunahme von +1,5°C; (c) und (d) zeigen die weiteren Änderungen bezogen auf das +1,5°C Niveau für die globalen Temperaturzunahmen von +2,0°C und +3,0°C. Statistisch nicht signifikante Änderungen sind grau dargestellt.

Darüber hinaus wurden neue CPCSs Simulationen mit REMO-nh (Göttl, 2009) durchgeführt, was dessen Implementation und Weiterentwicklung impliziert. Genauer gesagt, wurde der dynamische Kern des Modells und die physikalischen Pakete im Rahmen von HighEnd: Extremes intensiv weiterentwickelt. Die Verwendbarkeit von REMO-nh für Klimasimulationen wurde in der großangelegten Studie zusammen mit CCLM und WRF im Kontext von CORDEX-FPS basierend auf ausgewählten Extremereignissen im Alpenraum (siehe auch WP2) unter Beweis gestellt und in Coppola et al. (2018) publiziert werden.

Die neuen EURO-CORDEX Simulationen wurden auf die Server der ESGF überspielt. Die neuen CPCSs wurden der CORDEX-FPS Community zur Verfügung gestellt. Ein Datentransfer zum CCCA Datenzentrum ist derzeit noch im Gange.



## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der Vergleich von zahlreichen Beobachtungsdaten für Niederschlag auf Monatsbasis mit den von Re-Analysefeldern angetriebenen RCMs aus EURO-CORDEX hat deutlich gezeigt, dass im Alpenraum die Bandbreite der Beobachtungsdaten und die Bandbreite der Simulationsergebnisse in etwa von derselben Größenordnung sind (Prein und Gobiet, 2017). Dies hat weitreichende Konsequenzen für die gesamte Klimamodellierung. Eine sorgfältige Analyse der Beobachtungsdaten und eine entsprechende, auf eine zukünftige Anwendung der Modelle abzielende Selektion der Beobachtungsdaten muss bereits in der Modellevaluation zum integrativen Bestandteil werden. Jene Phänomene, dessen Auswirkungen durch den Klimawandel mittels Klimamodellierung untersucht werden soll, müssen sowohl in den Beobachtungsdaten als auch in den Klimamodellen adäquat abgebildet werden.

Konvektionserlaubende Klimamodelle sind ein geeignetes Instrument zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels. Sie profitieren vor allem von der expliziten numerischen Erfassung der tiefen Konvektion, die zu Verbesserungen bei Sommerniederschlägen, in Gebirgsregionen und bei Wechselwirkungen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre führt. Erste Klimaänderungssignale aus solchen Simulationen zeigen eine Zunahme von kurzen und extremen Regenfällen und ein erhöhtes Verhältnis von flüssigem zu festem Niederschlag an der Oberfläche (Hagelabnahme), was zu häufigeren Sturzfluten führen kann (Prein et al., 2015). Diese Zusammenfassung ist ein wichtiges Meilensteinpapier, das den Fortschritt der konvektions-erlaubenden Klimasimulationen weltweit unterstützt.

Modellentwicklungen und -verbesserungen durch HighEnd: Extremes bei WRF, CCLM und REMO-nh haben ihren Erfolg bei der Simulation extremer Niederschlagsereignisse unter konvektiven Bedingungen in einer großangelegten internationalen Vergleichsstudie in CORDEX-FPS unter Beweis gestellt. In diesem Zusammenhang wurde auch die Bedeutung interner Variabilität für die Entstehung von Extremereignissen im Alpenraum wurde aufgezeigt (Coppola et al., 2018). Aufgrund der internen Variabilität können einzelne Extremereignisse in der Natur und in Klimamodellen ohne spezieller Anpassungen nicht verglichen werden. Eine Möglichkeit besteht im statistischen Vergleich oder eine spezielle auf das Phänomen abzielende Selektion, was in diesem Zusammenhang maschinell erfolgen muss, da ein Durchforsten sämtlicher Modelldaten manuell nicht umsetzbar ist, und dadurch eine Entwicklung neuer Methoden und Algorithmen einfordert.

Obwohl sich konvektions-erlaubende Modelle in vielerlei Hinsicht als vorteilhaft erwiesen haben, zeigen CCLM und WRF im Tiefland des Ostalpenraums (unter einer Seehöhe von 600 m) im Sommer eine Verringerung der Niederschlagsspitze am Nachmittag. Und zwar aus unterschiedlichen Gründen: In CCLM sind die Niederschlagsgebiete zu gering, in WRF werden die Niederschlagsintensitäten reduziert. Darüber hinaus sind Abweichungen im



Niederschlag zwischen den Modellen und den Beobachtungsdaten im saisonalen Mittel (Überschätzung in höheren Lagen; Unterschätzung in Niederungen) von frontalen Aktivitäten (in CCLM) dominiert (Piazza et al., in Begutachtung). Diese Informationen unterstützen sowohl die weitere Modellentwicklung als auch die Interpretation von Klimaprojektion in Klimafolgenstudien. Sie spricht außerdem für die Entwicklung neuer Techniken zur prozessbasierten oder "phänomenbasierten" Modellevaluation und zur Untersuchung des Klimawandels (ein Nachfolgeprojekt an den Österreichischen Wissenschaftsfonds ist derzeit in Vorbereitung).

Ein neues Wettertypisierungsverfahren für extreme Niederschlagsereignisse im Alpenraum wurde vollkommen neu entwickelt. Es ermöglicht die Identifizierung einzelner Extremereignisse sowohl in Re-Analysefeldern als auch in Klimamodelldaten und ist in der Lage interne Variabilität zu umgehen. Das volle Potenzial dieses Ansatzes ist noch lange nicht ausgeschöpft und erfordert weitere Untersuchungen und Entwicklungen. Es ist bereits Teil des Nachfolgeprojekts reclip:convex und wird zukünftige Modellevaluationen sowie die Analyse von Klimaprojektionen unterstützen. Derzeit befindet sich ein methodisches Papier in Vorbereitung (Truhetz et al., in Vorbereitung).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Extremereignisse mit täglichen Niederschlagsintensitäten jenseits des 95. Perzentils, wurden in einer Modellkette (CCLM mit 12,5 km und 3 km Gitterweite) exemplarisch für das Treibhausgasszenario RCP8.5 prozessbasiert mit Hilfe des neuen Wettertypisierungsverfahrens ermittelt. Demnach kommt es bei solchen Extremereignissen zu einem Anstieg in den Niederschlagsintensitäten von rund 25% im Sommer (mit einem Nord-Süd-Gradienten). Der Anstieg ist im Winter schwächer ausgeprägt und mehr auf Italien, Bayern und die Adria konzentriert. Änderungen in der Zusammensetzung der Wettertypen spielen hier (im Gegensatz zu Änderungen im saisonalen Gesamtniederschlag) nur eine untergeordnete Rolle. Diese Ergebnisse sind von der Modellauflösung (12,5 km, 3 km) nahezu unabhängig. Im saisonalen Niederschlag kommt es hingegen zu einem abweichenden Verhalten: Über dem Golf von Genua, dem Ligurischen Meer und der Adria sind die Modelle im Winter nicht einverstanden. Hier prognostiziert die Auflösung von 12 km einen Anstieg, während die Auflösung von 3 km weniger oder gar keine Änderungen bewirkt. Ein Indiz für tiefe Unsicherheit in allen gröber aufgelösten (nicht-konvenktions-erlaubend) Klimaprojektionen. Änderungen in der Zusammensetzung der Wettertypen spielen für den Anstieg der sommerlichen Niederschläge im Nordwesten und Norden der Alpen eine entscheidende Rolle (Truhetz et al., in Vorbereitung). Diese Ergebnisse machen den Einsatz konvektions-erlaubender Modelle zur Generierung von Klimaprojektionen unumgänglich und fordert einen weiteren Ausbau Österreichischer HPC Kapazitäten.

