PUBLIZIERBARER ENDBERICHT

A) Projektdaten

Kurztitel:	CHC-FloodS
Langtitel:	Coupled hydrological – climate modelling of floods at small and medium scales in Styria
Zitiervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	ACRP, 6th Call
Dauer:	01.03.2014 bis 28.02.2017
KoordinatorIn / ProjekteinreicherIn:	Joanneum Research Forschungsgesellschaft m.b.H. / JR-AquaConSol G.m.b.H.
Kontaktperson Name:	Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Reszler
Kontaktperson Adresse:	Steyrergasse 21
Kontaktperson Telefon:	0664-80454518
Kontaktperson E-Mail:	Christian.reszler@jr-aquaconsol.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Karl-Franzens-Universität Graz(Steiermark)
Schlagwörter:	Kopplung Klima-Hydrologie-Modelle, Skalenüberbrückung, Starkregen, Hochwasser
Projektgesamtkosten:	189'020,- €
Fördersumme:	187'053,- €
Klimafonds-Nr:	KR13AC6K11102
Erstellt am:	31.05.2017

Projektübersicht

1 Kurzfassung

Lokale Hochwässer in der Steiermark sind die Folge von Starkregenfronten und Gewittern, und die mit diesen Hochwässern einher gehenden Überflutungen führen häufig zu signifikanten Schäden in Landwirtschaft und Infrastruktur. Fundierte Aussagen über Änderungen durch den Klimawandel lässt die Datenlage zurzeit allerdings noch nicht zu. Physikalischen Überlegungen folgend sollte es durch die Erderwärmung aber auch in unseren Breiten zu einer Verstärkung von lokaler Konvektion ("Super Clausius-Clapeyron Effekt") kommen, die für die starken Regenfälle und Gewitter mitverantwortlich sind.

Mit Klimamodellen werden Langzeitsimulationen durchgeführt, um über mehrere Jahrzehnte Veränderungen von meteorologischen Größen, wie Niederschlag und Lufttemperatur, abzuschätzen. Das Auftreten eines Hochwassers in einem bestimmten Gebiet hängt aber nicht nur vom Niederschlag beim jeweiligen Ereignis ab, sondern auch von der Vorgeschichte, welche die hydrologischen Bedingungen am Beginn des Ereignisses bestimmt. Unterschiedliche Bedingungen, z.B. trockene oder nasse Böden oder eine mögliche Überlagerung mit einer gleichzeitig stattfindenden Schneeschmelze, können zu gänzlich unterschiedlichen Hochwasserspitzen führen. Dies kann berücksichtigt werden, indem ein hydrologisches Modell nachgeschaltet, das heißt mit den Ergebnissen eines Klimamodells „angetrieben" wird.

Während gängige Klimamodelle die Prozesse des Wasserkreislaufs in großen Maßstäben (von „global" bis „regional") beschreiben, arbeiten hydrologische Modelle auf einem deutlich kleineren Maßstab (Einzugsgebietsskala). Der Einsatz von immer leistungsstärkeren Großrechnern führte zur Entwicklung einer neuen Generation von regionalen Klimamodellen (RCM), die auf konvektionserlaubender Skala (~3 km Gitterweite) arbeiten und prinzipiell in der Lage sind, auch kleinräumige Starkregen oder Gewitter zu erfassen. Auch wenn auf konvektionserlaubender Skala gearbeitet wird, treten Abweichungen („BIAS") von Beobachtungsdaten auf, die in der Regel mittels statistischer Methoden korrigiert werden.

Im Projekt CHC-FloodS werden verschiedene regionale Klimamodelle mit verschiedenen Gitterweiten verwendet, von Biases befreit und mit einem hydrologischen Modell auf Einzugsgebietsebene in der Südsteiermark gekoppelt. Der Projektablauf erfolgt dabei in mehreren Schritten:

In einem ersten Schritt werden die vorhandenen meteorologischen und hydrologischen Daten analysiert. Daraus werden die grundsätzlichen Mechanismen zur Hochwasserentstehung in der Region identifiziert, die in weiterer Folge als Indikatoren – quantitativer und qualitativer Natur - für die Bewertung der Simulationen dienen:

- Frequenz des Auftretens (Statistische Maße)
- Zeitpunkt im Jahr („Saisonalität")
- Typ und zeitlicher Ablauf der signifikanten Hochwasserereignisse, z.B. kurzes Ereignis, lang andauerndes Ereignis oder Doppelereignis, sowie der entsprechende Wetterlagentyp. Als maßgeblicher Wetterlagentyp wurde ein Typ mit starker Konvektion im Sommer sowie lokale Fronten im Sommer und im Herbst (Vb-Wetterlage, Mittelmeertiefs) identifiziert.
- weitere Einflussfaktoren wie die zeitliche Dynamik von Schneeschmelze oder Bodenfeuchte über das Jahr

Die zur Kalibrierung des hydrologischen Modells verwendeten interpolierten meteorologischen Variablen Niederschlag und Lufttemperatur dienen als Referenzdatensatz zur Evaluierung der

Klimamodellergebnisse, zur Bestimmung von Fehlermaßen sowie zur Entwicklung einer Bias-Korrekturmethode.

In einem zweiten Schritt werden in einem historischen Zeitraum (1989-2010) in Form einer „Multi-Model-Ensemble“ Studie die zwei RCMs COSMO-CLM und WRF mit Gitterweiten ~50 km, ~12.5 km und ~3 km gerechnet, eingebettet in die ERA-Interim Re-Analysen (Gitterweite ~70 km). Fehlermaße der RCMs werden ermittelt und eine neue, verbesserte Methode zur statistischen Fehlerkorrektur („Scaled Distribution Mapping“ –SDM) entwickelt. Die Methodik besitzt gegenüber dem klassischen „Quantile Mapping“ den Vorteil, dass das Klimaänderungssignal durch die Korrektur nicht verändert wird.

In einem nächsten Schritt werden die Niederschlags- und Temperaturfelder an das hydrologische Modell übergeben und die Abflusssimulationen durchgeführt und ausgewertet. Es wird ein hydrologisches Modell verwendet, das auf einem 1 km Raster und im Stundenschritt arbeitet und zur Hochwasservorhersage entwickelt wurde.

Die Ergebnisse anhand der unkorrigierten Daten aus den verschiedenen Klimamodell-Settings zeigen den Effekt der Gitterweite: Für kleine Einzugsgebiete (Fläche kleiner 200 km²) ist eine Auflösung von ~ 3 km unbedingt notwendig, um die Größenordnung der Hochwasserspitzen entsprechend nachzubilden. Sowohl Frequenz des Auftretens (Hochwasserstatistik) als auch Saisonalität wird in allen Gebieten mit dem hydrologischen Modell im historischen Zeitraum 1989-2010 gut widergegeben. In den größeren Gebieten bringt eine Auflösung von ~12.5 km und ~50 km zwar zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich Hochwasserstatistik, allerdings wird die Saisonalität der Jahreshochwässer nicht richtig erfasst. Dies deutet darauf hin, dass die generellen Mechanismen in den atmosphärischen Bedingungen zur Entstehung größerer Hochwässer in der Region Südsteiermark nicht abgebildet werden. Mit den bias-korrigierten Daten ergab sich in allen Gebieten eine Verbesserung, sowohl in der Hochwasserstatistik als auch in der Saisonalität der Jahreshochwässer, außer im kleinsten Gebiet mit einer Fläche von 75 km². Diese Verschlechterung liegt an der Verwendung eines Dreistundenschrittes, mit welchem aus mathematisch/statistischen Gründen in der Korrekturmethodik gearbeitet wird. Auf dieser Skala ist aufgrund der kurzen Reaktionszeiten eine zeitliche Auflösung von einer Stunde essentiell. Generell zeigt sich, dass das Modell COSMO-CLM deutlich zuverlässigere Ergebnisse liefert als das Modell WRF. Besonders bei Reduktion der Gitterweite auf ~12.5 km und weiter auf ~3 km treten beim Modell WRF unplausible Ergebnisse auf.

In einem letzten Schritt erfolgt zum Test der Anwendbarkeit des gekoppelten Modellsystems und der neuen Fehlerkorrekturmethode eine Langzeitberechnung (1989-2035) mit folgendem Klimamodell-Setting: Emissionsszenario RCP8.5, Globales Klimamodell MPI-ESM-LR, COSMO-CLM mit Gitterweite 12.5 km. Aufgrund der verschiedenen Möglichkeiten der Wahl des Emissionsszenarios und des Globalen Klimamodells, sind aber für generelle Aussagen zu Änderungen in den Hochwässern mehrere Simulationen (Ensemble) notwendig. In diesem Sinne wurde die in CHC-FloodS verwendete RCM Simulation an die Plattform EURO-CORDEX übergeben, wo diese einen weiteren Beitrag zu den bereits gesammelten Simulationen liefert.

Aus der Synthese der verschiedenen Ergebnisse wurden schließlich generelle Empfehlungen zur Kopplung Klimatologie und Hydrologie bezüglich Hochwässer in kleinen und mittleren Einzugsgebieten abgeleitet. Das gekoppelte Modell im vorliegenden Projekt steht am Beginn einer Entwicklung der Kombination der beiden Modellfamilien für kleinräumige Modellanwendungen, die auch von der ständigen Weiterentwicklung von Computerressourcen getragen wird. Dadurch wird ein Werkzeug geschaffen, mit dem klimabedingte Änderungen im Auftreten von Hochwässern in kleinen Einzugsgebieten abgeschätzt werden können.

2 Executive Summary

Local floods in Southern Styria are characterized by processes on small spatial and temporal scales, i.e. small scale frontal systems and convective storms, and can cause significant damage on infrastructure, buildings and agriculture. This situation is expected to become more endangered due to climate warming, when single precipitation events from deep convection are becoming more intense ("Super Clausius-Clapeyron effect"). Data availability at the moment does not allow for a quantification of climate change impacts on local floods.

Currently, regional climate models (RCMs) are employed to generate climate simulations to scales below 50 km horizontal resolution. Model evaluations and inter-comparisons in multiple projects have shown that there is evidence that an increase in regional climate model resolution will lead to a better representation of the spatial and temporal characteristics of heavy precipitation at small and medium scales. However, occurrence of a flood not only depends on the rainfall extent but also on the antecedent hydrological conditions. Rain falling on dry or wet soils can induce significantly different flood event magnitudes. To take this into account a hydrological model is necessary which is driven by the results of the climate model. Hydrological models work on catchment scale (10-1000 km²), and are able to represent local floods. Even if deep convection becomes resolved, there are still model biases that have to be removed before the RCMs are coupled with hydrological models.

The objective of CHC-FloodS is coupling of climate and hydrological models for an enhanced flood modelling in Southern Styria on small and medium spatial scales including improved statistical downscaling and error correction techniques for minimizing error propagation throughout the modelling chain. The project is conducted in several steps:

In a first step, meteorological and hydrological data in the study area are analysed. In particular, flood events are analysed regarding their dominant generation mechanisms, which are used as criteria for model evaluation, as follows:

- Frequency (statistical measures)
- Seasonality (occurrence in the year)
- Event types (including weather types, e.g. spatial extent, seasonality). As the significant event types for flood generation some convective types as well as small frontal systems connected with Mediterranean low pressure systems or the Vb type are identified.
- Other simulated hydrological variables such as soil moisture or snow melt

The interpolated meteorological variables used for calibration are provided as a reference data set for climate model error correction.

In the next step regional climate modelling is performed, which consists of a small multi-model ensemble of long-term (1989-2010) re-analysis driven RCM simulations ("hindcasts") with COSMO-CLM and WRF. The results are evaluated on various spatial scales (~50 km, ~12.5 km, and ~3 km) along their downscaling steps with respect to their ability to capture dominant flood generation mechanisms in the study region. Error characteristics of the RCMs from coarse to convection permitting scales are derived, and a new empirical-statistical correction method ("Scaled Distribution Mapping" – SDM) is developed. This new method has the advantage to preserve the climate change signal after correction, in contrary to the common quantile mapping approach.

The climate model output is processed and in the next step, used as an input for the hydrological model. A spatially distributed rainfall-runoff model is used in this project, which runs operationally for flood warning purposes in parts of Southern Styria. The results show, that for small catchments

(< 200 km²) a resolution of 3 km is essential to accurately simulate the magnitude of flood events. Flood frequency and seasonality is represented well in all catchments. In the larger catchments resolutions of ~12.5 km and ~50 km already yield statistically satisfying results. However, seasonality of floods is not represented well, which indicates that some general atmospheric mechanisms are not captured within the runs with coarse spatial resolution. Also, due to the short response times in the small sub-catchments a time step of 1 hour is required. However, in all setups a bias still exists in precipitation and temperature, which sometimes leads to unrealistic hydrological conditions. Generally, CCLM performs much better than WRF for all grid sizes. Particularly for smaller grid sizes ~12.5 km and ~3 km WRF yields unrealistic results. Bias correction by the SDM method improves results in magnitude and seasonality of annual maximum floods in all settings except for the small catchments (< 100 km²). This is due to the aggregated 3 hour time step used in the bias correction method due to mathematical/statistical reasons.

In the last step an applicability test of the coupled system including the new error correction method is performed by a long term simulation (1989-2035) using the RCP8.5 emission scenario, the MPI-ESM-LR global climate model and the COSMO-CLM with 12.5 km grid spacing. However, due to the different possibilities of assumptions and models used in the model chain, for drawing general conclusions about future development of floods an ensemble of different model settings is necessary. In this context, results of the long term RCM run in CHC-FloodS are uploaded to the EURO-CORDEX platform, which collects different RCM scenarios for a quantitative ensemble evaluation.

From the synthesis of the different results, general requirements of the hydrologic modeller on RCM simulations for flood representation to be used in climate change impact studies are given. Particular recommendations are made to further bridge the scale gap between climatology and hydrology in small and medium sized catchments. The coupled model stands at the beginning of the combination of the two model families, also powered by the steady improvement of computer resources. The coupled model enables estimation of climate change impacts on floods in small and medium sized catchments and is therefore a valuable tool in water resources planning and management.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Lokale Hochwässer sind die Folge von Starkregenfronten und Gewittern, und die mit diesen Hochwässern einher gehenden Überflutungen führen häufig zu signifikanten Schäden in Landwirtschaft und Infrastruktur. Fundierte Aussagen über Änderungen durch den Klimawandel in den letzten Jahrzehnten lässt die Datenlage zurzeit allerdings noch nicht zu. Hohe Niederschlagsintensitäten sind selten und sehr konzentriert und werden daher vom Stationsnetz meist nicht erfasst. Außerdem ist zur Abschätzung längerfristiger Tendenzen der Zeitraum, in denen in Österreich automatisiert und flächendeckend Aufzeichnungen von hoher zeitlicher Auflösung verfügbar sind, noch zu kurz. Physikalischen Überlegungen folgend sollte es durch die Erderwärmung aber auch in unseren Breiten zu einer Verstärkung von lokaler Konvektion kommen, die für die starken Regenfälle und Gewitter mitverantwortlich sind.

In großangelegten international koordinierten Aktivitäten, wie beispielsweise EURO-CORDEX (Jacob et al., 2013), einer Initiative des World Climate Research Programme, werden mit Klimamodellen Klimaprojektionen erstellt, um über mehrere Jahrzehnte Veränderungen von meteorologischen Größen, wie Niederschlag und Lufttemperatur, abzuschätzen. Das Auftreten eines Hochwassers in einem bestimmten Gebiet hängt aber nicht nur vom Niederschlag beim jeweiligen Ereignis ab, sondern auch von der Vorgeschichte, welche die hydrologischen Bedingungen am Beginn des Ereignisses bestimmt. Unterschiedliche Bedingungen, z.B. trockene oder nasse Böden oder eine mögliche Überlagerung mit einer gleichzeitig stattfindenden Schneeschmelze, können zu gänzlich unterschiedlichen Hochwasserspitzen führen. Dies kann berücksichtigt werden, indem ein hydrologisches Modell nachgeschaltet, das heißt mit den Ergebnissen aus dem Klimamodell „angetrieben“ wird.

Während gängige Klimamodelle die Prozesse des Wasserkreislaufs in großen Maßstäben (von „global“ bis „regional“) beschreiben (in EURO-CORDEX wird eine Gitterweite von 12.5 km erreicht), arbeiten hydrologische Modelle auf einem deutlich kleineren Maßstab: sie simulieren Durchflüsse und Wasserstände auf Fluss- und Nebenflussgebietsbasis mit einer Größe von wenigen Quadratkilometern und können daher auch lokale Hochwässer abbilden. Der Einsatz von immer leistungsstärkeren Großrechnern führte zur Entwicklung einer neuen Generation von regionalen Klimamodellen (RCM), die auf konvektionserlaubender Skala (~3 km Gitterweite) arbeiten und prinzipiell in der Lage sind, auch kleinräumige Starkregen oder Gewitter zu erfassen. Diese konvektions-erlaubenden Modelle stellen eine fundamentale Neuerung in der Klimamodellierung dar, über deren Stärken und Schwächen bislang wenig bekannt ist. Erst kürzlich wurde vom WCRP im Rahmen des Coordinated Downscaling Experiments (CORDEX) eine Flagship Pilot Study (FPS) zum Thema Konvektion (CORDEX-FPS on Convection) unter Beteiligung des Wegener Centers ins Leben gerufen.

Für Vorausrechnungen in die Zukunft werden diese regionalen Modelle in ein globales Klimamodell (GCM) eingebettet („Dynamisches Downscaling“). Bevor sie für Klimaprojektionen eingesetzt werden, müssen die Modelle in einem historischen Zeitraum getestet und anhand Vergleiche mit Beobachtungsdaten deren Eignung evaluiert werden. Dabei werden die regionalen Modelle an deren seitlichen Rändern anstatt an globalen Modellen an Daten aus Assimilationssystemen der Numerischen Wettervorhersage – sogenannte Re-Analysedaten (beispielsweise ERA-Interim) – angekoppelt, wo meteorologische Modelle mit Beobachtungsdaten (z.B. Satellitendaten, Wetterballonaufstiege, etc.) verschmolzen werden. Die Ergebnisse der regionalen Modelle können dann direkt an historischen Daten von Wetterstationen getestet werden. Dabei zeigt sich oft, dass die Modelle im Mittel deutliche Abweichungen („BIAS“) von den Stationsdaten aufweisen. Vor allem

der Niederschlag aus den Klimamodellen weist hohe Unsicherheiten auf. In der Regel werden mittels statistischer Methoden diese Abweichungen korrigiert („Statistische Bias-Korrektur“).

Im Projekt CHC-FloodS werden verschiedene regionale Klimamodelle mit verschiedenen Gitterweiten verwendet, bias-korrigiert und mit einem hydrologischen Modell auf Einzugsgebietsebene in der Südsteiermark gekoppelt. Der Projektablauf erfolgt dabei in mehreren Schritten: In einem ersten Schritt werden die grundsätzlichen Mechanismen zur Hochwasserentstehung (z.B. Frequenz des Auftretens, Saisonalität, Ereignistyp) in der Region analysiert, die in weiterer Folge als Indikatoren für die Bewertung der Simulationen dienen. In einem zweiten Schritt werden in einem historischen Zeitraum (1989-2010) in Form einer „Multi-Model-Ensemble“ Studie die zwei RCMs COSMO-CLM und WRF mit Gitterweiten ~50 km, ~12.5 km und ~3 km gerechnet, eingebettet in die ERA-Interim Re-Analysen (Gitterweite ~70 km). Fehlermaße der RCMs werden ermittelt und eine neue, verbesserte Methode zur statistischen Fehlerkorrektur entwickelt. Die dabei gesammelten Erfahrungen stützen unmittelbar die CORDEX-FPS Initiative und CHC-FloodS tritt auf diese Weise in direkten Kontakt mit aktuellen internationalen Klimamodellierungsgruppen.

