

4.4 Großflächige Starkniederschläge im südlichen Mitteleuropa

JUCUNDUS JACOBET, MARKUS HOMANN,
ANDREAS PHILIPP & CHRISTOPH BECK

Großflächige Starkniederschläge im südlichen Mitteleuropa: Basierend auf täglichen Niederschlagsdaten eines Gitternetzes mit 6 km horizontaler Auflösung sind für die meteorologischen Jahreszeiten Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität bestimmt worden und deren Starkniederschlagsereignisse jenseits des 95% Perzentils nach Auftretshäufigkeit und Niederschlagssumme untersucht worden. Im Beobachtungszeitraum 1951-2006 zeigt sich keine einheitliche Entwicklung, es existieren sowohl regionale als auch saisonale Unterschiede; lediglich im Herbst dominiert eine Zunahme regionaler Starkniederschläge. Zukunftsabschätzungen sind auf der Basis atmosphärischer Zirkulationstypen vorgenommen worden, die mittels einer speziellen Clustermethode aus den Variablen Bodendruck auf Meeresniveau, Vertikalwind und relative Feuchte im 700 hPa Niveau sowie den regionalen Niederschlagszeitreihen generiert worden sind. Ihre monatlichen Auftretshäufigkeiten fungieren als Prädiktoren in multiplen Regressionsmodellen für regionale Starkniederschläge. Künftige Prädiktoren sind verschiedenen globalen Klimamodellen (ECHAM6, ECHAM5, EC-EARTH) für verschiedene Szenarien (RCP 4.5, RCP 8.5, A1B) und zwei Projektionsperioden (2021-2050, 2071-2100) entnommen worden. Die deutlichsten Änderungssignale erhält man für den Sommer mit hauptsächlich zunehmenden regionalen Starkniederschlägen im früheren Zeitraum und verbreitet abnehmenden im späteren Zeitraum, zumeist für das Hochemissions-Szenario. Erhebliche Unsicherheiten resultieren aus der Verwendung von Prädiktoren verschiedener globaler Klimamodelle, insbesondere im Winter und Frühjahr.

Extreme areal precipitation in southern Central Europe: Based on gridded daily rainfall data with 6 km horizontal resolution, regions of similar precipitation variability have been derived for the meteorological seasons studying their extreme areal precipitation beyond the 95% percentile in terms of frequency and amount. During the 1951-2006 period there is no uniform development, but regional as well as seasonal differences occur; only during autumn significant increases dominate. Future assessments have been done by means of atmospheric circulation types (CT) derived by a particular clustering technique including large-scale fields of sea-level pressure, vertical wind and relative humidity at the 700 hPa level as well as the regional rainfall time series. Monthly CT frequencies act as predictors in multiple regression models for monthly frequencies and amounts of regional precipitation extremes. Future predictors have been extracted from different global climate models (ECHAM6, ECHAM5, EC-EARTH) for different scenarios (RCP 4.5, RCP 8.5, A1B) and two projection periods (2021-2050, 2071-2100). Most distinctive changes are indicated for the summer season with mainly increasing extremes for the earlier period and widespread decreasing extremes during the later period, mostly for the high-emission scenario. Considerable uncertainties arise from the predictor use of different global climate models, especially during the winter and spring seasons.

Im Rahmen des österreichisch-deutschen Forschungsprojekts WETRAX (*Weather patterns, cyclone tracks, and related precipitation extremes*, siehe HOFSTÄTTER et al. 2015) sind großflächige Starkniederschläge im südlichen Mitteleuropa im Kontext des rezenten und künftigen Klimawandels untersucht worden. Nach einer geeigneten Festlegung von mitteleuropäischen Regionen, auf die sich großflächige Starkniederschläge im Weiteren beziehen (siehe Methoden-Absatz), sind verschiedene Wege ihrer zirkulationsdynamischen Analyse beschritten worden: während von österreichischer Seite der Einfluss von Zyklonen-Zugbahnen unter besonderer Berücksichtigung der bedeutsamen Vb-Zugbahn untersucht worden ist (HOFSTÄTTER et al. 2017), wird im Folgenden auf den Augsburger Ansatz eingegangen, regionale Starkniederschläge in Abhängigkeit von atmosphärischen Zirkulationstypen zu betrachten (JACOBET et al. 2009) und aus deren künftigen Häufigkeitsveränderungen Projektionen großflächiger Starkniederschläge bei fortschreitendem Klimawandel abzuleiten.