Die statistische Analysen nutzerrelevanter Indizes auf Basis des EURO-CORDEX-Ensembles bei globalen Temperaturzunahmen von +1,5 °C, +2,0 °C und +3,0 °C machen die bedeutende Rolle anthropogener Aktivitäten auch bei



extremen Niederschlägen im Alpenraum deutlich: während für die +1,5 °C und +2,0 °C Ziele keine signifikanten oder nur geringfügige Veränderungen festgestellt werden konnten, wird für Tage mit Extremereignissen (bei höheren Temperaturzunahmen) eine weitere Zunahme um etwa 10 südwestlich der Alpen, der Adria und im Südwesten der pannonischen Tiefebene erwartet. Diese Ergebnisse gelten jedoch nur vorbehaltlich, da sie mit tiefen Unsicherheiten behaftet sein könnten.

HighEnd: Extremes hat auch den fragilen Status von HPC-Systemen in Österreich und ihre weitreichenden Auswirkungen auf die Forschung aufgezeigt: Österreich hat 2017 seine Mitgliedschaft in PRACE, einer europäischen Initiative zur Bereitstellung von Zugang zu großen Computersystemen (Tier-0 und Tier-1), für mehr als ein Jahr unterbrochen, während es den Österreichischen HPC-Clustern an ausreichenden Kapazitäten mangeln. Um die nationalen HPC-Systeme zu stärken, wurde 2017 das Hochschulraumstrukturmittel (HSRM) Projekt "GEOCLIM" eingereicht und angenommen. Ein Ziel von GEOCLIM besteht darin, die Österreichische Regionale Klimamodellierung mit Datenspeicher und HPC-Kapazität in den kommenden Jahren zu unterstützen.



# C) Projektdetails

## 6 Methodik

GCMs können aufgrund ihrer geringen Auflösung (100 km Gitterweite und mehr) und anderer Einschränkungen extreme Niederschlagsereignisse nur mit großen Unsicherheiten abbilden (z.B. Rosa und Collins, 2013; Jiang et al., 2015; Sillmann et al., 2017). Eine Möglichkeit, diese Schwächen zu umgehen besteht in der Anwendung von Regionalen Klimamodellen (RCMs) (Giorgi und Bates, 1989). Diese sind auf das Untersuchungsgebiet beschränkt, arbeiten hier aber mit deutlich höheren Auflösungen. In EURO-CORDEX hat man sich auf eine Gitterweite von 12,5 km für den Europäischen Kontinent geeinigt (Jacob et al., 2014). Dabei werden dem RCM an den seitlichen Rändern sowie an den Meeresoberflächen die aktuellen Zahlenwerte von einem GCM vorgegeben (das RCM wird vom GCM "angetrieben"), während das RCM in seinem Inneren eine neue Lösung findet und das GCM auf eine höhere Auflösung bringt. Dieses Verfahren wird auch als "Dynamisches Downscaling" bezeichnet. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Vorgehensweise Vorteile bringt, insbesondere bei komplexem Gelände (Kotlarski et al., 2014; Katragkou et al., 2015; Suklitsch et al., 2008; Prein et al. 2015b; Thorma et al., 2015). Dennoch ist es bei diesen noch nicht möglich tiefe Konvektion adäguat abzubilden, sodass sogenannte "Parametrisierungen" benötigt werden, um in den RCMs und GCMs beispielsweise einzelne Gewitter zu erhalten. Diese Parametrisierungen sind hauptverantwortlich für Bias (Brockhaus et al., 2008; Berg et al., 2013; Prein et al., 2013a; Fosser et al., 2015; Ban et al., 2014) und Unsicherheiten (Knight et al., 2007; Sanderson et al., 2008; Sherwood et al., 2014) in diesen Modellen. Erst bei höheren Auflösungen (Gitterweite <4 km; Weisman et al., 1997) wird tiefe Konvektion zumindest teilweise numerisch aufgelöst, sodass diese Parametrisierungen abgeschaltet werden können (Prein et al., 2015). Dieser Umstand wird in HighEnd: Extremes und in CORDEX-FSP ausgenutzt und es werden sogenannte "konvektions-erlaubende" Klimasimulationen (CPCSs) erstellt.

Der methodische Ansatz im Allgemeinen basiert in HighEnd: Extremes auf zwei Säulen: (1) Die Untersuchung anwendungsrelevanter Klimaindizes im Alpenraum und ihrer Abhängigkeit von der Stärke der zu erwartenden Temperaturerhöhung in einem statistischen Multi-Modell-Ensemble-Ansatz mittels Klimaprojektionen aus EURO-CORDEX. (2) Der Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf extreme Niederschlagsereignisse und deren zugrundeliegenden Prozesse durch einen prozessorientierten Ansatz, der die Vorteile von konvektionserlaubenden Klimasimulationen ausnutzt. Insgesamt kamen vier verschiedene regionale Klimamodelle, CCLM (Böhm et al., 2006), WRF (Skamarock et al., 2005), REMO (Jacob und Podzun, 1997) und REMO-nh (Göttl, 2009) zum Einsatz. **Abbildung 9** zeigt die Modellgebiete, wie sie in EURO-CORDEX und CORDEX-FPS (und damit auch in HighEnd: Extremes) verwendet werden.





Abbildung 9: Fokusregionen EURO-CORDEX (12,5 km Gitterweite; rot strichliert) und CORDEX-FPS (3 km Gitterweite; weißes Polygon) und zugehörige Modellgebiete von WRF (rot bzw. orange)

Allerdings sind die benötigten Ressourcen für CPCSs enorm: für die Erstellung einer EURO-CORDEX/CODEX-FPS Kombination (in der 12,5 km Auflösung läuft das Modell transient von 1949 bis 2100, in der 3 km Auflösung in den Perioden 1996 bis 2005 und 2090 bis 2099) werden bei Verwendung von 24 Knoten am VSC-3 rund **3,9 Mio core-h** benötigt. Das entspricht etwa einem Drittel der Ressourcen, die der Karl-Franzens-Universität Graz am VSC-3 zur Verfügung stehen. Dennoch ist dieser Einsatz durch die Vermeidung von Unsicherheiten und dem hohen Bedarf an hochaufgelöster Klimawandelinformation (z.B. ÖKS15, STARC-Impact; Chimani et al., 2016; Chimani et al., 2019) gerechtfertigt. Die in HighEnd: Extremes geplanten und teilweise durchgeführten und an EURO-CORDEX (ESGF) und CORDEX-FPS ausgelieferten Simulationen sind in Tabelle 1 gelistet.



**Tabelle 1:** Simulationen, die in HighEnd:Extremes und unterstützend im FWF Projekt NHCM-2 für die Arbeitspakete WP2, WP3 und WP4 geplante waren. Abgeschlossene Simulationen sind mit "\*)" gekennzeichnet, nicht abgeschlossene Simulationen werden im Rahmen von CORDEX-FPS und im HighEnd:Extremes-Folgeprojekt, reclip:convex, abgeschlossen.

RCM	Δx	Gebiet	Antriebsdaten	Perioden	Partner	Quelle
CCLM <sup>*)</sup>	3 km	GAR	ERA-Interim	1989-2010	WEGC	NHCM-2
WRF <sup>*)</sup>	3 km	GAR	ERA-Interim	1989-2010	WEGC	NHCM-2
REMO- nh <sup>*)</sup>	3 km	GAR	ERA-Interim	Ereignisse	GERICS	NHCM-2
CCLM <sup>*)</sup>	3 km	GAR	MPI-LSM-LR (RCP8.5)	1996-2005 2090-2099	WEGC	HighEnd:Extremes
WRF	3 km	GAR	MPI-LSM-LR (RCP8.5)	1971-2000 2071-2100	WEGC	HighEnd:Extremes
REMO- nh	3 km	GAR	MPI-LSM-LR (RCP8.5)	Ereignisse	GERICS	HighEnd:Extremes
CCLM <sup>*)</sup>	12.5 km	EU	MPI-LSM-LR (RCP8.5)	1949-2100	WEGC	HighEnd:Extremes
WRF	12.5 km	EU	MPI-LSM-LR (RCP8.5)	1971-2100	WEGC	HighEnd:Extremes
REMO <sup>*)</sup>	12.5 km	EU	MPI-LSM-LR (RCP8.5)	1950-2100	GERICS	HighEnd:Extremes

Diese Simulationen bildeten den Grundstock für die in HighEnd: Extremes durchgeführten Analysen. Fehlende Simulationen wurden durch bestehende aus EURO-CORDEX ersetzt.