In einem nächsten Schritt werden Niederschlags- und Temperaturfelder an das hydrologische Modell übergeben und die Abflusssimulationen durchgeführt und bewertet. Es wird ein hydrologisches Modell verwendet, das auf einem 1 km Raster arbeitet und zur Hochwasservorhersage entwickelt wurde. Das Modell ist zur Hochwasserwarnung in kleinen Einzugsgebieten in der Weststeiermark (Flüsse Kainach, Lassnitz und Sulm) im operationellen Einsatz. Testgebiet ist die gesamte Südsteiermark (Ausschnitt 100 km x 70 km), weshalb das Modell im Zuge des Projekts auf die Einzugsgebiete in der Südoststeiermark („Grabenlandbäche“) erweitert wird. Die simulierten Hochwässer werden auf Basis der oben angeführten Indikatoren bewertet. In einem letzten Schritt erfolgt zum Test der Anwendbarkeit des gekoppelten Modellsystems und der neuen Fehlerkorrekturmethode eine Langzeitberechnung auf Basis einer Klimaprojektion mit COSMO-CLM (Szenario RCP8.5, Gitterweite 12.5 km, zeitliche Auflösung 1 Stunde) im Zeitraum von 1989 bis 2035. Die dem zugrunde liegende Klimaprojektion ist Teil von EURO-CORDEX und wird der breiten Öffentlichkeit durch das Datenportal der Earth System Grid Federation (ESGF; https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/) zur Verfügung gestellt.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Das Projekt CHC-FloodS wurde in fünf Arbeitspaketen bearbeitet, deren Arbeiten allerdings auch ineinander greifen:

1. Projektorganisation und –management
2. Hydrometeorologische Datenanalyse
3. Regionale Klimamodellierung
4. Hydrologische Modellierung
5. Synthese, Interpretation und Publikation

4.1 Projektorganisation und -management

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Projektorganisation bzw. das Projektmanagement über den gesamten Ablauf des Projekts.

Aufgrund der räumlichen Nähe der beiden Partner Joanneum Research - bzw. der in Folge verantwortlichen 100% Tochter JR-AquaConSol - und dem Wegener Center der Karl-Franzens-Universität Graz wurden häufige, auch kurzfristig einberufene Meetings und Workshops durchgeführt, in denen die Zwischenergebnisse präsentiert und diskutiert wurden. Darüber hinaus bestand auch bei Tagungen (z.B. Klimatag 2016 in Graz, EGU Konferenzen in Wien, ÖWAV Veranstaltungen, der Hauptversammlung von EURO-CORDEX 2016) die Möglichkeit des Austausches unter den Projektmitarbeitern aber auch mit externen Fachleuten.

4.2 Hydrometeorologische Datenanalyse

Niederschlags- und Lufttemperaturdaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und des Hydrographischen Dienstes Steiermark wurden auf Plausibilität geprüft und zum Input in das hydrologische Modell auf das Modellraster von 1 km interpoliert. Dieser Datensatz dient auch als Referenzdatensatz für die Auswertung der Klimamodellergebnisse.

Im Zuge der Analyse der Abflussdaten zeigt Abbildung 1 die Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung (Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve) an die höchsten jährlichen Hochwässer von Beginn der Aufzeichnung bis 2011 an den ausgewählten Pegeln in der Region. Zum Vergleich zwischen den Pegeln wurde der Hochwasserscheitelwert auf die jeweilige Einzugsgebietsfläche bezogen (spezifischer Abfluss). Die Darstellung zeigt deutlich die Unterschiede in der Neigung der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve, die durch unterschiedliche Abflussverzögerungen im Einzugsgebiet (Geometrie des Gewässernetzes, Reaktionszeiten) und im Flussschlauch (Dämpfung durch Ausuferung) bewirkt werden. In den größeren Gebieten (Tillmitsch, Leibnitz) sind diese Dämpfungseffekte deutlich höher ausgeprägt, was sich in einer flacheren Kurve zeigt. In der Oststeiermark (Pegel Fluttendorf) zeigen sich generell geringere spezifische Abflussspitzen aufgrund der im Vergleich etwas trockeneren Verhältnisse (geringere Jahresniederschläge und höhere Verdunstung).

Abbildung 2 zeigt radiale Plots zur Darstellung des Auftretens der Jahreshöchsthochwässer (JHHW) (schwarz) und rot hervorgehoben jene Abflussscheitel, die ein 5-jährliches Hochwasser überschreiten. Die Position im Kreis stellt den Tag im Jahr dar und der Abstand vom Mittelpunkt die Größe des Hochwassers (größtes Hochwasser am Außenkreis). Es zeigt sich, dass an den Pegeln Schwanberg und Voitsberg keine JHHW im Winter auftreten, da ihre Einzugsgebiete eine

signifikanten Anteil an hoch gelegenen Teile besitzen und der Niederschlag im Winter als Schnee gebunden ist. Meist treten die größten Hochwässer im Sommer als Folge von Starkregen auf, aber auch im Herbst (z.B. Pegel Tillmitsch). Im Herbst sind Mittelmeertiefs sehr häufig, die in Kombination mit der geringer werdenden Verdunstung und daher feuchteren Böden zu Hochwässern in Südösterreich führen. Der Pegel Leibnitz deckt das gesamte Gebiet der Sulm im Südwesten des Untersuchungsgebietes ab. Hier treten über das ganze Jahr verteilt Hochwässer auf, was darauf hindeutet, dass sich die atmosphärischen und hydrologischen Prozesse bei den einzelnen Ereignissen über das große Gebiet ausmitteln. Der Pegel Fluttendorf in der Oststeiermark zeigt ebenso Hochwässer über das Jahr verteilt aufgrund des Wegfalls des Einflusses der Schneelage (geringe Seehöhe des Einzugsgebietes), aber die großen Hochwässer treten im Sommer auf.

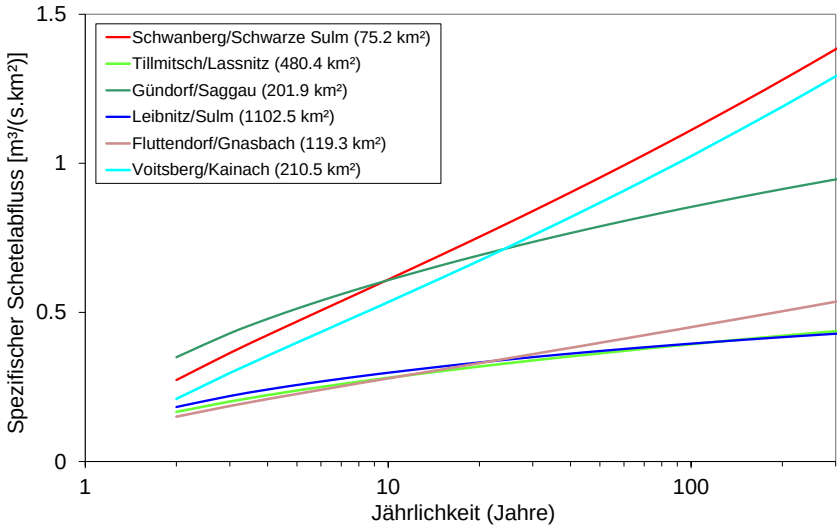


Abbildung 1 Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven: Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) an die höchsten jährlichen Hochwässer an Pegeln in der Region.

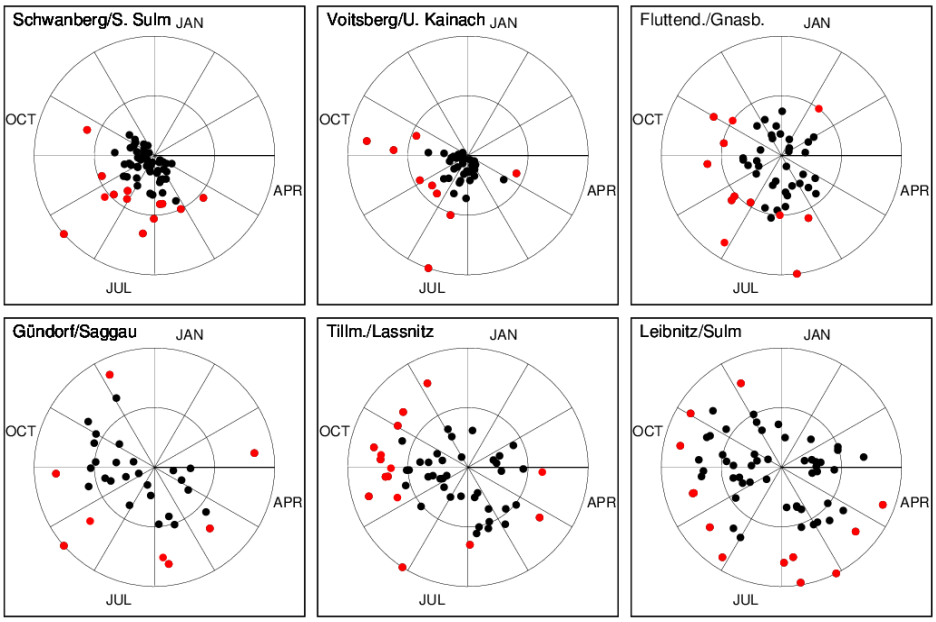


Abbildung 2 Saisonalität an den zur Auswertung ausgewählten Pegeln der jährlichen Höchsthochwässer (schwarz) und Hochwässer größer HQ5 (rot).

Als Beispiel eines Hochwassers in der Region wird das größte Hochwasser in der Weststeiermark im August 2005 herausgegriffen. Niederschlag und Abflussganglinie am Pegel Schwanberg/Schwarze Sulm sind in der folgenden Abbildung 3 dargestellt. Die Jährlichkeit liegt in der Größenordnung von 100 Jahren. Der Niederschlag fiel in kurzen, aufeinanderfolgenden Blöcken. Eingebettet sind immer wieder Blöcke mit hohen Intensitäten. Nach einer Regendauer von 20 Stunden und einer Menge von mit ungefähr 50 mm steigt der Abfluss steil an und erreicht innerhalb von 6 Stunden den außergewöhnlich hohen Scheitel. Dies deutet darauf hin, dass zu dieser Zeit die Böden gesättigt sind, sodass der darauf folgende Regen zur Gänze zum Abfluss kommt. Auffällig ist auch der signifikante zweite Anstieg bei relativ geringer Regenmenge, der ebenfalls auf die Bodensättigung zurückzuführen ist. Generell treten in der Region sehr häufig Doppelereignisse auf. Als Indikator der Bodensättigung wird in weiterer Folge die Bodenfeuchte herangezogen, die anhand des (kalibrierten) hydrologischen Modells simuliert wird.

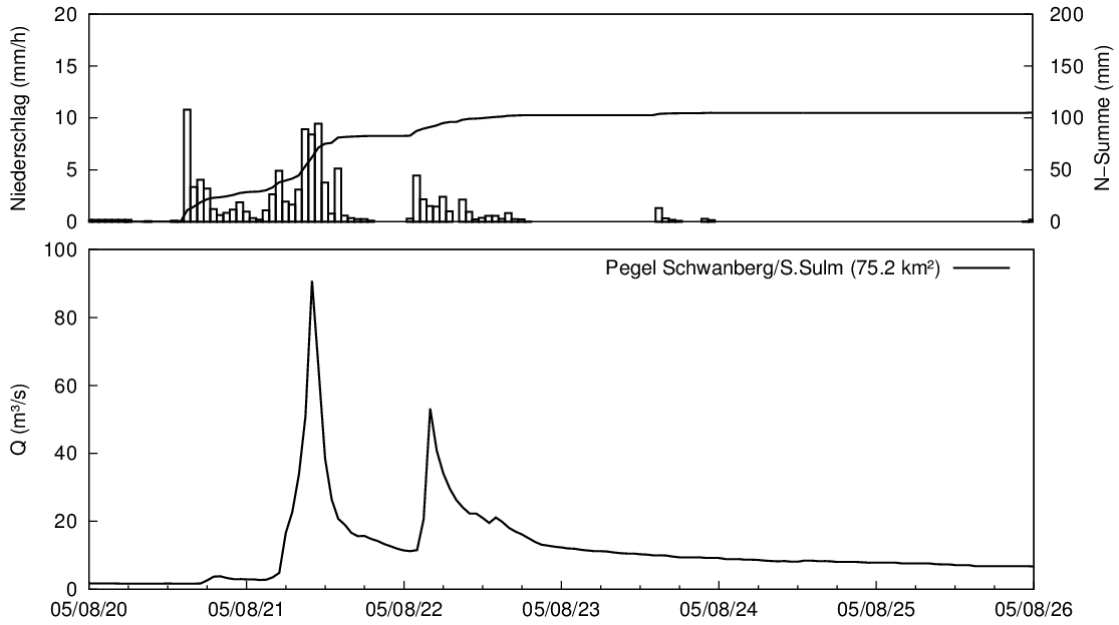


Abbildung 3 Größtes beobachtetes Hochwasser am Pegel Schwanberg/Schwarze Sulm mit einer Jährlichkeit von rd. 100 Jahren.

Zwei Beispiele aus der Wetterlagenklassifizierung zeigt Abbildung 4. Auf Basis dieser Auswertungen werden relative Häufigkeiten der aufgetretenen Wetterlagen, die zu Hochwasser führten, mit den simulierten verglichen. Aber auch für einzelne große Hochwasserereignisse wurden die Wetterlagen auf diese Weise bewertet. Bezüglich der meteorologischen Bedingungen kann beispielsweise das Hochwasser im August 2005 (vgl. Abbildung 3) auf ein Italientief mit lokal eingelagerten Gewittern zurückgeführt werden, das sich langsam ostwärts verschob (Abbildung 4, rechts). Üblicherweise tritt dieser Typ häufig in den Monaten März bis Juni auf, und nicht so häufig im August. Dieser Typ bewirkt Anomalien im Niederschlag von bis zu 70 % in den Ostalpen, während in den Westalpen kaum Niederschläge fallen. Hingegen ermöglicht bei konvektions-dominanten Wetterlagen (z.B. Abbildung 4, links) eine schwache Luftbewegung in der oberen Luftschicht die Entstehung von hohen Niederschlagsintensitäten an der Oberfläche.

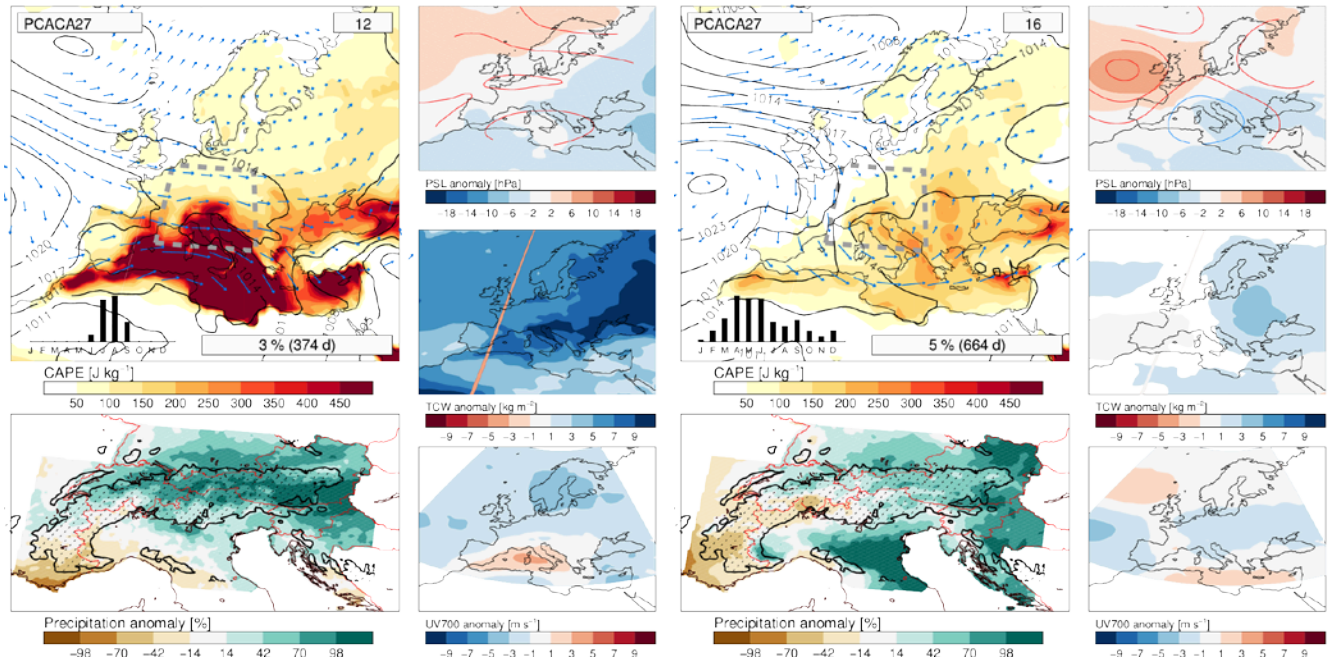


Abbildung 4 Charakteristik von Wetterlagentyp 12 (links) und 16 (rechts). Oben links: mittlerer Luftdruck auf Meeresniveau, farbige Abstufungen für CAPE und Windgeschwindigkeit auf 700 hPa. Das Histogramm zeigt die relative mittlere monatliche Häufigkeit des Auftretens im Zeitraum 1979-2011. Unten links: Mittlere Niederschlagsanomalie. Die rechten Darstellungen zeigen die Anomalien der Luftdruck auf Meeresniveau und 500 hPa Geopotential (oben), die gesamte Wassersäule (Mitte) und die Anomalie der Windgeschwindigkeit auf 700 hPa (unten)

Ein zentrales Ergebnis der Datenanalyse ist die Festlegung der Indikatoren – quantitativer und qualitativer Natur, an denen die Abflusssimulationen auf die realistische Nachbildung von Hochwässern in der Vergangenheit getestet werden:

- Frequenz des Auftretens (Statistische Maße)
- Zeitpunkt im Jahr („Saisonalität“)
- Typ und zeitlicher Ablauf der signifikanten Hochwasserereignisse, z.B. kurzes Ereignis, lang andauerndes Ereignis oder Doppelereignis, sowie der entsprechende Wetterlagentyp
- weitere Einflussfaktoren wie die zeitliche Dynamik von Schneeschmelze oder Bodenfeuchte über das Jahr

4.3 Regionale Klimamodellierung

In CHC-FloodS werden das Europäische Regionale Klimamodell CCLM (Böhm et al., 2006) und das US Amerikanische Modell WRF (Skamarock et al., 2007) eingesetzt, um den gesamten Wetterablauf (inklusive Temperatur und Niederschlag) der Periode 1989 bis 2010 zu rekonstruieren. Um in weitere Folge Anforderungen an die Regionale Klimamodellierung formulieren zu können, werden die Modelle in unterschiedlichen räumlichen (Gitterweiten mit 50 km, 12.5 km und 3 km) (Abbildung 5) und zeitlichen (3-stündig sowie 1-stündig) Auflösungen betrieben (weitere Details sind in Kapitel 6.3 näher beschrieben). Um eine möglichste gute Vergleichbarkeit mit Beobachtungsdaten zu erhalten, werden CCLM und WRF an deren äußersten Rändern zunächst mit dem globalen Re-Analysedatensatz ERA-Interim (Simmons et al., 2007) angetrieben. ERA-Interim ist ein spezielles Nebenprodukt der Numerischen Wettervorhersage, und approximiert die Zustände der Atmosphäre in der Vergangenheit mit minimalen Abweichungen zu Beobachtungsdaten. Erst in einem späteren Schritt wird bei CCLM mit 12.5 km Auflösung ERA-

Interim durch die globale Klimaprojektion MPI-ESM-LR mit dem „business-as-usual“-Treibhausgaskonzentrationsszenario RCP8.5 ersetzt.