Daten

Für Teile des südlichen Mitteleuropas sind von der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) tägliche Niederschlagsdaten auf einem Gitternetz mit 6km horizontaler Auflösung für den Zeitraum 1951-2006 generiert worden, wobei auch Datensätze der nationalen Wetterdienste aus Deutschland und der Tschechischen Republik eingeflossen sind (HOFSTÄTTER et al. 2015). Atmosphärische Variablen (wie *sea-level pressure* SLP, geopotentielle Höhen, Vertikalwind, spezifische und relative Feuchte) zur Bestimmung von Zirkulationstypen sind dem NCEP1 Reanalyse-Datensatz (KALNAY et al. 1996) entnommen worden. Klimamodell-Daten für zwei künftige Projektionsperioden (2021-2050 und 2071-2100) entstammen dem Modell EC-EARTH (HAZELEGER et al. 2012) und der atmosphärischen Komponente ECHAM6 des Modells MPI-ESM (REICK et al. 2012) für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 sowie dem älteren ECHAM5-MPIOM Modell (ROECKNER et al. 2003) für

das A1B Szenario. Die Hamburger Modelldaten umfassen mehrere Realisationen (3 für ECHAM6 und 2 für ECHAM5), lediglich für EC-EARTH war nur ein Modelllauf verfügbar.

Methoden

Als räumlicher Bezug für großflächige Starkniederschläge sind anstelle von Flusseinzugsgebieten klimatische Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität herangezogen worden. Sie lassen sich aus den Gitternetzdaten der täglichen Niederschläge mittels S-modaler Hauptkomponentenanalysen erzeugen (Gitterpunkte als Variablen, Zeiteinheiten als Ereignisfälle), *Abb. 4.4-1* zeigt diese Regionen exemplarisch für die Jahreszeiten Frühjahr (MAM) und Sommer (JJA). Für die gewichteten regionalen Mittelwerte der täglichen Niederschläge (mit den Ladungen jeder regionszugehörigen Gitterbox als entsprechende Gewichte) sind die Starkniederschlagsereignisse über das 95% Perzentil in jeder Jahreszeit festgelegt worden.

Zur Bestimmung atmosphärischer Zirkulationstypen ist auf die COST733 Klassifikations- Software (PHILIPP et al. 2016) unter Verwendung von NCEP1 Reanalyse-Daten zurückgegriffen worden. Um die Performanz einzelner Klassifikationen bezüglich regionaler Starkniederschläge zu evaluieren, sind multiple Regressionsmodelle für monatliche Häufigkeiten und Monatssummen regionaler Starkniederschläge mit den monatlichen Auftrittshäufigkeiten der Zirkulationstypen als Prädiktoren entwickelt worden. Dabei sind für jeden Einzelfall jeweils fünf Regressionsmodelle mit unterschiedlichen Kalibrierungs- und Validie-

rungsperioden erstellt worden, um Instationaritäten in den statistischen Beziehungen zu berücksichtigen. Als geeignetste Klassifikation wurde schließlich die Clustermethode SANDRA (*simulated annealing and diversified randomization*, siehe PHILIPP et al. 2007) mit folgenden Spezifikationen angewendet:

- SLP, Vertikalwind und relative Feuchte (700 hPa Niveau) gehen mit unterschiedlichen Gewichten als großskalige Variablen in die Clusterklassifikation ein.
- Weiterhin werden auch die regionalen Niederschlagszeitreihen miteinbezogen (sog. konditionierte Klassifikation).
- Es wird eine einheitliche Anzahl von jeweils 18 Clustern zugrundegelegt (mittlerer Umfang gemäß den COST733 Standards).

Abb. 4.4-2 zeigt zwei Beispiele resultierender Zirkulationstypen, repräsentiert durch die Zentroide der prozessierten Variablen (mittlere Felder aus allen täglichen Einzelfeldern eines klassifizierten Zirkulationstyps).

Die Abschätzungen künftiger Änderungen regionaler Starkniederschläge basieren schließlich auf den modifizierten Auftrittshäufigkeiten der saisonalen Zirkulationstypen in den Projektionen der berücksichtigten globalen Klimamodelle.