Modellentwicklung musste vor allem bei REMO-nh (und zu einem geringen Ausmaß für WRF, siehe **Kapitel 8**) betrieben werden. Vor allem Module zur Phasenumwandlung von Wasser, der Feuchteadvektion und die Berechnung der vertikalen Komponente der Geschwindigkeit (siehe **Abbildung 10**) musste stabilisiert werden.



Abbildung 10: Vertikale Geschwindigkeit in REMO-nh in einer Höhe von etwa 8 km über Grund. Links: ursprüngliche Version; rechts: verbesserte Version.



Um den Effekt der internen Variabilität zu minimieren und um Extremereignisse eventbezogen untersuchen zu können wurde ein Wettertypisierungsverfahren basierend auf PCACA27 (Philipp et al., 2014) aus der COST Action 733 (Tveito und Pasqui, 2007) entwickelt. Aus bisherigen Untersuchungen von Schiemann und Frei (2010) von war bereits bekannt, dass Wettertypisierungsverfahren für Extremereignisse nur schlecht geeignet sind. In HighEnd: Extremes wurde nun festgestellt, dass bei PCACA27 die Zuweisung einzelner Wettersituationen in der Anwendung zu Wettertypen, die in der Trainingsperiode gewonnen wurden, im Realraum anstelle im Hauptkomponentenraum erfolgt. Als Konsequenz ist PCACA27 nicht in der Lage die Ergebnisse der Trainingsphase zu reproduzieren. Beispielsweise kommt es bei der Trainigsperiode von 1979 bis 2011 unter der Verwendung von Tagesfeldern aus ERA-Interim zu mehr als 25% Fehlzuordnungen (**Abbildung 11**). Gerade bei Extremereignissen kann das zu erratischem Verhalten führen.



Abbildung 11: Einfluss der Hauptkomponententransfer-Transferfunktion auf die Zuweisung einzelner Wettersituationen zu vordefinierten Wettertypen aus ERA-Interim (Periode 1979 bis 2011). Im Falle von 27 Wettertypen führt die Zuordnung im Realraum (links) zu 25% Fehlzuordnungen. Erfolgt die Zuordnung im Hauptkomponentenraum, kann das Ergebnis der Trainingsperiode reproduziert werden (rechts).

Eine weitere Schwierigkeit besteht in der Stabilität der Wettertypisierung. Mit zunehmender Zahl an Wettertypen steigt auch das Risiko, dass einzelne Wettersituation am "Rand" eines Wettertyps unter dem Einfluss von Perturbationen einem anderen Wettertyp zugeordnet werden. Die Wettertypisierung wird somit instabil. Mit Hilfe einer Boottrapping Methode wurde die Stabilität von PCACA27 basierend auf Druckfeldern auf Meeresniveau aus ERA-Interim (Periode 1979 bis 2011) in Abhängigkeit der Anzahl von Wettertypen untersucht (Hennig, 2007). Als Stabilitätsmaß wurde der auf den Jaccard-Index (1901) basierenden Jaccard-Koeffizient (Hennig, 2007) verwendet. Kann die Wettertypisierung den Perturbationen in den Druckfeldern exakt folgen, nimmt der Jaccard-Koeffizient den Wert 1 an. Im Bereich zwischen 0,75 bis 0,85 treten Unsicherheiten auf, im Bereich 0,6 bis 0,75 sind diese dominant. Fällt der Jaccard-Koeffizient auf 0,6, ist die Wettertypisierung völlig instabil. Werden im Falle von PCACA27 mehr als 7 Wettertypen eingesetzt, ist das Resultat bereits instabil (Abbildung 12, links). Inspiriert durch die Arbeiten von Meredith et al. (2018) wurde die Wettertypisierung in HighEnd: Extremes auf jene Einzelevents trainiert, bei denen irgendwo im Alpenraum (Periode 1979 bis 2011) im



Beobachtungsdatensatz EURO4M-APGD (Isotta et al., 2014) eine Tagesniederschlagsintensität größer dem 99. Perzentil auftritt. Dadurch wird zwar die Spezialisierung auf extreme Niederschlagsereignisse möglich, aber es nimmt auch die Stabilität der Wettertypisierung weiter ab (**Abbildung 12**, rechts).



Abbildung 12: Stabilität (Jaccard-Koeffizient) für Druck auf Meeresniveau als Funktion der Anzahl an Wettertypen durch einen Bootstrapping-Ansatz ermittelt. Links: Periode 1979 bis 2011; rechts: für selektierte Ereignisse mit einer Tagesniederschlagsintensität >99. Perzentil im Beobachtungsdatensatz EURO4M-APGD.

In HighEnd: Extremes wurde zur Erhaltung der Stabilität die Anzahl an Wettertypen möglichst gering gehalten. Allerdings kann dadurch keine hohe Treffsicherheit von Extremereignissen erreicht werden, auch wenn das Wettertypisierungsverfahren auf Situationen mit Tagesniederschlagsintensitäten von >99. Perzentil trainiert wurde (**Abbildung 13**).



Abbildung 13: Birer Skill Score (BSS) zur Prognose von Tagesniederschlägen jenseits des 99. Perzentils im Alpenraum basierend auf dem Beobachtungsdatensatz EURO4M-APGD und ERA-Interim.

Um eine gute Treffsicherheit zu erhalten, wurden mehrere Prädiktoren miteinander kombiniert. Das Wettertypisierungsverfahren wurde dazu



unabhängig voneinander auf die unterschiedlichen Prädiktoren angewandt und anschließend zu "Meta-Typen" zusammengesetzt. Die verwendeten Prädiktoren und deren Anzahl an Wettertypen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Prediktor	Abkürzung	Einheit	Anzahl
Vertikal integrierter Wasserdampf	TCWV	kg m <sup>-1</sup>	4
Druck auf Meeresniveau	SLP	hPa	3
Showalter Index	SI	К	3
Niederschlag	PREC	mm d <sup>-1</sup>	6

 Tabelle 2: Prädiktoren für das Wettertypisierungsverfahren.

Damit gelingt die Identifikation einzelner Extremereignisse und es wird ein BSS von ~0,1 und mehr erreicht (siehe **Abbildung 4**)

Um interne Variabilität und die nur schwer einschätzbaren Effekte des zukünftigen menschlichen Verhaltens in die Analysen aufzunehmen, wurden bei der Ermittlung der Auswirkungen auf nutzerrelevante Indizes das gesamte EURO-CORDEX Ensemble (insgesamt 16 Klimaprojektionen verteilt auf die Treibausgaskonzentrations-Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) herangezogen.

Die Berechnung des globalen Temperaturanstieges folgte hier dem Vorgehen von Vautard et al. (2014). Dazu wird dem beobachteten globalen Temperaturanstieg von 0,46°C zwischen der vorindustriellen Zeit (1881 bis 1910) und er Referenzperiode (1971 bis 2000) der Temperaturanstieg aus zukünftigen 30-Jahresperioden für jedes GCM individuell hinzugezählt. Sobald der mittlere Gesamttemperaturanstieg (seit 1881) einer solchen 30 Jahresperiode zum ersten Mal die vorgegebenen Temperaturanstiege (+1,5°C, +2,0°C, +3,0°C) überschritten werden, werden Klimaänderungssignale aus den zugehörigen EURO-CORDEX Klimaprojektionen für die nutzerrelevanten Indizes berechnet. Auf Ebene der Gitterzellen wird die Signifikanz der Klimaänderungssignale mit Hilfe des zweiseitigen Mann–Whitney-U Tests (Mann und Whitney, 1947) geprüft (Konfidenzlevel 90%). Sind mehr als 66% aller Klimaprojektionen signifikant, wird das gesamte Ensemble als signifikant betrachtet. Diese Vorgehensweise wurde von Pfeifer et al. (2015) vorgeschlagen.

Für den Niederschlag wurden 9 Indizes des "Expert Team on Climate Change Detection and Indices" (ETCCDI) (<u>etccdi.pacificclimate.org</u>) verwendet (Tabelle 3).