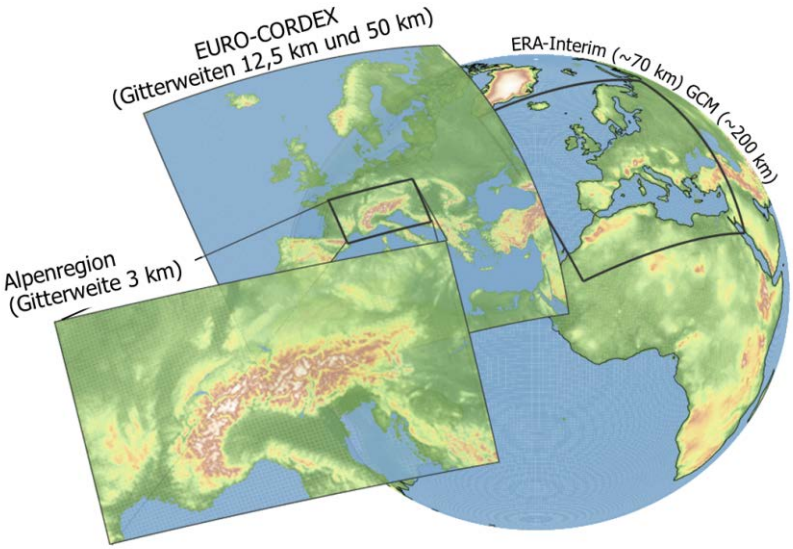


Abbildung 5 Kette der Regionalen Klimamodelle in CHC-FloodS. Ein globales Antriebsdatensatz (Re-Analyse ERA-Interim mit Gitterweite von ~70 km bzw. ein Globalen Klimamodell mit Gitterweite ~200 km wird sukzessive auf das Zielgitter mit einer Gitterweite von 3 km im Alpenraum gebracht. Dabei umfasst eine Stufe Europa mit einer Gitterweite von 12.5 km. Diese Stufe in EURO-CORDEX eingebettet.

Durch einen Vergleich mit dem auf Stationsdaten basierten Referenzdatensatz werden auf diese Weise die Modelle CCLM und WRF hinsichtlich ihrer Eignung zur Simulation von Extremniederschlagsereignissen, die in weitere Folge zu Hochwässer in der Ost- und Weststeiermark führen können, untersucht.

Es hat sich herausgestellt, dass die Modelle durchaus in der Lage sind, Extremereignisse und deren Abhängigkeit von bestimmten Wetterlagen zu erfassen. Deren Häufigkeit des Auftretens und deren Intensitäten schwanken jedoch von Modell zu Modell und mit seiner Auflösung. Beispielsweise erreicht der höchste Tagesniederschlag des Flächenmittels der Weststeiermark im Referenzdatensatz 75 mm/d und wird durch eine „Südstau“ Lage verursacht, während das Modell CCLM mit 3 km und 12.5 km Auflösung einen höchsten flächengemittelten Tagesniederschlag von 53 mm/d bzw. bei 50 km Auflösung von 80 mm/d generiert, welche jedoch von konvektionsdominanten Wetterlagen (Skandinavisches Hoch - Wetterlage 5; Skandinavisches Tief - Wetterlage 26) ausgelöst wird (siehe Abbildung 6). Dies verdeutlicht dem Umstand, dass RCMs im Inneren ihres Modellgebiets durch interne Variabilität nicht nur Abweichungen in den Niederschlagsintensitäten generieren, sondern dass es eben auch zu Abweichungen in den synoptischen Situationen kommt. Im Hinblick einer potentiellen Anwendung in einer Klimawandeluntersuchung hat dies jedoch keine Bedeutung, da in diesem Fall das RCM an ein GCM angekoppelt wird und das GCM im Allgemeinen ohnehin keine zeitliche Korrelation mit Beobachtungsdaten aufweist. Die Evaluierung eines RCMs, wo gezielt historische Ereignisse nachgerechnet werden, stellt die interne Variabilität vor neue Herausforderungen, da die direkte Vergleichbarkeit mit Beobachtungsdaten teilweise verloren geht.

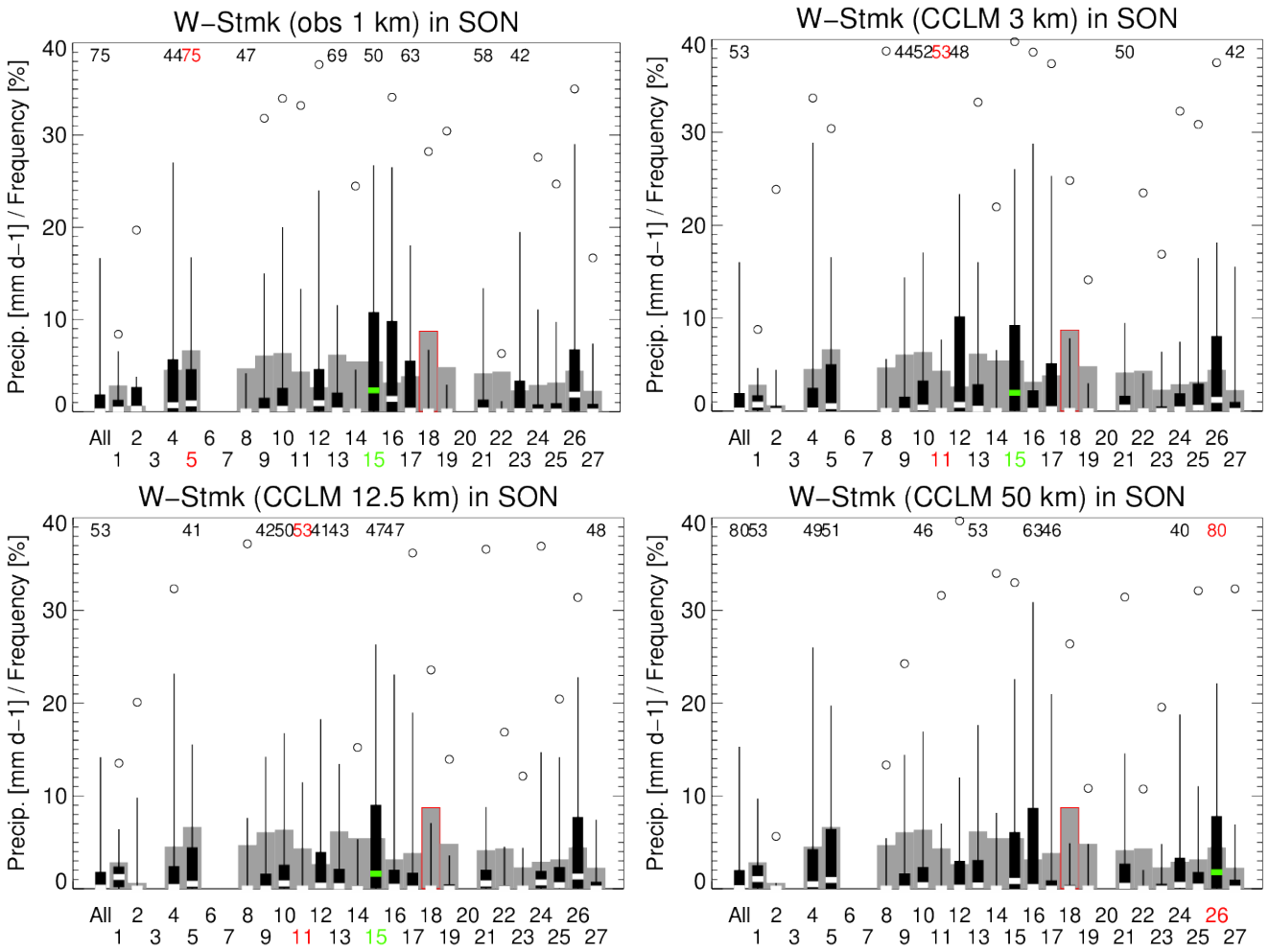


Abbildung 6 Häufigkeiten (graue Schattierung) von Wetterlagen (x-Achse) und statistische Maße (Maxima: Kreise und Zahlen oben; 95%-Perzentil: whisker; 75%-Perzentil: Box; Median: weiße Linie) von flächengemittelten Tagesniederschlägen in der Weststeiermark im Herbst (September, Oktober, November) der Periode 1989 bis 2010. Wetterlagen mit dem höchsten Maximum (rot) und dem höchsten Median (grün) sind gekennzeichnet. Panel links oben: Referenzdatensatz; Panel rechts oben: CCLM mit 3 km Auflösung; Panel links unten: CCLM mit 12.5 km Auflösung; Panel rechts unten: CCLM mit 50 km Auflösung.

Um Abweichungen („Bias“) im klimatologischen Sinne zu reduzieren, wurde die neuartige, statistische Bias-Korrekturmethode „Scaled Distribution Mapping“ (SDM) (Switanek et al., 2016) entwickelt. Diese Methode, welche Biases auch auf Sub-Tagesbasis korrigiert, hat mitunter den Vorteil, Klimaänderungen, wie sie durch ein RCM vorgegeben werden, möglichst unbeeinflusst zu lassen. Eine genaue Beschreibung von SDM sowie ein Vergleich mit anderen Bias-Korrekturmethoden wurden im folgenden Artikel veröffentlicht:

Switanek, M.B., P.A. Troch, C.L. Castro, A. Leuprecht, H-I. Chang, R. Mukherjee, und E.M.C. Demaria (2016), Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. Hydrol Earth Sys Sci Discuss; doi:10.5194/hess-2016-435.

Durch den Einsatz der Bias-Korrektur werden die statistischen Eigenschaften der Modelldaten systematisch näher an die Beobachtungen gebracht (z.B. Abbildung 7). Da SDM jedoch auf Wetterlagen bzw. einzelne Niederschlagsereignisse keine Rücksicht nimmt, fallen auf RCM-basierte

simulierte Flutereignisse zeitlich nicht notwendigerweise mit beobachteten zusammen. Die Evaluation von Flutereignissen erfolgt daher auf klimatologische bzw. statistische Weise.

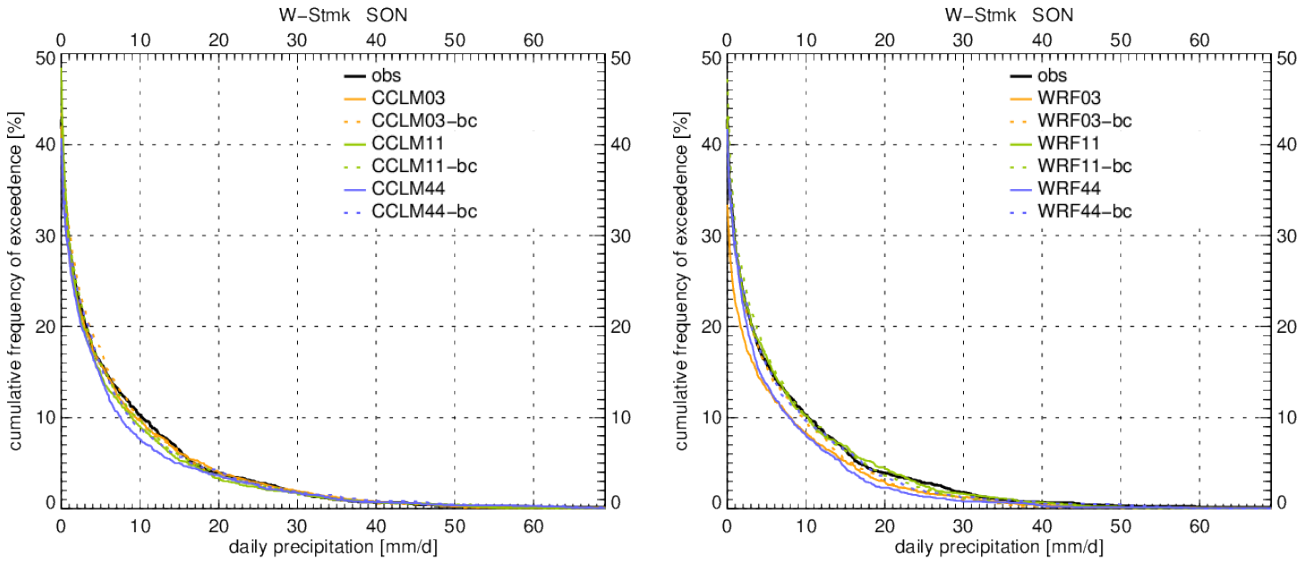


Abbildung 7 Auswirkung der Bias-Korrektur (SDM; punktiert) auf die modellierte (durchgezogene) Kurve der kumulativen Häufigkeit der Überschreitung bei Tagesniederschlägen im Herbst einer Gitterzelle in der Weststeiermark bei unterschiedlichen Modellauflösung (03: 3km; 11: 12.5 km; 44: 50 km).

4.4 Hydrologische Modellierung

Neben der Erstellung und Kalibrierung des Modells für die erweiterten Einzugsgebiete in der Südoststeiermark liegt der Schwerpunkt der Modellierung auf die Abflusssimulationen unter Verwendung der verschiedenen Klimamodellergebnisse, unkorrigiert und nach Anwendung der neu entwickelten Fehlerkorrekturmethode. Als Teil der Kalibrierung zeigt Abbildung 8 die empirischen Jährlichkeiten der Jahreshöchsthochwässer („plotting positions“ nach Gl. 1) an den zur Auswertung gewählten Abflusspegeln von 1989 bis 2010, simuliert anhand beobachteter meteorologischer Inputdaten und verglichen mit der Beobachtung. Dieser Vergleich ist ein notwendiger Test, dass das hydrologische Modell in der Lage ist, mit den vorhandenen Inputdaten das Hochwasserkollektiv statistisch widerzugeben. Vor allem für den Zeitraum vor 2000 ist dies von Bedeutung, da diese Daten nicht zur Kalibrierung des Modells herangezogen wurden. Im Sinne der hydrologischen Modellierung handelt es sich dabei um einen reinen Validierungsschritt des Modells. Die Abbildung zeigt, dass trotz der schlechteren Datenlage in der Vergangenheit die Ergebnisse bei allen Pegeln zufriedenstellend sind und das Modell daher für die Vergleiche mit unterschiedlichen Inputdaten geeignet ist.

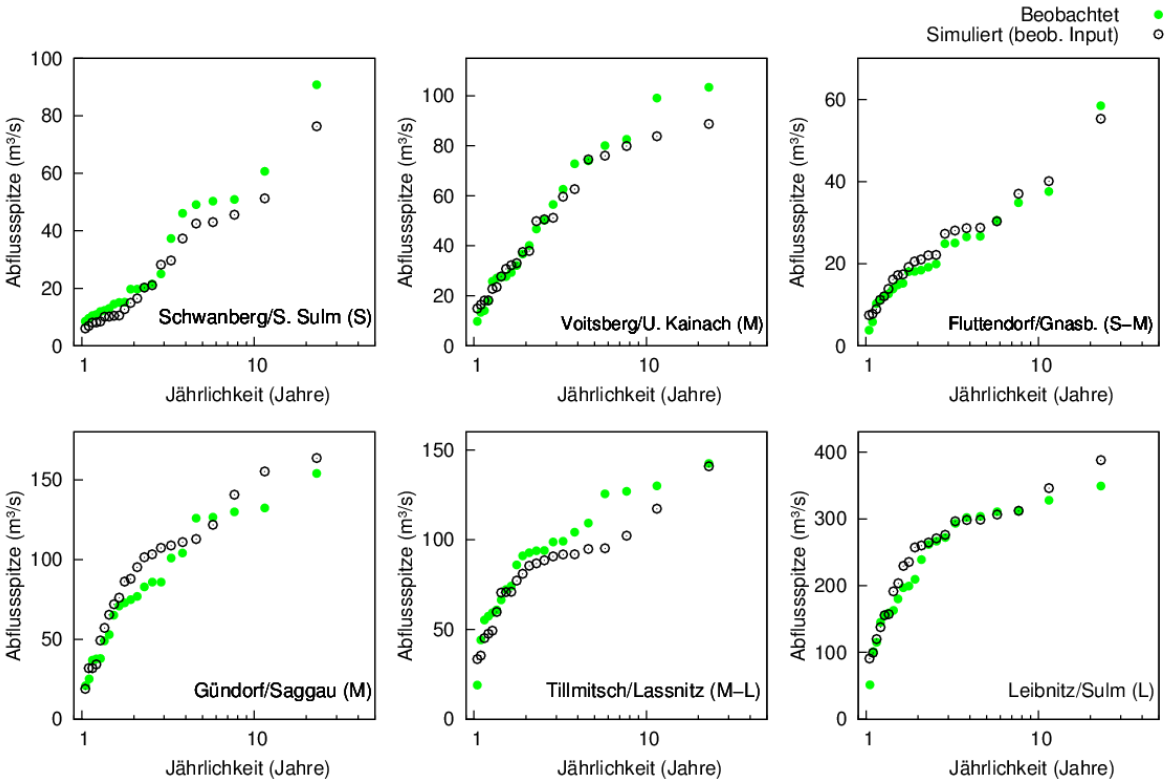


Abbildung 8 Beobachtete und simulierte Jahreshöchsthochwässer von 1989 bis 2010 (22 Jahre) dargestellt mit empirischen Jährlichkeiten („Plotting positions", Gl. 1). Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

Die nächsten Abbildungen zeigen in gleicher Weise die Ergebnisse der Abflusssimulationen mit den Klimamodellergebnissen als Input in das hydrologische Modell. In Abbildung 9 sind die Varianten mit den unkorrigierten CCLM Daten dargestellt. Es zeigt sich deutlich eine Verbesserung der Ergebnisse bei Verwendung der 0.03° (~3 km) Daten in stündlicher Auflösung, vor allem für das kleinste Gebiet des Pegels Schwanberg/Schwarze Sulm. Dies deutet darauf hin, dass auf dieser räumlichen Skale die konvektionserlaubende Klimasimulation Voraussetzung ist zur adäquaten Abbildung der Hochwassersituation. Bei den größeren Gebieten zeigen auch die gröber aufgelösten Varianten recht gute Ergebnisse. Die meisten RCM Settings zeigen einen negativen Bias hinsichtlich Hochwasserspitze. Allerdings werden in einigen Gebieten die Werte überschätzt, z.B. im Gebiet des Pegels Voitsberg im Nordwesten des Gebietes. Am Pegel Fluttendorf wird unter Verwendung der 0.44° Daten ein Hochwasser simuliert, das deutlich die größten beobachteten Hochwässer in der Reihe übersteigt. Diese Spitze ist die Folge von unrealistisch hohen Niederschlagsintensitäten (rd. 300 mm in 18 Stunden), die im Klimamodell im August 2005 simuliert wurden. Dieses August-Ereignis wurde durch ein nach Osten abziehendes Tiefdruckgebiet mit eingelagerten Gewittern ausgelöst. Bei RCMs mit groben Auflösungen werden konvektive Prozesse (Gewitter) durch statistische Methoden abgebildet. Im Einzelfall können diese statistischen Methoden jedoch zu relativ starken Abweichungen von Beobachtungen führen (z.B. Maraun et al., 2010; Prein et al., 2015).