Abb. 4.4-2: Zentroide (siehe Text) der klassifizierten Variablen für zwei ausgewählte Zirkulationstypen (a: Trogmuster im Frühjahr; b: Cut-off low im Sommer), hervorgegangen aus SANDRA Clusteranalysen der Variablen sea-level pressure (SLP, hPa), Vertikalwind (Omega, hPa/h) und relative Feuchte (RF, %) im 700hPa Niveau sowie der täglichen Niederschlagsrate (Ns, mm/d) (verändert nach HOMANN 2017).

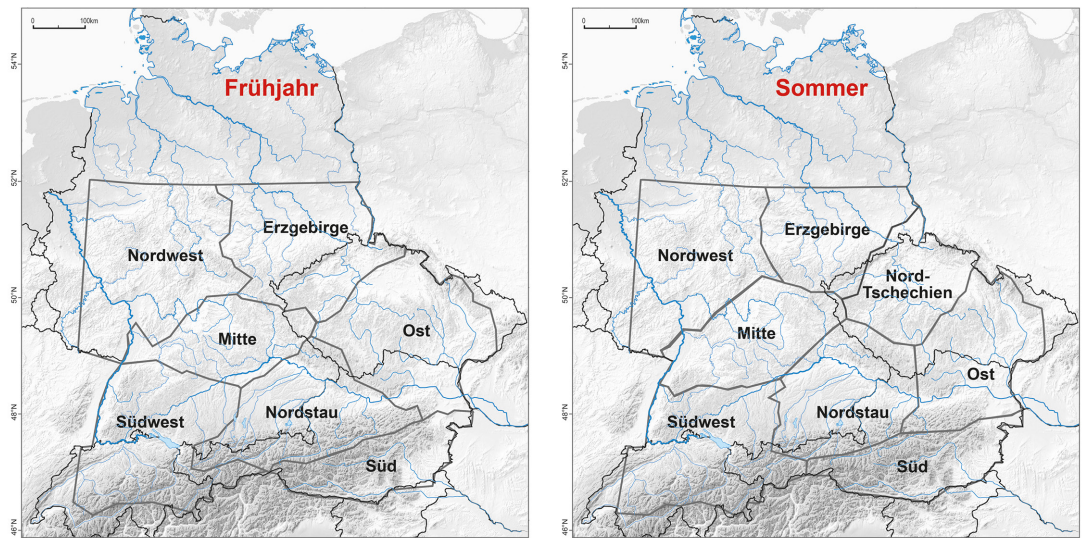
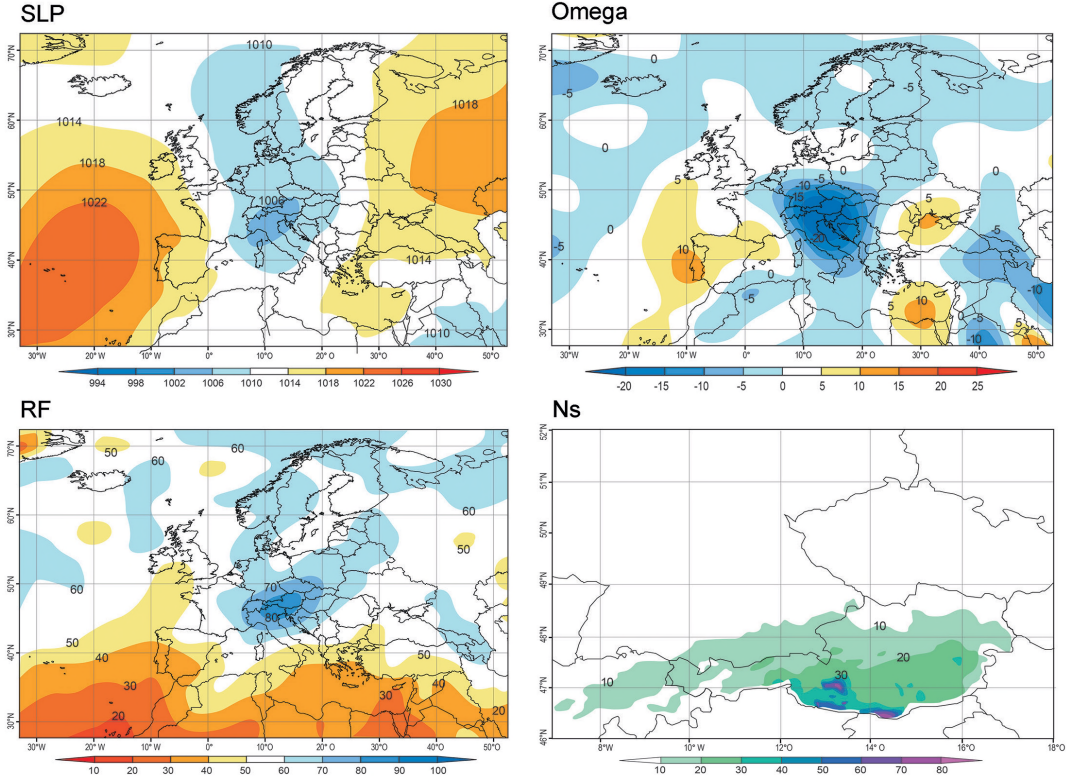
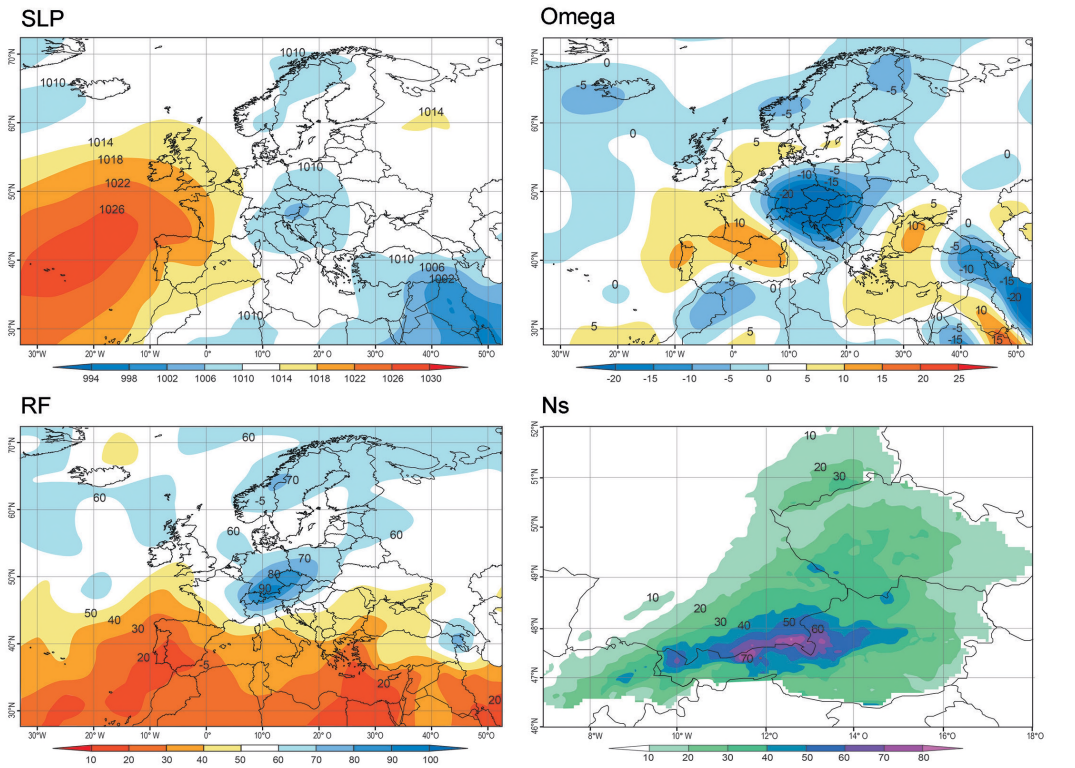


Abb. 4.4-1: Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität, abgeleitet aus S-modalen Hauptkomponentenanalysen der täglichen Gitternetz-Niederschläge für Frühjahr und Sommer 1951-2006 (verändert nach HOMANN 2017).

a) Zirkulationstyp „Trogmuster“, Frühjahr 1951-2006



b) Zirkulationstyp „Cut-off low“, Sommer 1951-2006



Ergebnisse

Die regionalen Starkniederschläge lassen im Beobachtungszeitraum keine einheitliche Entwicklung erkennen (HOMANN 2017), es zeigen sich in verschiedenen Regionen und Jahreszeiten sowohl signifikante Trends beider Vorzeichen als auch nur insignifikante Langzeitänderungen bei Häufigkeit und Starkniederschlagssumme. Lediglich im Herbst dominiert seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine Zunahme regionaler Starkniederschläge. Ausgeprägt ist aber zumeist die (sub-)dekadische Variabilität, die auf den Einfluss der atmosphärischen Zirkulation hinweist.