Indices	Units	Description
1. PRCPTOT	(mm)	Precipitation sum
2. RR1	(days)	Number of wet days (RRCPTOT $\geq$ 1 mm)
3. CWD	(days)	Maximum number of consecutive wet days
4. R20mm	(days)	Very heavy precipitation days (RRCPTOT $\geq$ 20 mm)
5. R75p	(days)	Days with rain rate > 75th percentile of daily amounts (moderate wet days)
6. R95p	(days)	Days with rain rate > 95th percentile of daily amounts (very wet days)
7. R95pTOT	(%)	Precipitation fraction due to very wet days (> 95th percentile)
8. R99p	(days)	Days with rain rate > 99th percentile of daily amounts (extremely wet days)
9. R99pTOT	(%)	Precipitation fraction due to extremely wet days (> 99th percentile)

#### R 2.1 M 1.5 M3.2 CLM 3 49 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 M4.3 M4.3 M 4.4 M3.1 CLM M 1.2 M 1.5 R4.1 M2.3 R2.2 3 0.2 M 1.4 19 20 21 22 23 24 25 26 27 M 1.5 M4.1 M 1.2 18 M 1.4 17 15 16 11 12 13 14 M 1.5 02 03 04 05 06 07 08 09 10

M 1.3

Acquisition, preparation, and exchange of reference

(Aluc

Data management and resources Acquisition and management of data storage Acquisition of computational resources at JSC

and CSC, separately)

wiload of existing EURO-CORDEX data and tto WEGC and CSC change of RCM output from WP 3 and WP 4

01

oject management and outreach Project: HighEnd:Extremes (Gant

[M 2.1]

w W EGC and CSC : Ingredients of extreme precipitation events Selection and implementation of a weather typing

Analysis of extreme precipitation events Scale-bridging analysis of extreme precipitation sincl. model evaluation entation of novel evaluation techniques in extreme precipitatio ensemble climate

7 Arbeits- und Zeitplan

# moderately and severely changing climate WP ... Work Package; M ... Milestone; R ... Result climate indices r 4.5: Comparison between i

an source memory for the first of the first

ribute to the build-up of the multi-mode

R4.3

M 4.5

workshops

- WP 0: Project management and outrach R 0.1: Suttau and final periods
   R 0.2: Contribution to international conference; (e.g. CLM Assembly) R 0.2: Data and/serrent (and IDC-CORDE) and KIMD 2; R 0.3: Data and/serrent and resources and KIMD 2; R 0.4: Float anningement and resources and KIMD 2; WP 1: Data anningement and resources and KIMD 2; M 1: Sub anningement and resources and KIMD 2; M 1: Sub anningement and resources and KIMD 2; M 1: Sub anningement and resources and KIMD 2; M 1: Sub CoREX (all period (a) WP 1; M 1: Sub CoREX (all period (a) WP 1; M 2: Reteres data period (a) WP 2; M 2: Nether impred protom sedect M 2: Nether impred proto

- W 3. Climate charge effects in acternine practigitation M3.1: CHO-CONDRA structures (MRV) camplesed M3.1: CHO-CONDRA structures (MRV) camplesed M3.1: Comparison thera were moderately and severely changing climate B M3.1: Comparison thera were moderately and severely changing climate M3.1: Comparison thera were moderately and severely changing climate B 3.1: CONSTRUCT and WRF schemer and and severely changing climate B 3.1: CONSTRUCT and WRF schemer and and severely changing A 3.2: CCNST with therate effection in a Abhier ergon W 4.1: LUNG-CONDEX Structures (RMIO) completed M 4.1: CUDATE CONSTRUCT and were include the apple of the above M 4.1: CONSTRUCT and severely and severely climate M 4.1: CONSTRUCT and severely and severely climate indices M 4.1: CONSTRUCT and severely and severely climate indices M 4.1: CONSTRUCT and severely and severely climate indices M 4.1: Constructions projections contracter indices and year M 4.1: Constructions and severely climate indices and year M 4.1: Constructions and severely climate indices and year M 4.1: Constructions there are not and severely climate indices M 4.1: Constructions there are moderately and severely climate indices M 4.1: Constructions there are moderately and severely climate indices M 4.1: Constructions there are moderately and severely climate indices M 4.1: Constructions in a pre-reviewed purror R 4.1: Pholococcurrent severely and severely climate R 4.1: Pholococcurrent severely and severely climate indices M 4.2: Pholococcurrent severely purror R 4.1: Pholo

PublizierbarerEndberichtStudienForschung\_HighEndExtremes.docx

alysis of extreme precipitation in future climate omparison between moderately and severely VP 4: User relevant climate indices in the Alpine region

change effects in

ions (CCLM, WRF) imate



#### 8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

#### Modellentwicklung

Bei **WRF** wurden zwei Fehler von essentieller Bedeutung für die erfolgreiche Durchführung von langen Klimasimulationen gefunden und korrigiert:

Truhetz, H., K. Görgen, R. Vautard, J. Fernandez, J. Cassano, M. Hughes (2014), Joint error/bug report on WRF/ARW artefacts in upper-level boundary relaxation zone, Report to the National Center for Atmospheric Research (NCAR), pp 17, submitted on 14.7.2014.

Truhetz, H. (2016), WRF/ARW bug fix on the treatment of deep soil temperature invented since version 3.7 (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfv3.7/known-prob-3.7.html).

**CCLM** Entwicklung wurde unterstützt durch unsere Beiträge (1) zu einer (noch andauernden) Vergleichsstudie zur Ermittlung einer ausgewogenen Modellkonfiguration für die Durchführung von konvektions-erlaubende Klimasimulationen (CECPC5.0) im Rahmen der CLM Community (<u>https://www.clm-community.eu</u>) und (2) zur Koordination der CLM Arbeitsgruppe "Convection Resolving Climate Simulations (CRCS)" (<u>https://www.clm-community.eu/index.php?menuid=243</u>) von 2015 bis 2016.

**REMO-nh** ist die von GERICS durch HighEnd: Extremes entwickelte nichthydrostatische Version des Modelles REMO. Es wurde auf der Hautpversammlung der European Geoscience Union (2016), in Wien präsentiert:

Sieck, K, T. Raub, L. Marien, L. Buntemeyer, and D. Jacob (2016), A new generation of the regional climate model REMO: REMO non-hydrostatic, poster at the EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 18-22, 2016.

#### Organisation von Symposien und Konferenzen

HighEnd: Extremes hat die folgenden Veranstaltungen ermöglicht:

• Bei der European Geoscience Union (EGU), Wien, Österreich

"Atmospheric convection and convection-permitting modelling" (CL5.10/AS1.26), 2016, M. Piazza, C. Hohenegger, L. F. Bosart, L. Donner, A. Ferrone, D. Maraun, E. Meredith, A. F. Prein, H. Tost, S. Troemel, H. Truhetz, J.-I. Yano



"Mountain climates: processes, change and related impacts"

(CL4.08/AS1.13/BG4.14/ CR1.12/HS11.5), 2016, A. Gobiet, W. Schöner, D. Maraun, S. Kotlarski, H. Truhetz, N. Pepin, W. Immerzeel, E. Palazzi, M. Stoelzle, E. Gleeson

"Convection-permitting atmospheric modelling" (CL5.11/AS1.32), 2017, Piazza, M., D. Maraun , H. Truhetz , E. Meredith , A. F. Prein , L. F. Bosart

"Mountain climates: processes, change and related impacts", (CL4.07/AS1.14/BG9.18/CR1.7/HS11.3) 2017, Schöner, W., S. Kotlarski, D. Maraun, E. Palazzi, W. Immerzeel, H. Truhetz, E. Gleeson, N. Pepin, A. Gobiet,

"Convection-permitting atmospheric modelling" (CL5.07), 2018, E. Meredith , A. F. Prein, Piazza, M., Steven C. Chang, Coppola, E., H. Truhetz

"Mountain climates: processes, change and related impacts", (CL4.08) 2018, Kotlarski, S., A. Gobiet, D. Maraun, E. Palazzi, W. Immerzeel, H. Truhetz, W. Schöner

• Ein Workshop in Boulder, USA

International workshop on high-resolution climate modelling at NCAR, Boulder, USA, September 6 to 8, 2016; R. Rasmussen, G. Stephens, and A. F. Prein

An der Karl-Franzens-Universität Graz, Österreich

12. CLM Assembly, September 19 – 22, 2017, H. Truhetz, M. Piazza, A. Csáki, R. Mandl, A. Thaller, S. Tschürtz, T. Truhetz (https://wegcwww.unigraz.at/clm2017)

#### Publikationen

Begutachtete Artikel in Fachzeitschriften:

Coppola, E., S. Sobolowski, E. Pichelli, F. Raffaele, B. Ahrens, I. Anders, ... K. Warrach-Sagi (2018), A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. Climate Dynamics, (on line). https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8

*Piazza, M, A. F. Prein, H. Truhetz, A. Csaki (in Revision), On the sensitivity of precipitation in convection-permitting climate simulations in the Eastern Alpine region, Meteorologische Zeitschrift.* 



Prein, A. F., W. Langhans, G. Fosser, A. Ferrone, N. Ban, K. Goergen, M. Keller, M. Toelle, O. Gutjahr, F. Feser, E. Brisson, S. Kollet, J. Schmidli, N. P. M. van Lipzig, and R. Leung (2015), A review on regional convectionpermitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges, *Rev. Geophys.*, 53(2), 323-361, doi: 10.1002/2014RG000475.