Nach der Bias-Korrektur zeigen sich alle Ergebnisse verbessert, mit Ausnahme für das kleinste Gebiet des Pegels Schwanberg. Vor allem die 3 km Simulation führt zu einer deutlichen Verschlechterung gegenüber der Simulation vor der Korrektur. Dies ist die Folge des Dreistundenschritts, der in der Methodik der Bias-Korrektur verwendet wird. In dem kleinen Gebiet

liegen die typischen Reaktionszeiten in der Größenordnung von einer Stunde; durch die Verwendung von Dreistundensummen geht die Information möglicher hoher Stundenintensitäten verloren. Der Dreistundenschritt in der statistischen Bias-Korrektur wird aus rechentechnischen Gründen gewählt: die Variabilität der Stundendaten führt zu Problemen bei der Anpassung statistischer Verteilungsfunktionen an die Daten.

Das saisonale Auftreten der simulierten JHHW (Winter: DJF, Frühjahr: MAM, Sommer: JJA und Herbst SON) wird anhand der nächsten Abbildungen, ebenfalls für die Simulationen basierend auf die CCLM Ergebnisse, analysiert. Die Verbesserung der Ergebnisse bei Reduktion der Gitterweite wird bei allen Gebieten deutlich (Abbildung 11). Es zeigt sich darüber hinaus, dass für beinahe alle Gebiete sowohl im Falle der 0.44° (~50 km) als auch der 0.11° (~12.5 km) Daten eine Verschiebung der Anzahl der JHHW vom Sommer (JJA), wie die beobachteten JHHW zeigen, in das Frühjahr auftritt. Außerdem wird in der Weststeiermark (Kainach, Sulm, Saggau, Lassnitz) bei allen CCLM Varianten die Anzahl der Hochwässer im Herbst (SON) unterschätzt. Im Herbst treten häufig Mittelmeertiefs auf, die vermehrt in dieser Region zu großen Hochwässern führen. Die Simulationen weisen darauf hin, dass diese Situation in allen CCLM Daten unterrepräsentiert sind. Dies zeigt auch die Wichtigkeit der Analyse der Saisonalität zusätzlich zur rein statistischen Analyse der Hochwässer: Während bei den größeren Gebieten die Simulationen mit den gröberen CCLM Daten recht gute Ergebnisse bezüglich der Hochwasserstatistik zeigen, weisen die Diskrepanzen in der Saisonalität darauf hin, dass einzelne atmosphärische Mechanismen in den Klimamodellen nicht genügend erfasst sind.

Nach der Bias-Korrektur (Abbildung 12) ergeben sich bezüglich der Saisonalität Verbesserungen in allen Varianten und in allen Gebieten. Die 3 km CCLM Daten kommen aber auch hier am nächsten an die beobachtete Saisonalität heran.

Zusätzlich werden die Simulationsergebnisse der Bodenfeuchte als mittlere monatliche Werte in Abbildung 13 (unkorrigiert) und Abbildung 14 (nach Bias-Korrektur) dargestellt. Die Bodenfeuchte ist eine wichtige Größe in der Entstehung von Hochwässern. Anhand der unkorrigierten Daten zeigen sich recht große Abweichungen von der Simulation, die mit beobachteten Eingangsdaten durchgeführt wurde (grüne Line). Diese Abweichungen sind vor allem im Sommer signifikant; auch die saisonalen Verschiebungen sind zu erkennen. Die Fehlerkorrektur ist nicht in der Lage, die Unterschätzung im Sommer auszugleichen. Dies deutet darauf hin, dass die Bodenfeuchte häufig im Sommer, in einer Periode mit häufigen Starkregen, unterschätzt wird, was eine Unterschätzung der Abflüsse in der Simulation bewirkt. Aufgrund der Nichtlinearitäten im Niederschlag-Abfluss Verhalten, welches auch im hydrologischen Modell entsprechend berücksichtigt ist, können die Abflussspitzen bei ähnlichem Niederschlag sehr unterschiedlich sein.

In der gleichen Weise wurden auch die Ergebnisse basierend auf dem Modell WRF (ebenfalls mit den Gitterweiten 0.03°, 0.11° und 0.44°) analysiert; die statistischen Maße werden im nächsten Kapitel in einer Zusammenschau mit den CCLM Ergebnissen verglichen.

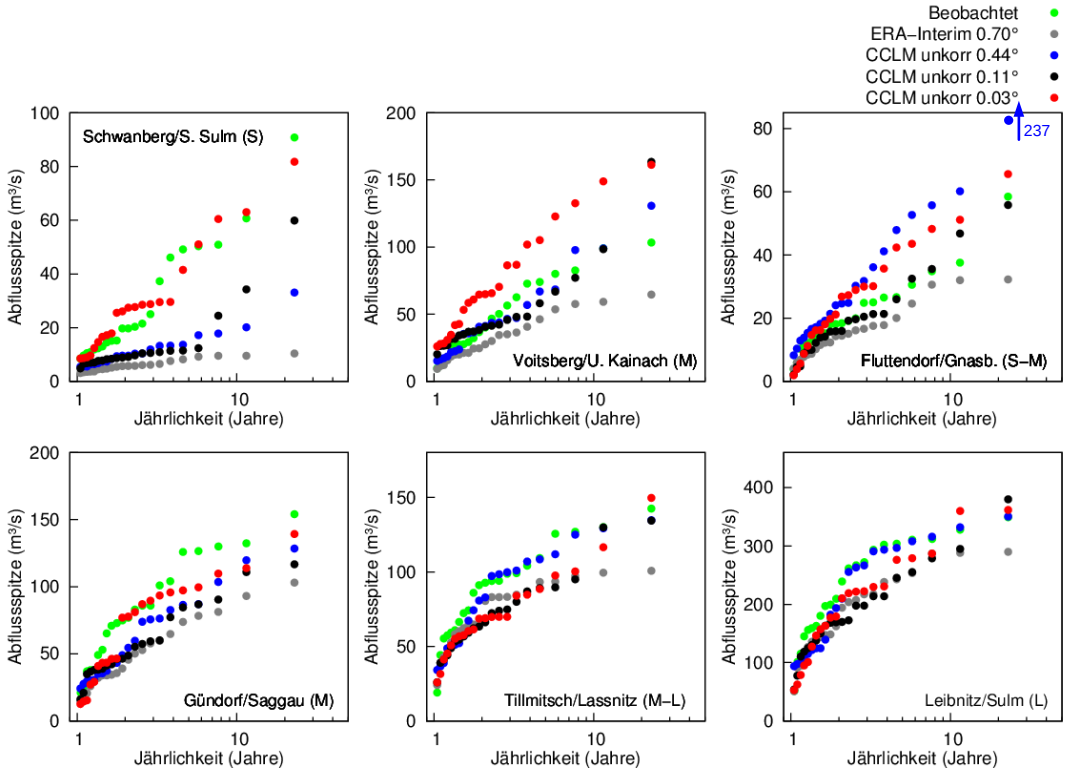


Abbildung 9 Beobachtete und anhand der unkorrigierten CCLM Ergebnisse simulierte Jahreshöchsthochwässer von 1989 bis 2010 (22 Jahre) dargestellt mit empirischen Jährlichkeiten („Plotting positions“, Gl. 1). Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

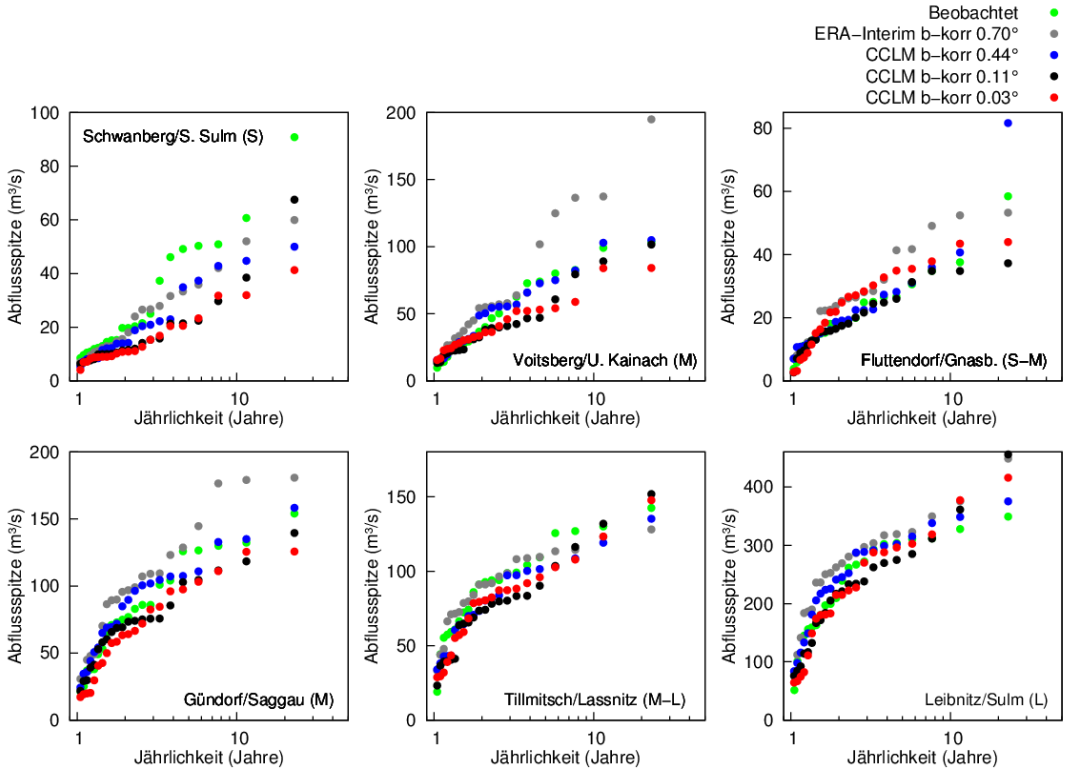


Abbildung 10 Beobachtete und anhand der Bias-korrigierten CCLM Ergebnisse simulierte Jahreshöchsthochwässer von 1989 bis 2010 (22 Jahre) dargestellt mit empirischen Jährlichkeiten („Plotting positions“, Gl. 1). Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

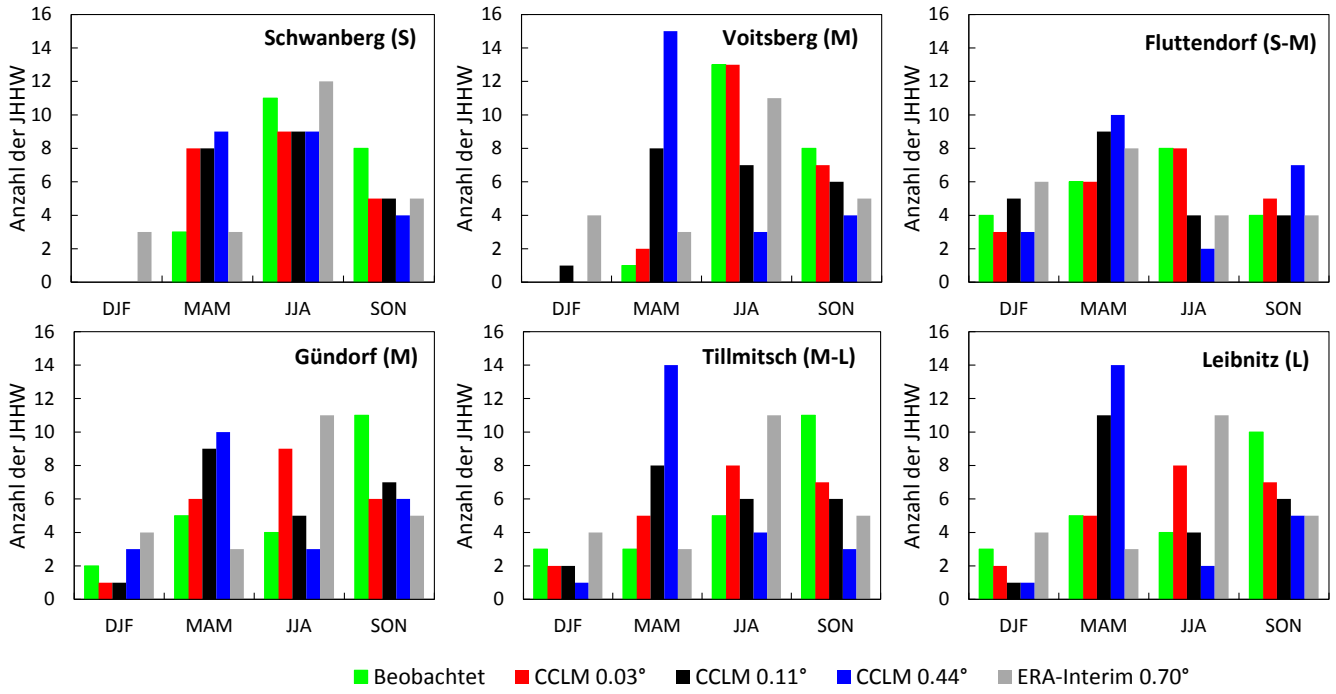


Abbildung 11 Saisonalität der Jahreshöchsthochwässer durch Einordnung in Quartale unter Verwendung der unkorrigierten CCLM Ergebnisse. Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

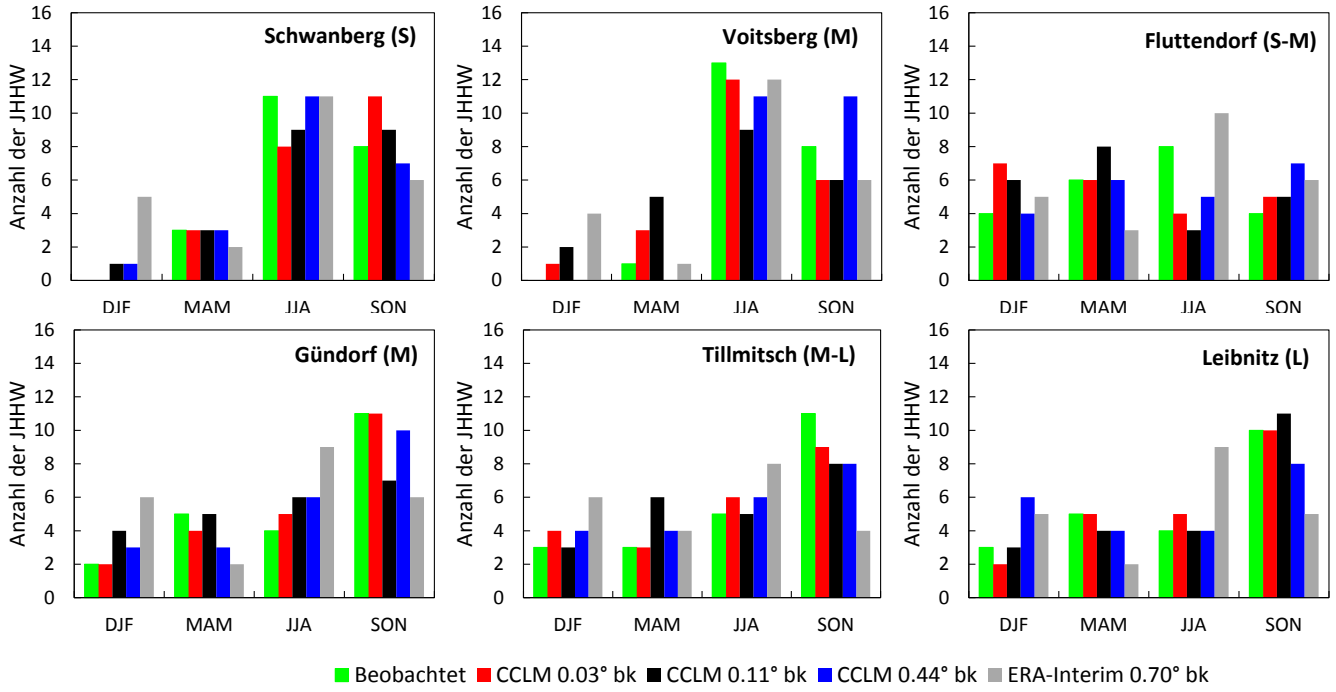


Abbildung 12 Saisonalität der Jahreshöchsthochwässer durch Einordnung in Quartale unter Verwendung der bias-korrigierten CCLM Ergebnisse. Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

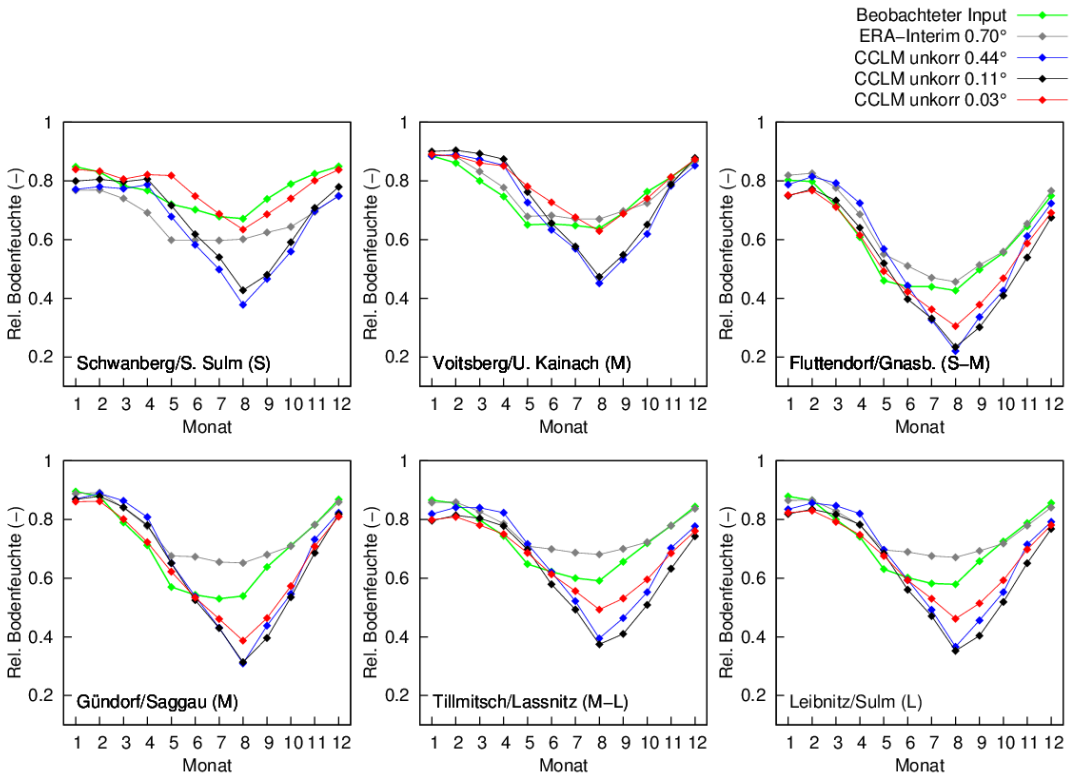


Abbildung 13 Mittlere monatliche Bodenfeuchte aus den Abflusssimulationen anhand der unkorrigierten CCLM Daten. Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

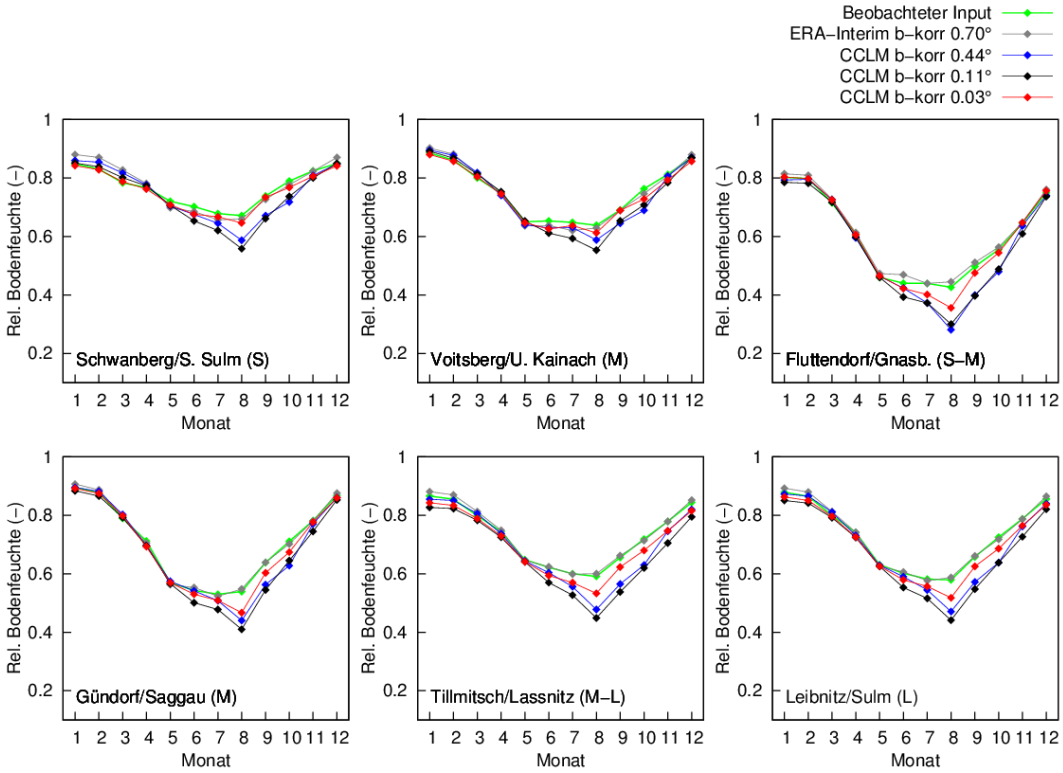


Abbildung 14 Mittlere monatliche Bodenfeuchte aus den Abflusssimulationen anhand der bias-korrigierten CCLM Daten. Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

4.5 Synthese, Interpretation und Publikation

Vergleich der Ergebnisse im historischen Zeitraum

In einem Syntheseschritt werden die unterschiedlichen Ergebnisse („Multi-Model-Ensemble“) in einer übersichtlichen Weise verglichen und bewertet. Hierfür werden erstens die statistischen Maße Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe der simulierten Hochwasserkollektive von 1989 – 2010 (22 Jahre) dargestellt (Abbildung 15). Aus Gründen der Vergleichbarkeit unter den Gebieten werden Mittelwert und Standardabweichung auf die jeweilige Einzugsgebietsfläche bezogen. Die Abbildung zeigt das erwartete Bild des Kleiner Werdens der Hochwasserabflussspenden (Mittelwerte und Standardabweichung) mit der Einzugsgebietsgröße, was durch die generelle Verringerung der Gebietsniederschläge bei starken, kleinräumigen Niederschlägen begründet ist. Die Ausnahme ist der Pegel Fluttendorf, der in der Oststeiermark liegt und geringe Hochwasserspenden aufgrund generell geringerer Niederschläge aufweist.

Ebenso zeigt sich für die größten Gebiete Leibnitz (rd. 1100 km²) und Tillmitsch (rd. 480 km²), dass bereits die unkorrigierten Klimamodelldaten Ergebnisse liefern, die nur geringfügig von den beobachteten Werten abweichen. Die Verbesserung der Ergebnisse in den kleinen Gebieten bei Verringerung der Gitterweite im Falle der CCLM Daten ist ebenfalls sichtbar. Bei Verwendung der WRF Daten zeigen sich bei 0.11° (~12.5 km) und vor allem bei den 0.03° (~3 km) Daten sehr starke Abweichungen von der Beobachtung, und diese sind in den kleinen Gebieten signifikant (z.B. am Pegel Schwanberg ergab sich ein zu hoher Mittelwert oder an den Pegeln Gündorf und Voitsberg eine unrealistisch hohe Schiefe). Durch die Reduktion der Gitterweite wird im Modell WRF also kein Mehrwert erzielt. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses muss jedoch berücksichtigt werden, dass WRF im Gegensatz CCLM nicht seit vielen Jahren in der operationellen Wettervorhersage im Alpenraum verwendet wird und daher auch keine (empirisch) ausbalancierte Modellkonfiguration vorweisen kann. Ein weiterer Grund für die größeren Abweichungen zu den Beobachtungsdaten bei WRF liegt an einem Fehler im Code, der erst bei hohen Auflösungen (z.B. 3 km Gitterweite) und langen Simulationszeiträumen auftritt und zu Artefakten entlang der seitlichen Modellränder führt (Truhetz et al., 2014). Um das Modell zu stabilisieren, wurde die Atmosphäre im Modell alle zwei Jahre neu initialisiert. Der Fehler im Code konnte erst in einer späteren Modellversion entfernt werden,

In gleicher Weise ist die Verbesserung nach der Bias-Korrektur (rote Punkte) im Fall des CCLM Daten in jedem Gebiet gegeben, nicht aber im Falle der WRF Daten. Vor allem die großen Abweichungen anhand der unkorrigierten Daten können nach der Korrektur nicht kompensiert (z.B. WRF 0.44° für Schwanberg) werden oder werden sogar überkompensiert (z.B. WRF 0.03° für Schwanberg und Voitsberg). Wie erwähnt liegt die Verschlechterung der Ergebnisse beim Pegel Schwanberg bei den 0.03° CCLM Daten nach der Bias-Korrektur am aggregierten Dreistundenniederschlag, der in der Korrekturmethodik aus mathematisch/statistischen Gründen verwendet wird.

Zur Erstellung der folgenden radialen Plots in Abbildung 16 wurde für jedes JHHW-Ereignis der Tag des Auftretens im Jahr in einen Winkel umgerechnet (Gl. 2) und dieser Winkel dann gemittelt (Gl. 3-6). Der Radius beschreibt die Stärke der Saisonalität (r=1, wenn alle Ereignisse auf dasselbe Datum im Jahr fallen). Dadurch können die Ergebnisse aus den verschiedenen Modellläufen untereinander und mit der Beobachtung (grünes ausgefülltes Quadrat) verglichen werden. Die Auswertung bestätigt die Aussagen von vorhin, dass durch die Reduktion der Gitterweite auf 0.03° (~3 km) im Falle der CCLM Daten (rotes ausgefülltes Quadrat) - bis auf den Pegel Schwanberg - durchgehend verbesserte Ergebnisse erzielt werden. Eine weitere Verbesserung erfolgt nach der Bias-Korrektur; die Werte anhand der RCMs kommen generell näher an den Wert aus den

aufgetretenen Hochwässern heran. Beispielsweise werden die starke Saisonalität (Juni) am Pegel Voitsberg und die schwache Saisonalität an den Pegeln Fluttendorf und Leibnitz besser abgebildet.

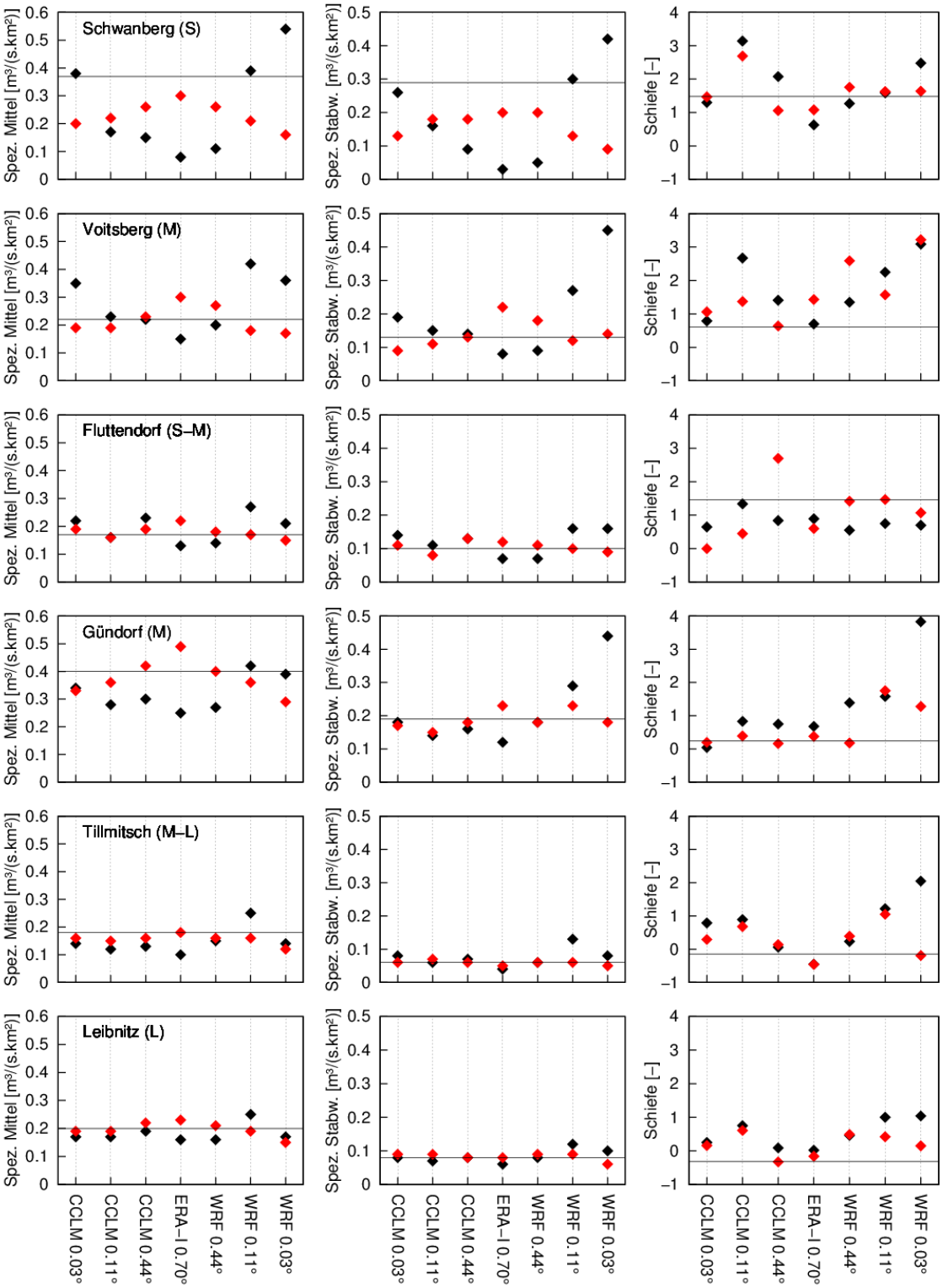


Abbildung 15 Zusammenstellung der statistischen Maße der größten jährlichen Hochwasserscheitel (22 Werte) aus den einzelnen Varianten. Schwarze Punkte: Simulation mit unkorrigierten RCM Daten; rote Punkte: Simulation mit bias-korrigierte RCM Daten. Die waagrechte Linie ist jeweils der Wert aus der beobachteten Reihe. Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

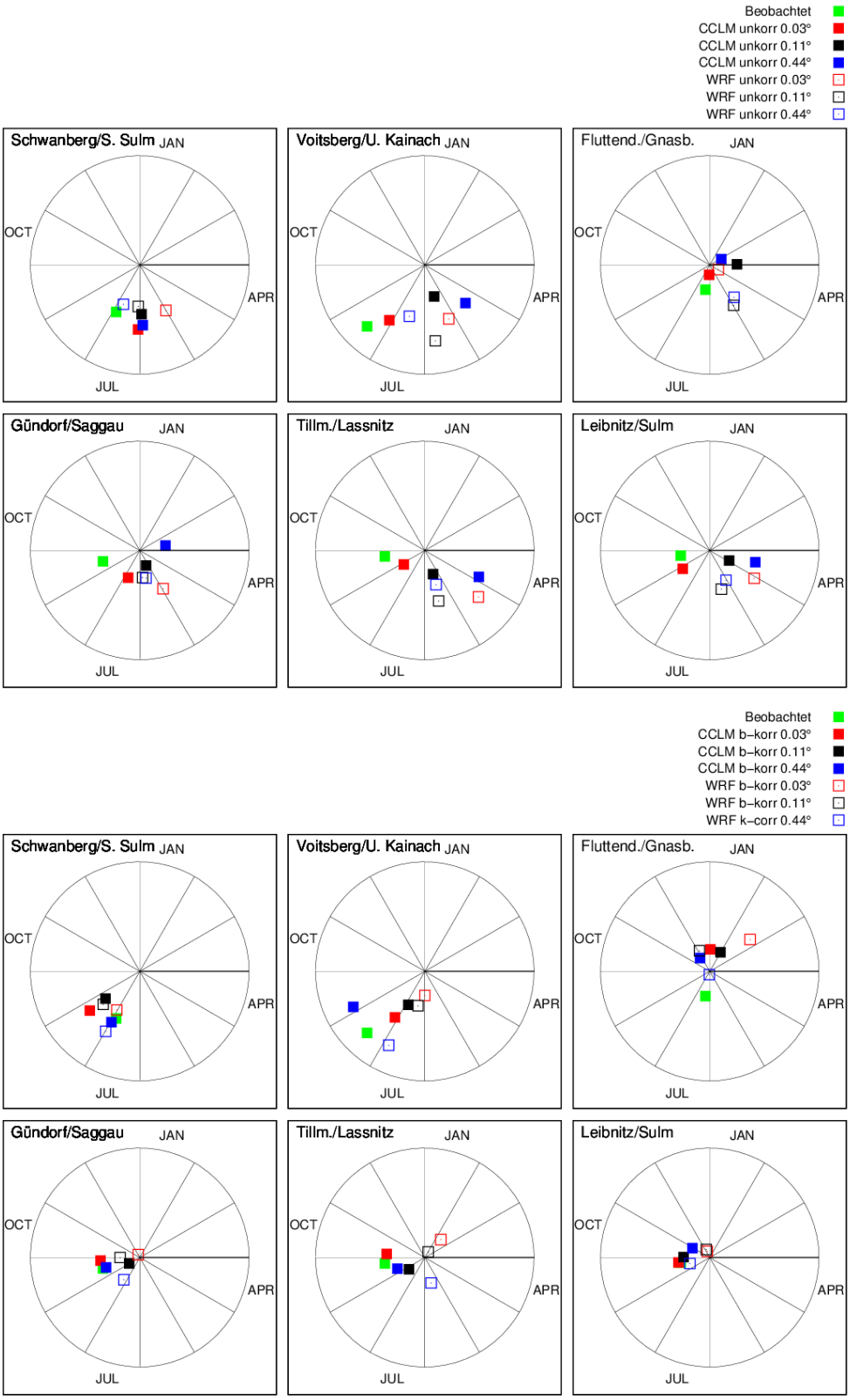


Abbildung 16 Radiale Plots zur Darstellung der Saisonalität: Tag des Auftretens im Jahr der simulierten jährlichen Hochwasserscheitel umgerechnet auf einen Winkel (Gl. 2) und anschließende Mittelung der 22 Werte (Gl. 3-6). Oben: Verwendung von unkorrigierten RCM Daten; unten: Verwendung von bias-korrigierten RCM-Daten.

Ergebnis der Langzeitsimulation

Mit dem Modell CCLM mit 0.11° Gitterweite, angetrieben von der Klimaprojektion MPI-ESM-LR unter Verwendung des Emissionsszenarios RCP8.5, wurde eine kontinuierliche Simulation von 1989 bis 2035 durchgeführt und mittels SDM bias-korrigiert. Der Rechenschritt im hydrologischen Modell beträgt eine Stunde; die Auflösung im Klimamodell beträgt allerdings drei Stunden. Dieser Modelllauf dient als Test der Anwendbarkeit der Modellkopplung; es muss hier darauf hingewiesen werden, dass dieser nur eine mögliche Variante eines zukünftigen Verlaufs des Klimas darstellt. Aufgrund der mitunter stark unterschiedlichen Ergebnisse bei Verwendung unterschiedlicher Klimamodelle (Emissionsszenario, GCM und RCM) ist ein Ensemble notwendig, um die Ergebnisse bewerten und fundierte Aussagen treffen zu können. Die CCLM Klimasimulation trägt dazu bei, das EURO-CORDEX Ensemble zu erweitern und wird über das Portal der Earth System Grid Federation (https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/) der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Als Beispiel zeigt Abbildung 17 die Reihe der simulierten jährlichen Hochwasserspitzen am Pegel Gündorf an der Saggau im südwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes (unten) verglichen mit der beobachteten Reihe von 1989-2010 (Zeitraum der Auswertungen und Bias-Korrektur in diesem Projekt, oben). Generell zeigen sich im zukünftigen Zeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum erhöhte Spitzen. Auffallend ist das Auftreten eines außergewöhnlich großen Hochwassers im Jahr 2017. In Teilgebieten der südlichen Steiermark wurden im Klimamodell Ende Juli Niederschläge von 160 – 190 mm in 15 Stunden simuliert (vgl. Abbildung 9). Diese Spitzen treten im Zusammenhang mit Wetterlagen auf, die an sich schon zu Extremniederschlagsereignissen neigen (z.B. Vb-Zyklone), in denen aber zusätzlich eine hohe sommerliche Gewittertätigkeit eingelagert ist. Diese Situationen sind für Klimamodelle mit Konvektionsparametrisierungen (bei Gitterweiten von 12.5 km und 50 km ist das der Fall) schwer zu erfassen. Dass dieses Ereignis jedoch genau am in diesem Zeitraum auftritt, ist allerdings Zufall.