Prein, A. F. and A. Gobiet (2017), Impacts of Uncertainties in European Gridded Precipitation Observations on Regional Climate Analysis, Int. J. Climatol., 37(1), 305-327, doi: 10.1002/joc.4706.

Teichmann, C., Bülow, K., Otto, J., Pfeifer, S., Rechid, D., Sieck, K., & Jacob, D. (2018). Avoiding Extremes: Benefits of Staying below +1.5 °C Compared to +2.0 °C and +3.0 °C Global Warming. Atmosphere, 9(4), 115. https://doi.org/10.3390/atmos9040115

Die folgenden Artikel sind derzeit in Vorbereitung:

Truhetz, H., L. Herbsthofer, A. Philipp, On the usage of weather typing schemes in climate change research applications.

Truhetz, H., A. R. C. Remedio, C. Teichmann, K. Görgen, et al., A processbased analysis on climate change effects of extreme precipitation events from the CORDEX-FPS ensemble.

Beiträge zu internationalen Konferenzen und Workshops:

Csáki, A. and H. Truhetz (2016), Validating the COSMO-CLM Regional Climate Model Operated on Convection Permitting Scales over the European Alpine Region in Deep Convection Triggering Weather Situations, poster at the CLM Assembly 2016, Lüneburg, Germany, September 22, 2016.

*Csáki, A., H. Truhetz, and M. Piazza (2016), Comparison of Turbulence and Convection Parametrization Schemes in the COSMO-CLM Model Operated on Convection Permitting Scales over the European Alpine Region, poster at the EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 22, 2016.* 

Herbsthofer, L. and H. Truhetz (2016), Using the Froude Number to Evaluate Flow-above and Blocked-Flow Situations in the European Alpine



Region as Simulated by Convection Permitting Models, poster presented at the EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 20, 2016.

*Piazza*, M., A. F. Prein, H. Truhetz, and A. Csáki (2017), Sensitivity of Precipitation in a Set of Convection-Permitting Simulations in the Alpine Region, talk at the COSMO-CLM User Seminar 2017, Offenbach, Germany, March 7, 2017.

Piazza, M., H. Truhetz, A. Csáki (2016), Elevation-dependency of the representation of precipitation with COSMO-CLM 5.0 at 3km over the Alps (poster), presented at the COSMO-CLM User Seminar, Offenbach, Germany, March 7 – 9, 2016

Piazza, M., H. Truhetz, A. F. Prein, A. Csáki (2015), Evaluation of Sensitivity Experiments for Representation of Precipitation with COSMO-CLM at 3km over the Alps (oral), presented at the CLM General Assembly, Belval, Luxembourg, September 29, 2015

*Piazza*, *M.*, *H. Truhetz*, and *A. F. Prein* (2016), *Evaluation of Precipitation in the Alps for a Small Ensemble of Sensitivity Experiments with COSMO-CLM 5.0 at 3km*, poster at the EGU General Assembly 2016, Vienna, *Austria, April 22, 2016.* 

Prein, A. F., A. Gobiet, H. Truhetz, K. Keuler, K. Görgen, C. Teichmann, C. Fox Maule, E. Van Meijgaard, M. Deque, N. Grigory, R. Vautard, E. Kjellström, D. Jacob (2014), Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits? (poster), AGU Fall Meeting 2014, USA

Prein, A. F., A. Gobiet, H. Truhetz, K. Keuler, K. Görgen, C. Teichmann, C. Fox Maule, E. Van Meijgaard, M. Deque, N. Grigory, R. Vautard, E. Kjellström (2014), Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11 and 0.44 simulations: High resolution, High benefits? (oral), 3rd International Lund Regional-Scale Modelling Workshop on 21st Century Challenges in Regional Climate Modelling, June 16 – 19, 2014, Lund, Sweden

Prein, A. F., W. Langhans, G. Fosser, A. Ferrone, N. Ban, K. Goergen, M. Keller, M. Tölle, O. Gutjahr, F. Feser, E. Brisson, S. Kollet, J. Schmidli, N. Van Lipzig, R. Leung (2014), A review on convection permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges (poster), Engineering For Climate Extremes, Nov 19 – 21, 2014, Boulder, CO, USA

Truhetz, H., A. Csáki, and L. Herbsthofer (2017), Frontal Activity in the Greater Alpine Region in Convection Permitting CCLM Hindcasts and NWP Products, talk at the COSMO/CLM/ICON/ART User Seminar 2017, Offenbach, Germany, March 7, 2017.

Truhetz, H., A. Prein, C. Reszler (2014), Regional climate models – current status and future applications at the Wegener Center (oral), 3rd Vienna Scientific Cluster User Workshop, Feb 24 – 25, Neusiedl am See, Austria.



Truhetz, H., M. Piazza, A. Csáki, L. Herbsthofer, A. F. Prein (2016), A Review on Convection Permitting Climate Simulations (CPCS) in the European Alpine Region (poster), presented at the 8th NIC-Symposium, Jülich, Germany, February 12, 2016

Truhetz, H., M. Piazza, A. R. Remedio, and D. Jacob (2016), Die Zukunft extremer Niederschlagsereignisse im Alpenraum unter starken Klimaänderungsbedingungen - Projekt HighEnd:Extremes, talk at the 17th Österr. Klimatag, Graz, Austria, April 7, 2016.

Sieck, K, T. Raub, L. Marien, L. Buntemeyer, and D. Jacob (2016), A new generation of the regional climate model REMO: REMO non-hydrostatic, poster at the EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 18-22, 2016.

Remedio, A. R., K. Bülow, T. Raub, A. Haensler, D. Jacob, M. Piazza, A. Csaki, H. Truhetz (2017), User-relevant indices derived from high resolution simulations in the Alpine Region, poster at the EGU 2017, Vienna, Austria, April 23-28, 2017.

Das Projekt wurde auch in der Broschüre "ACRP in essence", Dezember 2015, vorgestellt:

Truhetz, H. (2015), HighEnd: Extremes – Die Zukunft extremer Niederschlagsereignisse im Alpenraum unter starken Klimaänderungsbedingungen. Austrian Climate Research Programme in ESSENCE - Naturgefahren, Klima- und Energiefonds 2015, 17-23



#### Literaturverzeichnis

Addor, N., Rohrer, M., Furrer, R., & Seibert, J. (2016). Propagation of biases in climate models from the synoptic to the regional scale: Implications for bias adjustment. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 121(5), 2075–2089. https://doi.org/10.1002/2015JD024040

Alexandru, A., de Elia, R., & Laprise, R. (2007). Internal Variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale. Monthly Weather Review, 135(9), 3221–3238. https://doi.org/10.1175/MWR3456.1

Allan, R. P., B. J. Soden (2008), Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes, Science, 321 (5895), 1481 – 1484, doi: 10.1126/science.1160787.

Allen, M. R. and W. J. Ingram (2002), Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle, 419 (6903), 224–232, doi: 10.1038/nature01092.