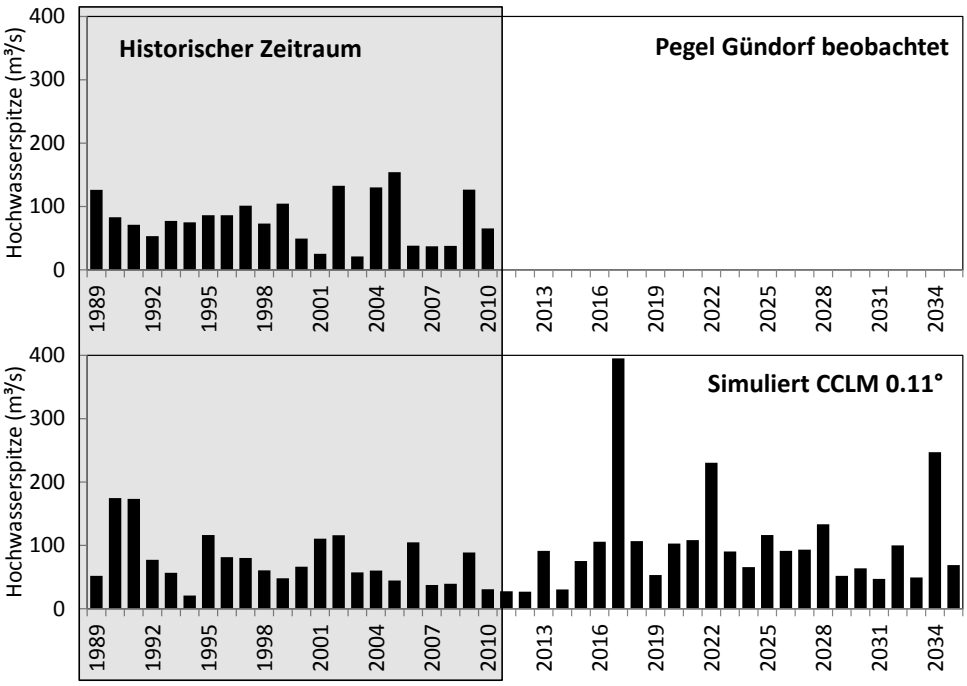


Abbildung 17 Reihen von Jahreshöchsthochwässern für den Pegel Gündorf/Saggau. Oben: beobachtete Hochwässer im historischen Zeitraum (1989-2010); unten: simulierte Jahreshöchsthochwässer von 1989 bis 2035 unter Verwendung der CCLM 0.11° bias-korrigierten Daten.

In ähnlicher Wiese wie zuvor werden die Ergebnisse der Hochwasserstatistik dargestellt. In Abbildung 18 werden jeweils 22 Jahre, in Konsistenz mit den vorangegangenen Auswertungen von 1989 bis 2010 (historischer Zeitraum) und von 2014 bis 2035 (zukünftiger Zeitraum) miteinander verglichen. Die Darstellung zeigt, dass im historischen Zeitraum die Hochwasserspitzen geringfügig unterschätzt werden. Die Ausnahme bildet das kleinste Gebiet des Pegels Schwanberg mit einer stärkeren Unterschätzung, was auch an der Verwendung der auf drei Stunden aggregierten Niederschläge liegt (vgl. Ausführungen in Kap. 4.4 und Ergebnisse in Abbildung 10). Die Erhöhung der Hochwässer in der zukünftigen Simulation ist systematisch über alle Gebiete. Neben dem oben erwähnten Datum im Jahr 2017 wird noch ein „Ausreißer“ im Gebiet des Pegels Voitsberg, im Nordwesten des Untersuchungsgebietes gelegen, im August 2022 simuliert. In den entsprechenden Einzugsgebieten wurden im Klimamodell Niederschläge von 120-160 mm in 6 Stunden simuliert. Generell zeigen sich ausgeprägte Abweichungen ab einer Jährlichkeit von 8-10 Jahren; für die kleineren, häufiger auftretenden Hochwässer ist die Überschätzung nur gering. Dies kann durch die Nichtlinearität im Niederschlag-Abflussprozess erklärt werden, der im hydrologischen Modell berücksichtigt ist und bewirkt, dass bei entsprechender Bodensättigung kleine Änderungen in den Niederschlägen große Unterschiede in den simulierten Abflussspitzen bewirken. Solche hohen Niederschlagsraten entstehen im Klimamodell bei gröberen Auflösungen mit aktivierter Konvektionsparametrisierung, wenn synoptisch getriebene Extremereignisse mit zusätzlich eingelagerter Gewittertätigkeit auftreten. Konvektionsparametrisierungen werden allgemein als Hauptverursacher von Abweichungen im simulierten Niederschlag gesehen (Maraun et al., 2010; Prein et al., 2015). Allerdings ist anzunehmen, dass bei derartig hohen Abflüssen massive Ausuferungen auftreten, die im hydrologischen Modell nicht zur Gänze erfasst werden. Dadurch werden die Spitzen gedämpft, und die konkreten Werte dieser hohen Abflussspitzen aus dem Modell sind daher nicht zu bewerten.

Schließlich wird in einer letzten Auswertung noch die Abbildung der Saisonalität geprüft (Abbildung 19). Wie die oben beschriebenen Ausreißer andeuten, werden die Jahreshöchsthochwässer (JHHW) bevorzugt im Sommer sowie im Herbst simuliert. Im historischen Zeitraum stimmt die Verteilung der simulierten JHHW sehr gut mit jener der beobachteten JHHW überein. Dies wird in diesem Zeitraum auch durch die Fehlerkorrektur bewirkt (vgl. Abbildung 12). Die zukünftige Verteilung der JHHW über das Jahr ändert sich dabei nur geringfügig.

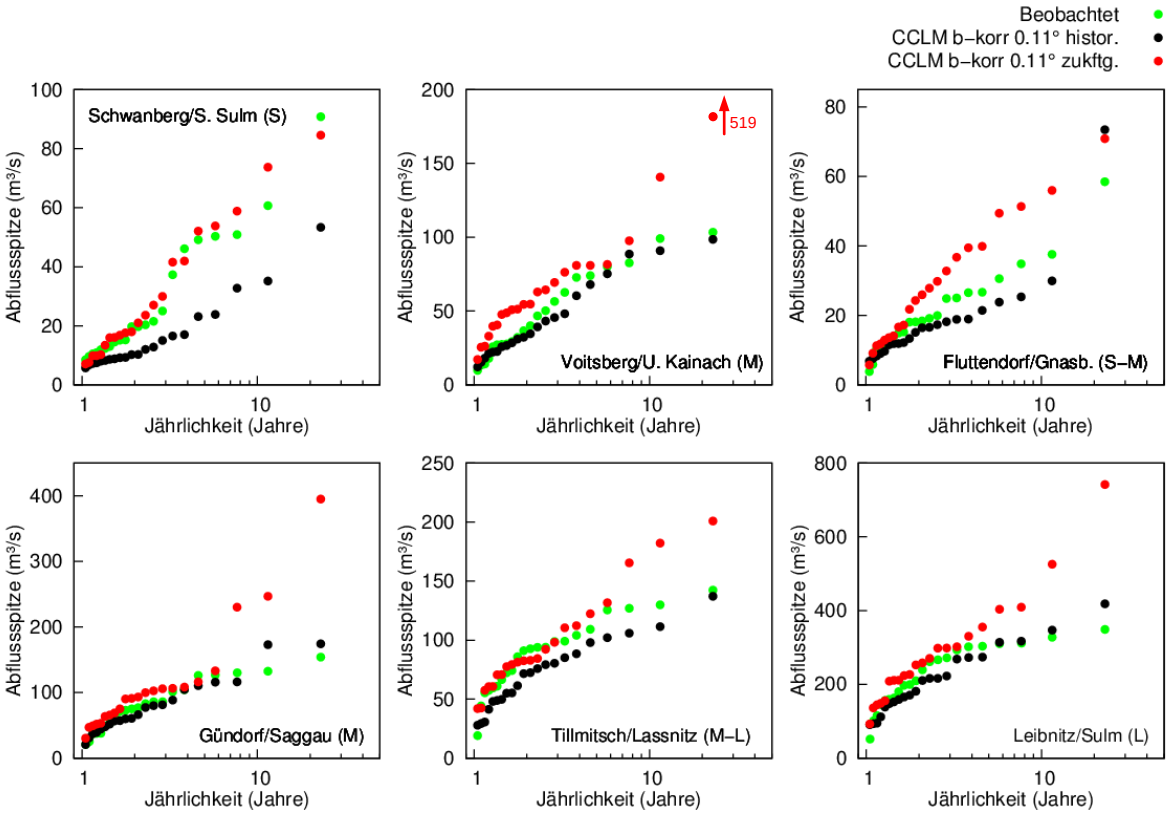


Abbildung 18 Beobachtete und simulierte Jahreshöchsthochwässer von 1989 bis 2010 (histor.) verglichen mit dem zukünftigen Zeitraum 2014-2035, dargestellt mit empirischen Jährlichkeiten („Plotting positions", Gl. 1). Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

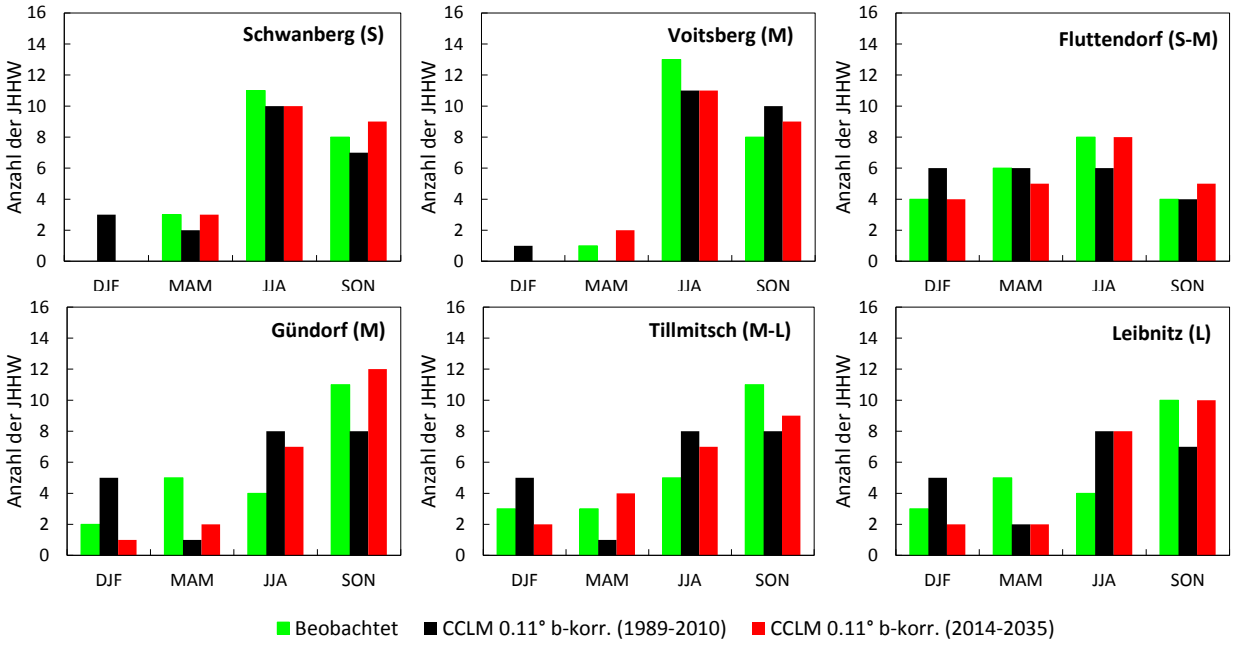


Abbildung 19 Saisonalität der Jahreshöchsthochwässer unter Verwendung der bias-korrigierten historischen (1989-2010) und zukünftigen (2014-2035) 0.11° CCLM Ergebnissen. Die Buchstaben in den Klammern weisen auf die Gebietsgröße hin (L: groß; M: mittel und S: klein).

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mehrwert der Reduktion der Gitterweite in den Regionalen Klimamodellen

Die Ergebnisse anhand der unkorrigierten Daten aus den verschiedenen Klimamodell-Settings zeigen, dass für kleine Einzugsgebiete (A < 200 km²) eine Auflösung von ~ 3km unbedingt notwendig ist, um die Größenordnung der Hochwasserspitzen entsprechend nachzubilden. Sowohl Frequenz des Auftretens (Hochwasserstatistik) als auch Saisonalität werden in allen Gebieten mit dem hydrologischen Modell im historischen Zeitraum 1989-2010 gut widergegeben. In den größeren Gebieten bringt eine Auflösung von ~12.5 km und ~50 km zwar zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich Hochwasserstatistik, allerdings wird die Saisonalität der Jahreshochwässer nicht richtig erfasst. Dies deutet darauf hin, dass die generellen Mechanismen in den atmosphärischen Bedingungen zur Entstehung größerer Hochwässer in der Region Südsteiermark nicht abgebildet werden. Außerdem ist für Einzugsgebiete kleiner als 100 km² eine zeitliche Auflösung von einer Stunde essentiell. Aufgrund der kurzen Reaktionszeiten auf dieser Skale geht bei Verwendung von aggregierten Niederschlagssummen die Information über kurze, starke Intensitäten, die für die Hochwasserspitze relevant sind, verloren. Generell traten in allen Gebieten Biases – sowohl in Niederschlag als auch in Lufttemperatur – auf. Die Biases werden mit einer im Zuge von CHC-FloodS neu entwickelten Methode korrigiert. In einigen wenigen Zeiträumen treten unrealistisch hohe Niederschlagsintensitäten über einen Zeitraum von 10-15 Stunden auf, die in entsprechender Weise Hochwässer produzieren, die weit über den beobachteten Hochwässern liegen. Diese treten bei synoptisch getriebenen Extremereignissen mit eingelagerter Gewittertätigkeit auf, welche von Regionalen Klimamodellen mit gröberer Auflösung und Konvektionsparametrisierung nur unzureichend erfasst werden.

Mehrwert der neu entwickelten Fehlerkorrekturmethode („Scaled Distribution Mapping“ – SDM)

Im Zuge von CHC-FloodS, gemeinsam mit anderen ACRP-Projekten, wurde eine neue Methode der statistischen Fehlerkorrektur entwickelt. Die Methodik besitzt gegenüber dem klassischen Quantile Mapping den Vorteil, dass das Klimaänderungssignal durch die Korrektur nicht verändert wird. In allen Gebieten ergaben sich gegenüber den unkorrigierten Daten Verbesserungen, sowohl in der Hochwasserstatistik als auch in der Saisonalität der Jahreshochwässer. Aus mathematisch/statistischen Gründen wird in der Korrektur mit einem Zeitschritt von drei Stunden gearbeitet, d.h. in das hydrologische Modell gehen bezüglich Niederschlag Dreistundensummen ein. Dies verschlechtert die Ergebnisse im kleinsten Gebiet mit einer Größe von rd. 75 km², was wiederum die Notwendigkeit des Ein-Stunden-Schrittes auf dieser Skale zeigt. Die Ergebnisse deuten weiters darauf hin, dass in einigen Gebieten mit sehr großem Bias, die Fehler überkompensiert werden.

Typ des Regionalen Klimamodells

Generell zeigt sich, dass das Modell CCLM deutlich zuverlässigere Ergebnisse liefert als das Modell WRF. Besonders bei Reduktion der Gitterweite auf ~12.5 km und weiter auf ~3 km treten beim Modell WRF sehr starke Abweichungen von den beobachteten Daten auf. CCLM wurde und wird seit vielen Jahren operationell in der Numerischen Wettervorhersage auch im Alpenraum eingesetzt (z.B. von der MeteoSchweiz oder dem Deutschen Wetterdienst) und ist daher wesentlich besser auf die meteorologischen Prozesse hierzulande abgestimmt. WRF hingegen stammt aus dem US amerikanischen Raum und kann nicht auf diese historische Entwicklung verweisen.

Vergleiche auf Ereignisbasis sind nicht möglich

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Vergleich von simulierten Ereignissen direkt mit an beobachteten Ereignissen an einem bestimmten Datum nicht möglich ist. Aufgrund der hohen Zahl an Freiheitsgraden in den Regionalen Klimamodellen weichen die Simulationen mehr oder weniger deutlich von den Antriebsdaten (ERA-Interim Re-Analysen) ab, und die synoptischen Bedingungen, die zu einem Hochwasser führten (z.B. Hochwasser im August 2005) werden im Klimamodell in Raum und Zeit nicht entsprechend widergegeben. Einzelne Starkregen oder Gewitter (konvektive Ereignisse mit geringem synoptischem Einfluss) werden auf konvektionserlaubender Skala (~3 km) zwar simuliert, treten aber an unterschiedlichen Zeitpunkten und in unterschiedlichen Teileinzugsgebieten auf (sogenanntes "Double-Penalty-Problem").

Generelle Empfehlungen zur Kopplung Klimatologie und Hydrologie bezüglich Hochwässer in kleinen und mittleren Einzugsgebieten

- Ein dynamisches Downscaling auf konvektionserlaubende Skale von ~3km ist unbedingt notwendig für Gebiete < 200 km². In größeren Gebieten zeigen die Ergebnisse bezüglich Hochwasserstatistik nur geringe Unterschiede zwischen den Modell-Settings mit CCLM. Allerdings ist auch hier die Verwendung der 3 km Simulation zu empfehlen, da in hydrologischen Modellen meist die größeren Gebiete durch kleine Sub-Einzugsgebiete unterteilt sind. Es zeigt sich hier zudem, dass die Saisonalität der Hochwässer dadurch deutlich verbessert widergegeben werden kann, was einen Rückschluss auf eine bessere Erfassung der generellen Mechanismen der Hochwasserentstehung zulässt.
- In gewissen Zeiträumen werden aufgrund von notwendigen Konvektionsparametrisierungen in einigen Klimamodell-Settings unrealistisch hohe Intensitäten, und diese fortgeschrieben über 10-15 Stunden, simuliert. Es wird empfohlen, entweder eine prozess-basierte Bias-Korrektur zu verwenden, die in der Lage ist, diese speziellen Fälle zu korrigieren, oder die Konvektionsparametrisierungen in den Klimamodellen zu verbessern, oder generell konvektions-erlaubende Klimamodelle zu verwenden.
- In der vorliegenden Form kann eine Anwendung von WRF für die Gitterweiten von ~12.5 km und ~3 km für hydrologische Anwendungen nicht empfohlen werden. WRF müsste in weiteren Sensitivitätsstudien besser auf die Verhältnisse im Alpenraum abgestimmt werden. Die CCLM Ergebnisse sind deutlich robuster.
- Die neue Fehlerkorrekturmethode bringt in zufriedenstellender Weise Verbesserungen in allen Einzugsgebieten, außer in jenen mit einer Größe kleiner als 100 km². Wie oben erwähnt wird daher empfohlen, zu versuchen, in den statistischen Korrekturalgorithmen ein statistisches Downscaling zu implementieren, das in der Lage ist kleinskalige Prozesse zu erfassen. SDM ist jenen Korrekturmethoden überlegen, die eine aus dem Klimamodell vorgegebene Klimaänderung ohne Rücksicht auf physikalische Prozesse modifizieren und auf diese Weise „künstliche" Klimaänderungen generieren.
- Vorsicht ist geboten bei Hochwasserjährlichkeiten ab einem Bereich von 8 bis 10 Jahren. Aufgrund der Nichtlinearität im Niederschlag-Abflussprozess, der entsprechend in den hydrologischen Modellen berücksichtigt ist, können hier kleine Änderungen im Niederschlag große Änderungen in den simulierten Hochwässern bewirken. Darüber hinaus sind solche Ereignisse recht selten, wodurch eine gesicherte Aussage bezüglich Güte der Simulation der Modellkette relativ schwierig ist. Auch ist die Aussagekraft der hydrologischen Modelle bezüglich Ausuferung bei extremen Ereignissen begrenzt, da die Überflutungsflächen nicht erfasst werden.