**APCC** (2014), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014, (Eds.) H. Kromp-Kolb, N. Nakicenovic, K. Steininger et al., 1094pp, Austrian Panel on Climate Change (APCC), Österreichische Akademie der Wissenschaften. ISBN-13: 978-3-7001-7723-4, available via <u>hw.oeaw.ac.at/7699-2</u>

Awan, N. K., H. Truhetz, and A. Gobiet (2011), Parameterization-Induced Error Characteristics of MM5 and WRF Operated in Climate Mode over the Alpine Region: An Ensemble-Based Analysis, J.Clim., 24(12), 3107-3123, doi: 10.1175/2011JCLI3674.1. Ban, N., Schmidli, J. and Schaer, C.(2015). Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?, Geophys. Res. Lett., 42(4), 1165–1172, doi:10.1002/2014GL062588.

**Ban, N.**, Schmidli, J., & Schaer, C. (2014). Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 119(13), 7889–7907. https://doi.org/10.1002/2014JD021478

**Bárdossy, A.** and E. J. Plate (1992), Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns, Water Resour. Res., 28, 1247–1259.

**Bechtold, P.**, M. Köhler, T. Jung, F. Doblas-Reyes, M. Leutbecher, M. J. Rodwell, F. Vitart, and G. Balsamo (2008), Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales, Q.J.R.Meteorol.Soc., 134(634), 1337-1351, doi: 10.1002/qj.289.

Beck, C., and A. Philipp (2010), Evaluation and comparison of circulation type classifications for the European domain, Phys.Chem.Earth, 35(9-12), doi: 10.1016/j.pce.2010.01.001.

Berg, P., C. Moseley, J. O. Haerter (2013), Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. Nat. Geosci., 6, 181-185, doi:10.1038/ngeo1731.

**Berg, P.**, Wagner, S., Kunstmann, H., & Schädler, G. (2013). High resolution regional climate model simulations for Germany: part I—validation. Climate Dynamics, 40(1–2), 401–414. https://doi.org/10.1007/s00382-012-1508-8

Berthou, S., Kendon, E. J., Chan, S. C., Ban, N., Leutwyler, D., Schär, C. and Fosser, G.: Pan-European climate at convectionpermitting scale: a model intercomparison study, Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-018-4114-6, 2018.

**Böhm, R.** (2012), Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years, Eur. Phys. J. Plus, 127 (5), 54+, doi: 10.1140/epjp/i2012-12054-6.

**Böhm, U.**, M. Kücken, W. Ahrens, A. Block, D. Hauffe, K. Keuler, B. Rockel, and A. Will (2006), CLM - The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications, COSMO Newsletter, 6, 225-235, available via <u>http://cosmo-model.cscs.ch/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter06/</u>

Brockhaus, P., Lüthi, D., & Schär, C. (2008). Aspects of the diurnal cycle in a regional climate model. Meteorol. Z., 17(4), 433–443. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0316

**CDIAC** (2013), Fossil-Fuel CO2 Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), available at <a href="http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2">http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2</a> emis (downloaded at August 15, 2013).

Chappell, C. F. (1986) Quasi-stationary convective events. Mesoscale Meteorology and Forecasting, P. S. Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., 289–310.

**Cheng, C. S.**, G. Li, Q. Li, and H. Auld (2010), A Synoptic Typing Approach to Simulate Daily Rainfall and Extremes in Ontario, Canada: Potential for Climate Change Projections, J. Appl. Met. Clim., 49, 845 – 866, doi: 10.1175/2010JAMC2016.1

Chimani, B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M. und H.Truhetz, 2016. ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wiene https://www.hemt.gv.at/upwolt/klimaszenarien.html

Wien.https://www.bmnt.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik\_national/anpassungsstrategie/klimaszenarien.html

**Chimani, B.**, Matulla C., Eitzinger J., Gorgas-Schellander T., Hiebl J., Hofstätter M., Kubu G., Maraun D., Mendlik T., Thaler S. (2019). Guideline zur Nutzung der OeKS15-Klimawandelsimulationen sowie der entsprechenden gegitterten Beobachtungsdatensätze, Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: https://hdl.handle.net/20.500.11756/e3232e36

Christensen, J. H., and O. B. Christensen (2003), Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe, Nature, 421, 805–806.

Conway, D. and P. D. Jones (1998), The use of weather types and air flow indices for GCM downscaling, J. Hydrol., 212-213, 348–361, doi: 10.1016/S0022-1694(98)00216-9

**Coppola, E.,** S. Sobolowski, E. Pichelli, F. Raffaele, B. Ahrens, I. Anders, ... K. Warrach-Sagi (2018), A first-of-its-kind multimodel convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. Climate Dynamics, (on line). https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8

CRC Press, Inc., Boca Raton, USA.

Dai, A., F. Giorgi and K. E. Trenberth (1999), Observed and model-simulated diurnal cycles of precipitation over the contiguous United States, J. Geophys. Res. Lett., 104 (D6), 6377 – 6402, doi: 10.1029/98JD02720

Doswell, C. A., H. E. Brooks and R. A. Maddox (1996), Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology, Wea. Forecasting, 11, 560–581

**Esteban, P.,** M. Ninyerola, and M. Prohom (2009), Spatial modelling of air temperature and precipitation for Andorra (Pyrenees) from daily circulation patterns, Theoretical and Applied Climatology, 96(1-2), doi: 10.1007/s00704-008-0035-3.



**EU Council** (2010), Climate change: Follow-up to the Copenhagen Conference (7–19 December 2009): Council conclusions. available at <u>http://register.consilium.europa.eu/pdf/en/10/st07/st07562.en10.pdf</u>. Council of the European Union.

**Fosser, G.**, Khodayar, S., & Berg, P. (2015). Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. Climate Dynamics, 44(1–2), 45–60. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2242-1

Franzke, C., T. Woolings and O. Martius (2011), Persistent Circulation Regimes and Preferred Regime Transitions in the North Atlantic, J. Atmos. Sci., 68 (12), 2809–2825, doi: 10.1175/JAS-D-11-046.1.

Frei, C., J. H. Christensen, M. Déqué, D. Jacob, R. G. Jones, P. L. Vidale (2003), Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation an dintercomparison for the European Alps, J. Geophy. Res. 108, 4124, doi: 10.1029/2002JD002287.

**Fuentes, U.**, and D. Heimann (2000), An improved statistical-dynamical downscaling scheme and its application to the alpine precipitation climatology, Theor.Appl.Climatol., 65(3-4), 119-135, doi: 10.1007/s007040070038.

Giorgi, F., & Bates, G. T. (1989). The Climatological Skill of a Regional Model Over Complex Terrain. Monthly Weather Review, 117(11), 2325–2347. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<2325:TCSOAR>2.0.CO;2

Giorgi, F., and E. Coppola (2007), European climate-change oscillation (ECO), Geophys.Res.Lett., 34(21), L21703, doi: 10.1029/2007GL031223.

Giorgi, F., C. Jones, and G. R. Asrar (2009), Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, WMO Bulletin, 58(3), 175-183.

Giorgi, F., E.-S. Im, E. Coppola, N. S. Diffenbaugh, X. J. Gao, L. Mariotti and Y. Shi (2011), Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming, J. Clim., 24, 5309–5324, doi: 10.1175/2011JCLI3979.1

**Gobiet, A.**, S. Kotlarski, M. Beniston, G. Heinrich, J. Rajczak, M. Stoffel (2014), 21st Century Climate Change in the European Alps - A Review, Science of the Total Environment, available online 15 August 2013, ISSN 0048-9697, http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.

**Göttel, H.** (2009), Einfluss der nichthydrostatischen Modellierung und der Niederschlagsverdriftung auf die Ergebnisse regionaler Klimarnodellierung (Ph.D. Thesis) (in German), Reports on Earth System Science, 60, 129 pp., Max-Planck-Institute for Meteorology (MPI-Met), Hamburg, Germany, ISBN 1614-1199.

Häberli, C. (2006), The Comprehensive Alpine Radiosonde Dataset (CALRAS): Contribution to the Regional Climate Diagnostic Based on Upper-Air Soundings 1957-1999, 1st ed., 312 pp., Facultas, Department for Meteorology and Geodynamics, University of Vienna, Vienna, Austria, ISBN 978-3850767736.

Haiden, T., A. Kann, C. Wittmann, G. Pistotnik, B. Bica, and C. Gruber (2011), The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region, *Wea. Forecasting*, *26*(2), 166 – 183, doi: 10.1175/2010WAF2222451.1.

Haimberger, L., C. Tavolato, and S. Sperka (2008), Toward elimination of the warm bias in historic radiosonde temperature records - Some new results from a comprehensive intercomparison of upper-air data, J.Clim., 21(18), 4587-4606, doi: 10.1175/2008JCLI1929.1.

Hay, L. E., G. J. McCabe, D. M. Wolock, and M. A. Ayers (1991), Simulation of precipitation by weather type analysis, Water Resou. Res., 27, 493–501.

Haylock, M., N. Hofstra, A. Klein Tank, E. Klok, P. Jones, and M. New (2008), A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation 1950–2006, J. Geophys. Res.-Atmos., 113 (D20119),doi: 10.1029/2008JD10201.

Heinrich, G., A. Gobiet, H. Truhetz, T. Mendlik (2013), Expected climate change and its uncertainty in the Alpine region: extended uncertainty assessment of the reclip:century and ENSEMBLES multi-model dataset, Sci. Rep. 50, 70 pp, ISBN 978-3-9503112-7-3, Wegener Center Verlag, Graz, Austria.

Held, I. M. and B. J. Soden (2006), Robust responses of the hydrological cycle to global warming, J. Clim., 19 (21), 5686 - 5699, doi: 10.1175/JCLI3990.1

Hennessy, K. J., J. M. Gregory and J. F. B. Mitchell (1997), Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions, Clim. Dyn. 13 (9), 667 – 680, doi: 10.1007/s003820050189.

Hennig, C. (2007). Cluster-wise assessment of cluster stability. Computational Statistics & Data Analysis, 52(1), 258–271. Doi: 10.1016/j.csda.2006.11.025

Hewitt, C. D., and D. J. Griggs (2004), Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES), Eos Trans. AGU, 85(52), 566, doi: 10.1029/2004EO520005.

**Hiebl, J.** and M. Hofstätter (2012), No increase in multi-day temperature variability in Austria following climate warming, Clim. Change, 3-4, 733 – 750, doi: 10.1007/s10584-011-0389-x

**Hofstätter, M.**, Jacobeit J., Homann M., Lexer A., Chimani B., Philipp A., Beck A., Hiebl J., Ganekind M. (2015): WETRAX – Weather patterns, cyclone tracks and related precipitation extremes. Vienna: Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Final Report, 235pp.

Hohenegger, C., P. Brockhaus, C. Schar (2008), Towards climate simulations at cloud-resolving scales. Meteorol Z 17(4):383 – 394. doi:10.1127/0941-2948/2008/0303.

**Isotta, F. A.**, C. Frei, V. Weilguni, M. P. Tadic, P. Lassegues, B. Rudolf, V. Pavan, C. Cacciamani, G. Antolini, S. M. Ratto, M. Munari, S. Micheletti, V. Bonati, C. Lussana, C. Ronchi, E. Panettieri, G. Marigo, and G. Vertacnik (2014), The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data, Int. J. Climatol., 34(5), 1657-1675, doi: 10.1002/joc.3794.

Jaccard, P., (1901), Distribution de la flore alpine dans la Bassin de Dranses et dans quelques regions voisines, Bull. Soc.Vaudoise Sci. Naturelles, 37, 241–272.

Jacob, D. and R. Podzun (1997), Sensitivity studies with the regional climate model REMO, Meteorol.Atmos.Phys., 63(1-2), 119-129, doi: 10.1007/BF01025368.

Jacob, D., J. Petersen, B. Eggert et al. (2013), EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg. Environ. Change, online first, doi: 10.1007/s10113-013-0499-2.

Jacob, D., L. Barring, O. B. Christensen, et al. (2007), An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate, Clim.Change, 81, 31-52, doi: 10.1007/s10584-006-9213-4.



Jacob, D., Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen JH, et al. 2013. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change* 14:563–78

Jiang, Z., Li, W., Xu, J., & Li, L. (2015). Extreme Precipitation Indices over China in CMIP5 Models. Part I: Model Evaluation. Journal of Climate, 28(21), 8603–8619. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0099.1

Jury, M. W., Prein, A. F., Truhetz, H., & Gobiet, A. (2015). Evaluation of CMIP5 models in the context of dynamical downscaling over Europe. *Journal of Climate*, 28(14), 5575–5582. <u>https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00430.1</u>

Kabas, T., A. Leuprecht, C. Bichler, and G. Kirchengast (2011), WegenerNet climate station network region Feldbach, Austria: network structure, processing system, and example results, Adv. Sci. Res., 6, 49-54, doi: 10.5194/asr-6-49-2011.

Katragkou, E., M. Garcia-Diez, R. Vautard, S. Sobolowski, P. Zanis, G. Alexandri, R. M. Cardoso, A. Colette, J. Fernandez, A. Gobiet, K. Goergen, T. Karacostas, S. Knist, S. Mayer, P. M. M. Soares, I. Pytharoulis, I. Tegoulias, A. Tsikerdekis, and D. Jacob (2015), Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble, Geoscientific Model Development, 8(3), 603-618, doi: 10.5194/gmd-8-603-2015

Kida, H., Koide, T., Sasaki, H. and Chiba, M. (1991) A New Approach for Coupling a Limited Area Model to a Gcm for Regional Climate Simulations, J. Meteorol. Soc. Jpn., 69(6), 723–728.

Knight, C. G., Knight, S. H. E., Massey, N., Aina, T., Christensen, C., Frame, D. J., ... Allen, M. R. (2007). Association of parameter, software, and hardware variation with large-scale behavior across 57,000 climate models. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(30), 12259–12264. https://doi.org/10.1073/pnas.0608144104

Knist, S., Goergen, K. and Simmer, C. (2018) Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convectionpermitting WRF climate simulations over Central Europe, Clim. Dyn., doi:10.1007/s00382-018-4147-x.

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., and Wulfmeyer, V.: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble, Geosci. Model Dev., 7, 1297-1333, doi:10.5194/gmd-7-1297-2014, 2014.

Lederink, G. and E. van Meijgaard (2009), Unexpected rise in extreme precipitation caused by a shift in rain type?, Nat. Geosci., 2 (6), 373, doi:10.1038/ngeo524.

Lee, C. C. (2012), Utilizing synoptic climatological methods to assess the impacts of climate change on future tornado-favorable environments, Nat. Hazards, 62, 325-343, doi: 10.1007/s11069-011-9998-y.

Lin, Y.-L., S. Chiao, T.-A. Wang, M. L. Kaplan and R. P. Weglarz (2001), Some common ingredients for heavy precipitation rainfall, Wea. Forecasting, 16, 633 – 660., doi: 10.1175/1520-0434(2001)016<0633:SCIFHO>2.0.CO;2.

Mahoney, K., M. A. Alexander, G. Thompson, J. J. Barsugli and J. D. Scott (2012), Changes in hail and flood risk in high-resolution simulations over Colorado's mountains. Nature CC, doi: 10.1038/NCLIMATE1344

Manning, M. R., J. Edmonds, S. Emori, A. Grubler, K. Hibbard, F. Joos, M. Kainuma, R. F. Keeling, T. Kram, A. C. Manning, M. Meinshausen, R. Moss, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. K. Rose, S. Smith, R. Swart, D. P. van Vuuren (2010), Misrepresentation of the IPCC CO2 emission scenarios, Nat. Geosci., 3(6), 376-377.

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. The Annals of Mathematical Statistics, 18(1), 50–60. https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491

Matulla, C., M. Hofstätter, I. Auer, R. Böhm, M. Maugeric, H. von Storch and O. Krueger (2012), Storminess in northern Italy and the Adriatic Sea reaching back to 1760, Phys. Chem. Earth Pt A/B/C, 40-41, 80 – 85, doi: 10.1016/j.pce.2011.04.010.

**Meehl, G.A.**, T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver Z.-C. Zhao, (2007), Global Climate Projections. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Chang. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. 996 pp.

**Meredith, E. P.**, Rust, H. W., & Ulbrich, U. (2018). A classification algorithm for selective dynamical downscaling of precipitation extremes. Hydrology and Earth System Sciences, 22(8), 4183–4200. https://doi.org/10.5194/hess-22-4183-2018

**Moss, R.** et al. (2008), Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. 132pp. Geneva: Intergovermental Panel on Climate Change.