- Darüber hinaus hat CHC-FloodS gezeigt, wie stark Forschung von der Verfügbarkeit von Hochleistungsrechenzentren abhängig ist. Wenn konvektionserlaubende Klimasimulationen (~3 km Gitterweite) zum neuen Standard der regionalen Klimamodellierung werden sollen, ist ein Ausbau verlässlicher Speicherkapazitäten unerlässlich und ein Überverkauf von Rechenzeiten an den Rechenzentren zu vermeiden.
- Um robuste Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf Überflutungsereignisse ableiten zu können, sind Ensemblestudien gefordert.

Übergabe der Klimaprojektion mit CCLM 0.11° an die ESGF

Wie im Projekt vorgesehen, wurde eine Langzeitsimulation mit dem gekoppelten Modell durchgeführt, um Änderungen im Auftreten von Hochwässern in einem zukünftigen Zeitraum mit der Referenzperiode (1989-2010) zu vergleichen. Es wurden Ergebnisse mit CCLM, angetrieben durch das Globale Modell MPI-ESM-LR und unter Verwendung des Emissionsszenarios RCP8.5 für einen Zeitraum von 1989 bis 2035 bias-korrigiert, an das hydrologische Modell übergeben und die transienten Simulationen ausgewertet. Dazu muss angemerkt werden, dass es sich hier nur um eine mögliche Realisation des zukünftigen Klimas handelt; aufgrund interner Variabilität, verschiedener Möglichkeiten bei der Wahl des Emissionsszenarios und des Globalen Klimamodells, sind für robuste Aussagen zu Änderungen in den Hochwässern mehrere Simulationen (Ensemble) notwendig. In diesem Sinne wird die in CHC-FloodS durchgeführte Klimasimulation mit CCLM an die Plattform der ESGF übergeben, wo sie den Pool der EURO-CORDEX Simulationen bereichert.

Implikationen aus CHC-FloodS für die Hochwasserrisikoabschätzung

Die Zusammenarbeit der verwandten Disziplinen Klimatologie und Hydrologie und die Behandlung der grundlegenden Forschungsfragen zur Überbrückung der unterschiedlichen räumlichen Skalen bot in diesem Projekt die Möglichkeit, generelle Anforderungen für die Erfassung von lokalen Hochwässern der einen an die andere Disziplin zu formulieren. Das gekoppelte Modell im vorliegenden Projekt steht am Beginn einer Entwicklung der Kombination der beiden Modellfamilien für kleinräumige Modellanwendungen, die auch von der ständigen Weiterentwicklung von Computerressourcen getragen wird. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, klimabedingte Änderungen im Auftreten von Hochwässern in kleinen Einzugsgebieten abzuschätzen.

Wichtig ist vor allem, dass die Veränderungen in der Häufigkeit verschieden großer Hochwässer quantifizierbar werden. Damit verbunden sind Änderungen in den statistischen Eigenschaften, beispielsweise der höchsten jährlichen Hochwässer, die eine wichtige Grundlage zur Abschätzung von Hochwasserbemessungswerten darstellen (z.B. HQ100). Eine derartige Modellkette kann daher als wertvolles Planungsinstrument dienen, um auf mögliche Veränderungen durch Klimawandel frühzeitig reagieren zu können.

Im Projekt wurde aber auch eine zweite Stoßrichtung verfolgt, die sich aus den großen Unsicherheiten in den Niederschlägen aus den Klimamodellprojektionen ergibt. Qualitativ werden erwartete Veränderungen in den generellen Mechanismen zur lokalen Hochwasserentstehung beschrieben, einschließlich hochwasserauslösender Wetterlagen. Darauf aufbauend können Storylines oder „Was wäre, wenn“ Diskussionen in Zusammenarbeit mit Experten der Fachrichtungen Klimatologie, Hydrologie und Wasserwirtschaft initiiert werden.

B) Projektdetails

6 Methodik

6.1 Auswahl des Testgebietes

Für die vorliegende Studie wurde das Gebiet der südlichen Steiermark gewählt, da diese Region sehr häufig von lokalen Starkregen betroffen ist. Merz & Blöschl (2003) geben hier konvektive, kurze Starkregen als den signifikanten Ereignistyp zur Hochwasserentstehung an.

Darüber hinaus ist in großen Teilen (Weststeiermark) bereits ein räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes hydrologisches Modell vorhanden und zur Hochwasserwarnung im operativen Einsatz (Ruch et al., 2012). Die in CHC-FloodS durchgeführte Erweiterung des Modells in die Südoststeiermark erfolgt dabei in Synergie mit geplanten Modellen zur Hochwasserprognose und -warnung des Landes Steiermark.

Schließlich sind in der Region sehr viele Abflussdaten vorhanden, um das Modell zu kalibrieren und zu validieren. Die Pegel besitzen Einzugsgebiete in der Größe von 30 bis 1100 km²; die Gebiete erstrecken sich über gebirgige und ebene Regionen mit unterschiedlichen klimatischen und geologischen Bedingungen. Die Region eignet sich daher hervorragend zur Analyse und Bewertung von kleinräumigen Klima- und hydrologischen Modellen.

6.2 Analyse und Bearbeitung der hydrometeorologischen Daten

Meteorologische Daten (Niederschlag und Lufttemperatur) wurden von allen Stationen in der Region verwendet, welche von den beiden Betreibern Hydrographischer Dienst Steiermark und Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verfügbar sind. Hochauflösende Daten stehen bis zum Jahr 2000 nur von wenigen Stationen zur Verfügung, Stationen mit Tageswerten sind bereits bei Beginn des Untersuchungszeitraumes ausreichend vorhanden (Abbildung 20). Zur Interpolation wurde in Konsistenz zur Kalibrierung in Ruch et al. (2012) nach Reszler et al. (2006) vorgegangen: Beim Niederschlag werden die Tageswerte ebenfalls in die Interpolation einbezogen, indem die interpolierten Muster der Stundewerte für jeden Tag mit den interpolierten Mustern der Tageswerte skaliert werden. Aufgrund der höheren Anzahl an Tageswert-Stationen weist diese Interpolation wesentlich geringere Unsicherheiten auf als die mit hochaufgelösten Intensitäten, wodurch die Abschätzung der Wasserbilanz verbessert wird. Wie in Abbildung 20 deutlich wird, ist dies vor allem für den Zeitraum 1989 bis 2000 sehr wichtig. Beide Interpolationen erfolgen über die Methode der Inversen Abstandsquadrate. Zur Interpolation der Lufttemperatur erfolgt zuerst eine Höhenregression, und in einem zweiten Schritt werden die Residuen an den Stationen über die Methode der Inversen Abstandsquadrate interpoliert. Letzteres besitzt den Vorteil, dass der Stationswert erhalten bleibt.

Die auf das 1 km Raster interpolierten Daten dienen als Referenzdatensatz zur Ermittlung von Fehlermaßen der Klimamodellergebnisse und zur Entwicklung der statistischen Fehlerkorrekturmethode.

Aus der hohen Anzahl an verfügbaren Pegeln, an deren Daten das hydrologische Modell kalibriert wird, werden für die Auswertung in CHC-FloodS 6 Pegel ausgewählt, die charakteristisch für eine Teilregion sind und über Datenreihen im Untersuchungszeitraum 1989-2010 verfügen. Außerdem wird die gesamte Bandbreite der Einzugsgebietsflächen abgedeckt (kleines Gebiet mit 75 km² bis

großes Gebiet mit 1100 km²). Abbildung 21 zeigt eine Übersicht über das Modellgebiet und die Lage der ausgewählten Pegel. Dazu ist noch das verwendete Stationsnetz (Stand: Ende der Kalibrierungsperiode 2009) eingezeichnet.

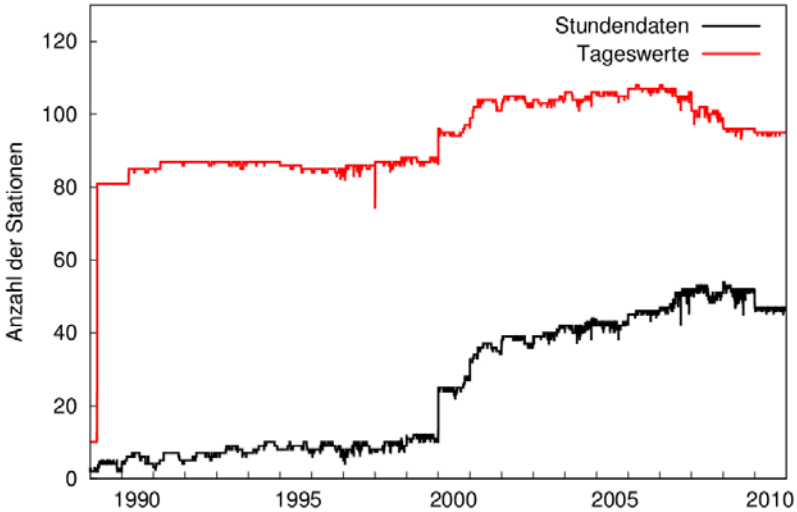
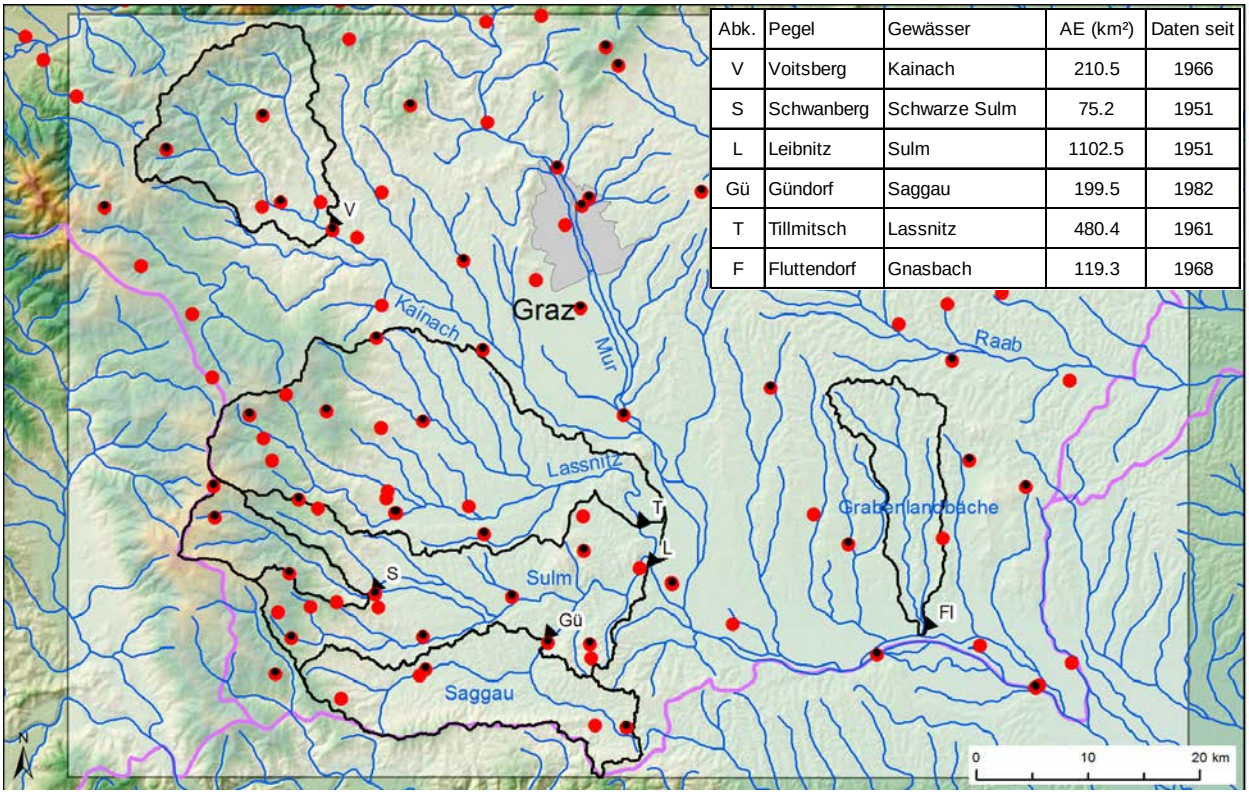


Abbildung 20 Verfügbarkeit der Stationen mit Stundendaten und Tageswertdaten über den Zeitraum 1989 bis 2010.



Abk.	Pegel	Gewässer	AE (km²)	Daten seit
V	Voitsberg	Kainach	210.5	1966
S	Schwanberg	Schwarze Sulm	75.2	1951
L	Leibnitz	Sulm	1102.5	1951
Gü	Gündorf	Saggau	199.5	1982
T	Tillmitsch	Lassnitz	480.4	1961
F	Fluttendorf	Gnasbach	119.3	1968

Abbildung 21 Stationsnetz (rot: nur Tageswerte; schwarz: hoch aufgelöst) und ausgewählte Pegel für die Auswertung in CHC-FloodS. Das graue transparente Fenster ist die Modelldomain.

Erster Punkt der hydrologischen Datenanalyse ist die Statistik der größten jährlichen Hochwässer. Veranschaulicht wird dies anhand der üblichen “plotting positions”, über welche die empirischen Jährlichkeiten berechnet werden

$$T = (N+1) / m \qquad \text{Gl. 1}$$

T ist das Widerkehrintervall oder Jährlichkeit, *N* die Anzahl der Werte (Jahre) und *m* die Rangordnung (1 für das größte und N für das kleinste Hochwasser). Zusätzlich werden die statistischen Maße Mittelwert, Standardabweichung und Schiefe des Hochwasserkollektivs herangezogen. In der generellen Datenanalyse wird die gesamte Reihe der Jahresshöchsthochwässer verwendet; für die Auswertung der Modellergebnisse dient der Zeitraum 1989-2010 (22 Jahre).

Neben diesen quantitativen/statistischen Maßen werden auch qualitative Maße einbezogen, wie Saisonalität, Ereignis- bzw. Wetterlagentypen, Bodenfeuchtebedingungen, Schneeschmelze, etc.. Diese Maße tragen maßgeblich zum Verstehen der generellen Mechanismen zur Hochwasserentstehung in einem Einzugsgebiet dar. Blöschl und Montanari (2009) empfehlen die Einbeziehung dieser „soft facts“ in Klimawandelstudien.

Die Saisonalität der Hochwässer beispielsweise, d.h. das zeitliche Auftreten der Hochwässer im Jahr, gibt Hinweise auf die maßgebenden Mechanismen, die zum jeweiligen Hochwasser geführt haben. Häufige Sommerhochwässer deuten zum Beispiel auf einen Einfluss von Gewittern mit hohen Niederschlagsintensitäten hin, die oft auch bei trockenen Bodenverhältnissen im Sommer hohe Abflüsse entstehen lassen. Die Kleinräumigkeit der Gewitter hat dabei zur Folge, dass oft nur kleine Flusseinzugsgebiete betroffen sind. In großen Einzugsgebieten mittelt sich oft die raum-zeitliche Variabilität der Niederschläge und der Zuflüsse der Nebenflüsse oft heraus, weshalb die Hochwässer gleichmäßiger über das Jahr verteilt sind. Es bedarf einer großräumigen, länger andauernden Überregnung, mit welcher eine großflächige Bodensättigung verbunden ist, sodass alle Zubringer zum Hochwasser im Hauptfluss beitragen. Eine derartige Überregnung ist im Süden Österreichs vor allem in den Herbstmonaten aufgrund des gehäuften Auftretens von Tiefdruckgebieten im Mittelmeerraum zu beobachten.

Die Saisonalität wird in der vorliegenden Arbeit auch über radiale Plots veranschaulicht. Für jedes Ereignis wird das Datum des Auftretens im Jahr übergeführt in einen Winkel anhand

$$\alpha_i = D_i \frac{2\pi}{365}, \qquad i = 1, \dots n \qquad \text{Gl. 2}$$

mit D_i als dem Tag im Jahr (D_i = 1 für den 1.1. und Di = 365 für den 31.12.). Dieser Winkel kann auch gemittelt werden über mehrere Ereignisse; dies wird verwendet zum Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Modellläufen. Die Mittelung erfolgt dabei folgendermaßen

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sin(\alpha_i)}{n}$$

$$X = \frac{\sum_{i=1}^{n} \cos(\alpha_i)}{n} \qquad \text{Gl. 3-6}$$

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$\theta_r = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

X und Y sind die rechtwinkligen Koordinaten des Winkels Θ_r, und r ist der mittlere Vektor, der ein Maß für die Stärke der Saisonalität darstellt (r = 1 wenn alle Ereignisse auf dasselbe Datum fallen).

Zur Differenzierung verschiedener Ereignistypen hinsichtlich der generellen atmosphärischen Bedingungen wird sowohl zur Analyse als auch zur Auswertung der Ergebnisse auf eine Wetterlagentypisierung (COST Action 733, Tveito und Pasqui, 2007) zurückgegriffen. Diese Methodik (Philipp et al., 2014) kombiniert eine hierarchische Cluster-Analyse (HCA) mit einer „Principal Component“ Analyse (PCA) und wird angewandt auf die Ergebnisfelder (Luftdruck auf Meereshöhe, Convective Available Potential Energy (CAPE), Geopotentielle Höhe auf 500 hPa, Windgeschwindigkeit auf 700 hPa) der ERA-Interim Re-Analysen. Als Referenzdatensatz für den Niederschlag dient hier der EURO4M-APGD (Isotta et al., 2014) Datensatz.

Abflussprozesse und -mechanismen in einem bestimmten Gebiet werden i.A. erfasst über Ereignisanalysen, in denen Niederschlagsverlauf, Anstieg/Rückgang der Abflussganglinie, Abflussvolumen, etc. bei den maßgeblichen Hochwässern untersucht werden. Stehen Modellsimulationen zur Verfügung, kann die (simulierte) Bodenfeuchte und Verdunstung einbezogen werden, was Aussagen zu den Bedingungen am Beginn des Ereignisses zulässt.

Sowohl Wetterlagentypisierung als auch Ereignisanalyse zeigen den sehr stark ereignis-basierten Charakter der Auswertungen in dieser Studie.

6.3 Regionale Klimamodellierung

Kleinskalige Niederschlagsereignisse können mit modernen Globalen Klimamodellen (engl.: global climate model, abgekürzt GCM) nicht oder nur unzureichend erfasst werden (z.B. Maraun et al., 2010). In der Regionalen Klimamodellierung werden daher regionale Klimamodelle (engl.: regional climate model, abgekürzt RCM) eingesetzt, um die grobe Auflösung von GCMs mit einer Gitterweite von etwa 200 km zu erhöhen.

In groß angelegten Klimamodellierungsinitiativen, wie EURO-CORDEX, werden heutzutage Auflösungen von 12.5 km und 50 km erreicht. Diese haben jedoch den Nachteil, dass kleinräumige konvektive Niederschlagsereignisse (z.B. Gewitter) mit Hilfe von statistischen Methoden, sogenannter Konvektionsparametrisierungen, erfasst werden müssen, welche als Hauptursache für den Niederschlagsbias angesehen werden (Maraun et al., 2010; Prein et al., 2015). Erst bei Auflösungen kleiner 4 km (Weisman et al., 1997) werden tiefreichende Konvektionen explizit aufgelöst und die fehleranfälligen Konvektionsparametrisierungen können abgeschaltet werden. Jedoch sind diese sogenannten konvektionserlaubenden Simulationen kostspielig (eine Halbierung der Gitterweite bedeutet bei gleichbleibendem Modellgebiet eine Verachtfachung des Rechenaufwandes) und daher entsprechend technisch herausfordernd. In CHC-FloodS werden sowohl konvektionserlaubende (Gitterweite 3 km) Langzeitsimulationen als auch Langzeitsimulationen mit parametrisierter Konvektion (Gitterweite 12.5 km und 50 km) über die Periode 1989-2010 verwendet und mit Beobachtungsdaten verglichen, um die Auswirkung verschiedener Gitterweiten auf die Qualität von nachgeschalteter Hochwassersimulationen zu untersuchen und um auf diese Weise Anforderungen an die Klimamodellierung zu erarbeiten. Die verwendeten Klimamodelle, deren Auflösungen, und Simulationszeiträume sind in Tabelle 1 dargestellt, welche teilweise vom WEGC am Jülich Supercomputing Centre (JSC) und am Vienna Scientific Cluster (VSC) durchgeführt werden.

Tabelle 1 RCMs und deren Konfigurationen in CHC-FloodS.

Modell	Gitterweite	Zeitintervall	Periode	Antrieb	durchgeführt von
ERA-Interim	0.7° (~70 km)	3 h (Prognose)	1989-2010		ECMWF
CCLM 4.8	0.44° (~50 km)	1 h	1989-2010	ERA-Interim	WEGC (CORDEX)
CCLM 4.8	0.11° (~12.5 km)	3 h	1989-2010	ERA-Interim	BTU Cottbus (CORDEX)
CCLM 4.8	0.0275° (~3 km)	1 h	1989-2010	CCLM 0.11°	WEGC (NHCM-2)
WRF 3.3.1	0.44° (~50 km)	3 h	1989-2010	ERA-Interim	CRP-GL (CORDEX)
WRF 3.3.1	0.11° (~12.5 km)	3 h	1989-2010	WRF 0.44°	CRP-GL (CORDEX)
WRF 3.3.1	0.0275° (~3 km)	1 h	1989-2010	WRF 0.11°	WEGC (NHCM-2)
CCLM 4.8	0.11° (~12.5 km)	3 h	1989-2035	MPI-ESM-LR (RCP8.5)	WEGC (CHC-FloodS)

Wie bereits erwähnt, werden die Klimamodelldaten bias-korrigiert. Dazu wurde die Scaled Distribution Mapping (SDM) Methode (Switanek et al., 2016) entwickelt, welche speziell darauf abzielt, eine Klimaänderung, wie sie sich aus den rohen Klimamodelldaten durch den Vergleich einer zukünftigen mit einer vergangenen Periode ergibt, nicht zu verändern. Dies ist in Hinblick einer potentiellen Nutzung zu Klimawandelfolgeabschätzungen von Hochwässern von großer Bedeutung. Eine mögliche Manipulation der durch die Klimamodelle vor gegebene Klimaänderung durch eine statistische Bias-Korrekturmethode, die keine Rücksicht auf meteorologische Prozesse nimmt, würde unweigerlich zu Fehlinterpretationen führen.

Um das Klimaänderungssignal besser zu erhalten wird bei SDM die beobachtete kumulative Häufigkeitsverteilung (mittels Gamma-Funktion parametrisiert) pro Quantil aus der Trainingsperiode (30 Jahre) mit dem Klimaänderungssignal dieses Quantils skaliert und erhält auf diese Weise den bias-korrigierten Wert des Klimamodells. Dieser Vorgang wird für jede Gitterzelle und für jeden Wert einer auf 3 Stunden aggregierten Zeitserie der Klimamodelldaten in einem 30-Jahres-Fenster und +/- 15 Tagen um den aktuellen Wert Tag im Jahr wiederholt. Dadurch werden etwaige Periodizitäten im Jahresgang sowie auf der Sub-Tagesskala erfasst. Die Zahl der Niederschlagsereignisse aus dem Klimamodell wird nicht korrigiert; auch nimmt die Methode keine Rücksicht auf meteorologische Prozesse. Deshalb gelingt die Korrektur bei Extremereignissen nicht in jedem Fall – auch nicht bei konvektions-erlaubenden Klimamodellen.

6.4 Hydrologische Modellierung

Als hydrologisches Modell wird das Modell KAMPUS (Blöschl et al., 2008) verwendet, das auf 1 km Raster und im Stundenschritt arbeitet. Es ist in kleinen und mittleren Einzugsgebieten (kleiner 100 km² bis 1000 km²) im Einsatz zur operationellen Hochwasservorhersage und –warnung. Das Modell besteht aus einem Niederschlag-Abflussmodul in den Kopf- und Zwischeneinzugsgebieten (in vorliegenden Fall in der Südsteiermark insgesamt 96) und einer Wellenablaufkomponente für Gerinneabschnitte zwischen den Modellknoten (in vorliegenden Fall insgesamt 152). Das Niederschlag-Abflussmodell ist ein kontinuierliches Wasserbilanzmodell auf Rasterbasis. Die Abflussbildung wird über einen Bodenfeuchtemodul erfasst, der den zum Abfluss beitragenden Anteil von Regen und Schneeschmelze dQ über eine nichtlineare Beziehung aus der Bodenfeuchte bestimmt. Die Abflusskonzentration am Hang wird anhand eines oberen Bodenspeichers, eines tiefen Bodenspeichers und eines Grundwasserspeichers mit den Speicherinhalten S_1, S_2 und S_3 und den Speicherkonstanten k_1, k_2 und k_3 beschrieben. Der zum Abfluss beitragende Anteil von Regen und Schneeschmelze fließt in den oberen Bodenspeicher, welcher sich auf drei Wegen entleert: Erstens proportional zum Speicherinhalt in den Abfluss; zweitens, bei Überschreitung der kritischen

Speicherfüllung L_1, mit einer schnellen Speicherkonstante k0 in den Abfluss; drittens mit einer von der Bodenfeuchte abhängigen Perkolationsrate in den tiefen Bodenspeicher und den Grundwasserspeicher. Der tiefe Bodenspeicher und der Grundwasserspeicher entleeren sich in den Abfluss. Zusätzlich wurde eine Bypass-Komponente dQ_{by} eingeführt, der hydrologisch eine vertikale Wasserbewegung in Makroporen entspricht, welche die Matrix der obersten Bodenzone umgeht und einen Teil von Regen und Schneeschmelze direkt in den tiefen Bodenspeicher leitet. Abbildung 22 zeigt die Struktur der Aufteilung in die verschiedenen Abflusskomponenten auf der Pixelskale. Zusätzlich ist ein Modul zum „Infiltration Excess“ implementiert, der bei extremen Starkregen auftritt. Der Hangabfluss aus den drei Speichern wird danach zum Auslass jedes Teilgebietes transformiert und stellt den Teilgebietsabfluss bzw. direkten Zufluss zu einer Wellenablaufstrecke dar.

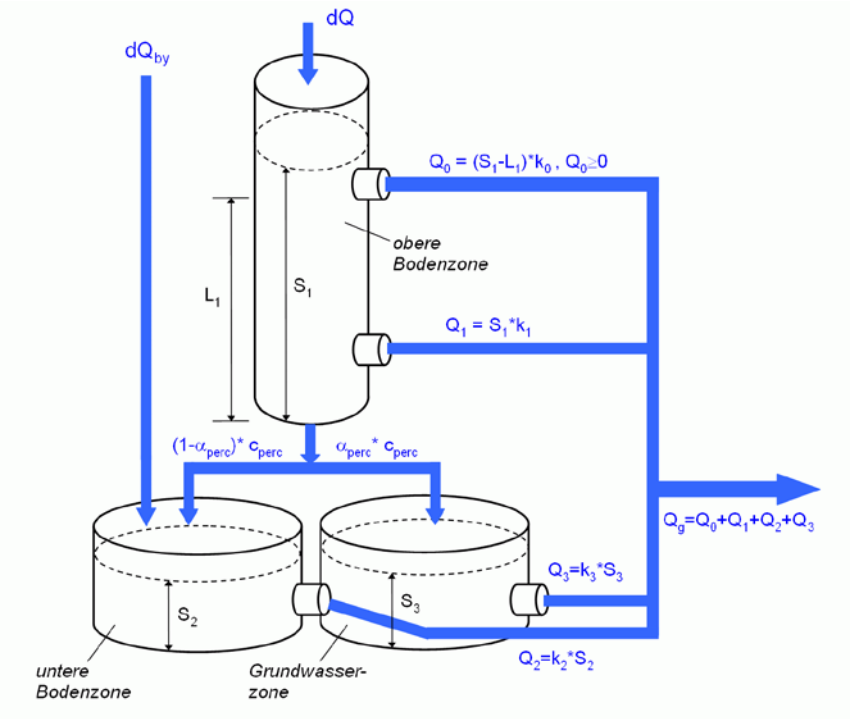


Abbildung 22 Modellstruktur des Abflussmoduls in KAMPUS auf Pixelskale.

Im Gegensatz zu physikalisch basierten Modellen, die aufwendige nummerische Lösungsalgorithmen beinhalten, handelt es sich hier um ein konzeptionelles Modell, weshalb die Rechenzeiten für Langzeitsimulationen (hier 1989 bis 2035) auch mit Rechenschritt von einer Stunde und für ein größeres Modellgebiet relativ kurz sind. Dies ermöglicht die Bearbeitung von mehreren Modellläufen im Rahmen des Multi-Model-Ensembles.

Im hydrologischen Modell implementiert ist ein vereinfachter Verdunstungsansatz (Methode nach BLANEY-CRIDDLE, modifiziert nach Schrödter et al., 1985), in dem die Verdunstung nur von der Lufttemperatur abhängt. Bezüglich Kopplung mit Klimamodellen besitzt dies den Vorteil, dass diese in der Regel in Klima- und meteorologischen Modellen besser abgebildet werden kann als andere Klimaparameter, wie z.B. Wind oder Globalstrahlung.

Der Modellteil in der Weststeiermark wurde in Ruch et al. (2012) im Zeitraum 2000 – 2009 basierend auf die Stationsdateninterpolation kalibriert. Zur Kalibrierung des Modells wurde und wird – bei der Erweiterung in die Oststeiermark - nach der Strategie gemäß Reszler et al. (2006;

2008) vorgegangen. Diese schlägt die Verwendung von Zusatzinformationen (z.B. Grundwasserstände, Schneedaten) und die Identifizierung der Dominanten Prozesse (vgl. Grayson et al., 2000) sowie die Differenzierung in verschiedene Typen von Ereignissen und hydrologische Situationen vor, um die Modellparameter zu identifizieren.

6.5 Synthese, Interpretation der Ergebnisse und Publikation

Schließlich werden die Ergebnisse der verschiedenen Modellläufe in einer Synthese zusammengefasst und analysiert. Gemäß den Indikatoren aus der Ereignisanalyse in Kap. 6.2 konzentriert sich die Auswertung hier auf statistische Maße des Hochwasserkollektivs, auf die Saisonalität sowie Analysen weiterer Ergebnisse aus dem hydrologischen Modell, wie Bodenfeuchte, Verdunstung, etc..

Das generelle Ziel des Projekts – die Formulierung von Empfehlungen zur Kopplung von Klimamodellen und hydrologischen Modellen – basiert auf dieser Zusammenschau.

Darüber hinaus wird eine EURO-CORDEX konforme regionale Klimamodellierung („business-as-usual“ Treibhausgaskonzentrationsszenario RCP8.5), die Europa in einer Auflösung von 12.5 km umschließt, mit dem Modell CCLM durchgeführt und über das Datenportal der Earth System Grid Federation veröffentlicht.

6.6 Literatur

Blöschl, G., C. Reszler & J. Komma (2008), A spatially distributed flash flood forecasting model. Environmental Modelling & Software, 23, 4; 464-478.

Blöschl, G. & A. Montanari (2009), Climate change impacts—throwing the dice? Hydrological Processes 24, 374–381. DOI: 10.1002/hyp.7574

Blöschl, G., A. Viglione, R. Merz., J. Parajka, J. Salinas & W. Schöner (2011), Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 63, (1-2), 21- 30.

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 http://cosmo-odel.cscs.ch/content/model/documentation/newsLetters/newsLetter06/

Grayson, R.B. & G. Blöschl (Eds) (2000), Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 404 pp.

Merz R. und G. Blöschl (2003), A process typology of regional floods. Water Resources Research, 39 (12), article number 1340.

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, und 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.

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

Maraun, D., F. Wetterhall, A. M. Ireson, R. E. Chandler, E. J. Kendon, M. Widmann, S. Brienen, H. W. Rust, T. Sauter, M. Themessl, V. K. C. Venema, K. P. Chun, C. M. Goodess, R. G. Jones, C.

Onof, M. Vrac, and I. Thiele-Eich (2010), Precipitation Downscaling Under Climate Change: Recent Developments to Bridge the Gap between Dynamical Models and the End User, Rev.Geophys., 48, RG3003, doi: 10.1029/2009RG000314.

Philipp A., C. Beck, R. Huth und 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

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.

Reszler, C., J. Komma, G. Blöschl & D. Gutknecht (2006), Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 50, 5; 220 - 232.

Reszler, C., J. Komma, G. Blöschl & D. Gutknecht (2008), Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 52 (3), 120-131.

Schrödter, H. (1985), Verdunstung – Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. Springer Verlag, 186 p.

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 http://www.ecmwf.int/publications/newsletters/pdf/110_rev.pdf

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.

Switanek, M.B., P.A. Troch, C.L. Castro, A. Leuprecht, H-I. Chang, R. Mukherjee, und E.M.C. Demaria (2016), Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. Hydrol Earth Sys Sci Discuss; doi:10.5194/hess-2016-435.

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.

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

Weisman, M. L., W. C. Skamarock, and J. B. Klemp (1997), The resolution dependence of explicitly modeled convective systems, Mon.Weather Rev., 125(4), 527-548, doi: 10.1175/1520-0493(1997)125<0527:TRDOEM>2.0.CO;2.

7 Arbeits- und Zeitplan

AP	Name/Monat	2014												2015												2016												2017	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	1	2
1	Projektorganisation und -management	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	Hydrometeorologische Datenanalyse	x	x	x	x	x	M2.1	x	x	M2.2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M3.0															
3	Regionale Klimamodellierung	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M3.3	M3.4	x	M3.5			
4	Hydrologische Modellierung			x	x	x	x	x	x	M4.1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	M4.2, M4.3		x	x
5	Synthese, Interpretation und Publikation																		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Meilensteine

M 2.1: Referenzdatensatz der meteorologischen Größen Niederschlag und Lufttemperatur

M 2.2: Beschreibung der dominanten Mechanismen und meteorologischen Kriterien betreffend Hochwasserentstehung in kleinen und mittleren Einzugsgebieten zur Evaluierung der Modellsimulationen

M 3.0: Evaluierung von beobachteten und simulierten Feldern meteorologischer Größen durch Wetterlagentypisierung

M 3.1: Übergabe der unkorrigierten RCM Daten (ERA-Interim angetrieben) an AP4

M 3.2: Ausweisung skalenabhängiger Fehlercharakteristik der RCMs

M 3.3: Neue statistische Bias-Korrekturmethode

M 3.4: Übergabe der bias-korrigierten RCM Daten (ERA-Interim angetrieben) an AP4

M 3.5: Übergabe der unkorrigierten/bias-korrigierten RCM Daten des zukünftigen Modelllaufs an AP4

M 4.1: Definition der Modellschnittstellen (Modellausdehnung Datenübergabe, Formate)

M 4.2: Simulierte Zeitreihen und Hochwasserereignisse in den verschiedenen Teilgebieten für den historischen Zeitraum (“Hindcasts”) und den zukünftigen Zeitraum

M 4.3: Evaluierung der Ergebnisse der hydrologischen Modellierung gemäß den Kriterien in M 2.2

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Jahr	Autoren und Titel	Typ
2014	Truhetz, H., A. Prein, and C. Reszler (2014), Regional climate models – current status and future applications at the Wegener Center, 3rd Vienna Scientific Cluster User Workshop, Feb 24 – 25, Neusiedl am See, Austria.	Workshop-Präsentation
2014	Truhetz, H., K. Görgen, R. Vautard, J. Fernandez, J. Cassano, and 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.	„Bug report“
2015	Switanek, M., H. Truhetz, and C. Reszler (2015), Climate Change Impacts on Flooding in Southeastern Austria; European Geosciences Union General Assembly, 12–17 April 2015, Vienna, Austria. In: Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-9780.	Konferenz-Präsentation (Poster) und Abstract
2015	Reszler, C. (2015), Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf Hochwässer in der Steiermark – Projekt CHC-FloodS. JOANNEUM RESEARCH Zukunftskonferenz, 11.3.2015. Graz.	Konferenz-Präsentation (Vortrag und Poster)
2015	Reszler, C. (2015), CHC-FloodS: Gekoppelte Klima-Hydrologie Modellierung von Hochwässern in der Steiermark. Austrian Climate Research Programme in ESSENCE - Naturgefahren, Klima- und Energiefonds 2015, 24-31.	Publikation in nicht referierter Zeitschrift
2016	Truhetz, H., M. Piazza, A. Csáki, L. Herbsthofer, and A. F. Prein (2016), A Review on Convection Permitting Climate Simulations (CPCS) in the European Alpine Region, 8th NIC-Symposium, Jülich, Germany.	Symposium-Präsentation (Poster)
2016	Reszler, C., H. Truhetz, M. Switanek, und C. Ruch (2016), Gekoppelte Klima-Hydrologie Modellierung von Hochwässern in der Steiermark – das Projekt CHC-FloodS. 17. Österreichischer Klimatag, 6.-8. April 2016. In: Tagungsband zum 17. Klimatag, 32-33.	Konferenz-Präsentation (Vortrag) und Abstract
2016	Reszler, C, Switanek, M. and H. Truhetz (2016), Effect of grid size in RCMs on the representation of floods in small and medium sized catchments in Austria: added value of convection-permitting simulations. European Geosciences Union General Assembly, 17 – 22 April 2016, Vienna, Austria. In: Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-8378.	Konferenz-Präsentation (Vortrag) und Abstract
2016	Switanek, M.B., P.A. Troch, C.L. Castro, A. Leuprecht, H-I. Chang, R. Mukherjee, and E.M.C. Demaria (2016), Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. Hydrol Earth Sys Sci Discuss doi:10.5194/hess-2016-435.	Publikation in wissenschaftlicher Fachzeitschrift (peer-reviewed)

Eine Publikation ist geplant in der referierten Fachzeitschrift “Natural Hazards and Earth System Sciences” (NHESS), herausgegeben durch die European Sciences Union (EGU), mit dem folgenden Arbeitstitel:

“Convection-permitting regional climate simulations for representing floods in small and medium sized catchments in the Eastern Alps”

Die Ergebnisse von CHC-FloodS werden präsentiert mit den zentralen Schlussfolgerungen zu den Verbesserungen durch die konvektionserlaubende Klimasimulation sowie den generellen Empfehlungen zur Überbrückung der Skalen im Zuge der Kopplung von Klima- mit hydrologischen Modellen.

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