Pall, P., M. R. Allen and D. A. Stone (2007), Testing the Clausius-Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO2 warming, Clim. Dyn., 28 (4), 351 – 363, doi: 10.1007/s00382-006-0180-2

Peterson, T.C., 2005: Climate Change Indices. WMO Bulletin, 54 (2), 83-86.

**Philipp, A.**, C. Beck, R. Huth and J. Jacobeit (2014), Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. Int. J. of Climatol., online first, DOI: 10.1002/joc.3920

**Pfeifer, S.**, Bülow, K., Gobiet, A., Hänsler, A., Mudelsee, M., Otto, J., ... Jacob, D. (2015). Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. Atmosphere, 6(5), 677–698. https://doi.org/10.3390/atmos6050677

Prein, A. F., A. Gobiet, H. Truhetz (2011), Analysis of uncertainty in large scale climate change projections over Europe, Meteorolog. Z., 20(4), 383-395, doi: 10.1127/0941-2948/2011/0286.

Prein, A. F., A. Gobiet, M. Suklitsch, H. Truhetz, N. K. Awan, K. Keuler and G. Georgievski (2013), Added Value of Convection Permitting Seasonal Simulations, Clim. Dyn., online first, doi: 10.1007/s00382-013-1744-6.

**Prein, A. F.**, Gobiet, A., Truhetz, H., Keuler, K., Goergen, K., Teichmann, C., ... Jacob, D. (2015b). Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: High resolution, high benefits? Climate Dynamics, 46, 383–412. https://doi.org/10.1007/s00382-015-2589-y

Prein, A. F., W. Langhans, G. Fosser, et al. (2015), A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges, Rev. Geophys., 53(2), 323-361, doi: 10.1002/2014RG000475.

Riahi, K., A. Gruebler, N. Nakicenovic (2007), Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization, *Techno. Forecast. Soc. Change, 74*(7), 887-935.

Roberts, N. M., and H. W. Lean (2008), Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events, *Mon.Weather Rev.*, 136(1), 78-97, doi: 10.1175/2007MWR2123.1.



Rogelj, J., M. Meinshausen, and R. Knutti (2012), Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates, Nature Climate Change, 2(4), 248-253, doi: 10.1038/NCLIMATE1385.

Rosa, D., & Collins, W. D. (2013). A case study of subdaily simulated and observed continental convective precipitation: CMIP5 and multiscale global climate models comparison: SUBDAILY PRECIPITATION: A CASE STUDY. Geophysical Research Letters, 40(22), 5999–6003. https://doi.org/10.1002/2013GL057987

Sanderson, B. M., Piani, C., Ingram, W. J., Stone, D. A., & Allen, M. R. (2008). Towards constraining climate sensitivity by linear analysis of feedback patterns in thousands of perturbed-physics GCM simulations. Climate Dynamics, 30(2–3), 175–190. https://doi.org/10.1007/s00382-007-0280-7

Scaife, A. A., T. Woolings, J. Knight, G. Martin, T. Hinton (2010), Atmospheric Blocking and Mean Biases in Climate Models, J. Clim., 23, 6143 – 6152, doi: 10.1175/2010JCLI3728.1.

Schemm, S., Sprenger, M., Martius, O., Wernli, H., & Zimmer, M. (2017). Increase in the number of extremely strong fronts over Europe? A study based on ERA-Interim reanalysis (1979-2014): Extremely Strong Fronts Over Europe. Geophysical Research Letters, 44(1), 553–561. https://doi.org/10.1002/2016GL071451

Schiemann, R. and C. Frei (2010), How to quantify the resolution of surface climate by circulation types: An example for Alpine precipitation, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 35.9, 403-410.

Seibert, P., A. Frank, H. Formayer (2007), Synoptic and regional patterns of heavy precipitation in Austria, Theor. Appl. Climatol. 87, 139–153, doi: 10.1007/s00704-006-0198-8.

**Semmler, T.** and D. Jacob (2004), Modeling extreme precipitation events — a climate change simulation for Europe, Glob. Planet. Change, 44(1-4), 119-127, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.008.

Sherwood, S. C., Bony, S., & Dufresne, J.-L. (2014). Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. Nature, 505(7481), 37–42. https://doi.org/10.1038/nature12829

Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections: CMIP5 PROJECTIONS OF EXTREMES INDICES. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(6), 2473–2493. https://doi.org/10.1002/jgrd.50188

**Simmons, A.**, S. Uppala, D. Dee, S. Kobayashi (2007), ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards, ECMWF Newsletter, 110, 25-35, available via <u>http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110\_rev.pdf</u>.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, W. Wang, and J. Powers (2007), A description of the advanced research WRF version 2, Tech. Rep., NCAR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

Soden, B. J. and I. M. Held (2006), An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models, J. Clim., 19 (23), 3354–3360, doi: 10.1175/JCLI3799.1.

Steinacker, R., C. Häberli, and W. Pöttschacher (2000), A transparent method for the analysis and quality evaluation of irregularly distributed and noisy observational data, Mon.Weather Rev., 128(7), 2303-2316, doi: 10.1175/1520-0493(2000)128<2303:ATMFTA>2.0.CO;2.

Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., ... Roeckner, E. (2013). Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6: ECHAM6. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 5(2), 146–172. https://doi.org/10.1002/jame.20015

Suklitsch, M., A. Gobiet, A. Leuprecht, and C. Frei (2008), High Resolution Sensitivity Studies with the Regional Climate Model CCLM in the Alpine Region, Meteorol.Z., 17(4), 467-476, doi: 10.1127/0941-2948/2008/0308.

**Torma, C.**, Giorgi, F., & Coppola, E. (2015). Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain - Precipitation over the Alps. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 120(9), 3957–3972. https://doi.org/10.1002/2014JD022781

**Trenberth, K. E.** (1999), Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change, Clim. Change, 42, 327 – 339, doi: 10.1023/A:1005488920935

Trenberth, K. E., A. Dai, R. M. Rasmussen and D. B. Parsons (2003), The changing character of precipitation, Bull. Am. Met. Soc., 84 (9), 1205–1217, doi: 10.1175/BAMS-84-9-1205.

**Tveito, O. E.** (2010), An assessment of circulation type classifications for precipitation distribution in Norway, Phys.Chem.Earth, 35(9-12), doi: 10.1016/j.pce.2010.03.044.

**Tveito, O. E.** and M. Pasqui (2007), Session AW8 – Weather Types Classifications, Proceedings from the 5<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Meteorological Society, available for download through <u>http://publications.europa.eu/</u>

Vidale, P. L., D. Lüthi, R. Wegmann, and C. Schär (2007), European summer climate variability in a heterogeneous multi-model ensemble, Clim.Change, 81, 209-232, doi: 10.1007/s10584-006-9218-z.

Vautard, R., Gobiet, A., Sobolowski, S., Kjellström, E., Stegehuis, A., Watkiss, P., ... Jacob, D. (2014). The European climate under a 2 °C global warming. Environmental Research Letters, 9(3), 034006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034006

Weisman, M. L., W. C. Skamarock, and J. B. Klemp (1997), The Resolution Dependence of Explicitely Modeled Convective Systems, Mon. Wea. Rev., 125, 527 – 548, doi: 10.1175/1520-0493(1997)125<0527:TRDOEM>2.0.CO;2

Wernli, H., M. Paulat, M. Hagen, and C. Frei (2008), SAL-A Novel Quality Measure for the Verification of Quantitative Precipitation Forecasts, *Mon.Weather Rev.*, *136*(11), 4470-4487, doi: 10.1175/2008MWR2415.1.

Wilhelm, B., F. Arnaud, D. Enters, F. Allignol, A. Legaz, O. Magand, S. Revillon, C. Giguet-Cove and, E. Malet (2012), Does global warming favour the occurrence of extreme floods in European Alps? First evidences from a NWAlps proglacial lake sediment record, Clim. Change, 113, 563 – 581, doi: 10.1007/s10584-011-0376-2

Woolings, T., A. Charlton-Perez, S. Ineson, A. G. Marshall and G. Masato (2010), Associations between stratospheric variability and tropospheric blocking, J. Geophys. Res., 115, doi: 10.1029/2009JD012742

Yarnal, B. (1993), Synoptic climatology in environmental analysis: a primer, p 195, Belhaven Press: London and