Unter den saisonalen Zirkulationstypen sind jeweils nur wenige (zwei bis vier pro Niederschlagsregion) bedeutsam für regionale Starkniederschläge (HOMANN 2017). Allgemein umfassen sie Cut-off-low Zellen (aus zyklonalen Trögen abgeschnürte Tiefdruckzellen) hauptsächlich für südliche und östliche Regionen des Untersuchungsgebiets, zonale Strömungsmuster für nördliche und westliche Regionen, meridionale Zirkulationstypen besonders für das südliche Teilgebiet und gemischte Strömungsmuster (meist mit nordwestlicher Anströmung) für den nordalpinen Bereich. Die ausgewählten Beispiele in *Abb. 4.4-2* zeigen ein frühjährliches Trogmuster mit Starkniederschlag südlich des Alpenhauptkamms sowie ein sommerliches Cut-off low mit den höchsten Niederschlagsraten entlang des nördlichen Alpenrandes. Entsprechend positionierte Maxima von Aufstiegsbewegung und relativer Feuchte ergänzen die Charakteristik dieser Zirkulationstypen.

Nur wenige der regional starkniederschlagsrelevanten Zirkulationstypen zeigen signifikante Häufigkeitsänderungen in der Beobachtungsperiode (HOMANN 2017). In den künftigen Projektionsperioden zeichnet sich generell eine Zunahme zonaler Strömungsmuster im Winter sowie ähnliche oder abnehmende Häufigkeiten starkniederschlagsrelevanter Zirkulationstypen

im Sommer ab. Allerdings treten für einzelne Typen auch Abweichungen zwischen den hier verwendeten globalen Klimamodellen auf.

Abb. 4.4-3 zeigt die künftigen Häufigkeitsänderungen regionaler Starkniederschläge für die ausgewählten Jahreszeiten Frühjahr und Sommer auf der Grundlage von ECHAM6-Prädiktoren in den multiplen Regressionsmodellen, die aus den monatlichen Zirkulationstyp-Häufigkeiten regionale Starkniederschläge nach Auftrittshäufigkeit und Niederschlagssumme (hier nicht gezeigt) abschätzen. Im Frühjahr ergeben sich signifikante Zunahmen (95% Niveau) um etwa 10% nur in den nördlichen Regionen des Untersuchungsgebiets (nordwestlicher Teil und Erzgebirgs-Region), beschränkt auf das Hochemissions-Szenario (RCP 8.5) im späteren Zeitraum (2071-2100). Im Sommer zeigt sich ein ausgeprägter Kontrast zwischen den beiden Projektionsperioden: Während in der früheren (2021-2050) hauptsächlich Zunahmen für das Hochemissions-Szenario festzustellen sind (in fünf der acht Regionen signifikant), erkennt man im späteren Zeitraum (2071-2100) generell signifikante Abnahmen für RCP 8.5. Dieser Kontrast dürfte zurückzuführen sein auf die Überlagerung steigender Wasserdampfkonzentration in einer erwärmten Atmosphäre mit einem wachsenden antizyklonalen Einfluss während des Sommers (vgl. RIEDIGER & GRATZKI 2014). Der erstgenannte Faktor scheint bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu dominieren und führt so zu häufigeren Starkniederschlägen, während der zweite Faktor mit weiterer Verstärkung des Klimawandels die Oberhand gewinnen könnte und nun zu weniger häufigen regionalen Starkniederschlägen im Sommer gegen Ende des 21. Jahrhunderts führt (JACOBET et al. 2017).

Im Herbst zeigen sich keine signifikanten Änderungen regionaler Starkniederschläge, jedoch sind im Winter wieder einige Regionen davon betroffen. Allerdings werden diese Änderungssignale nicht für Prädik-

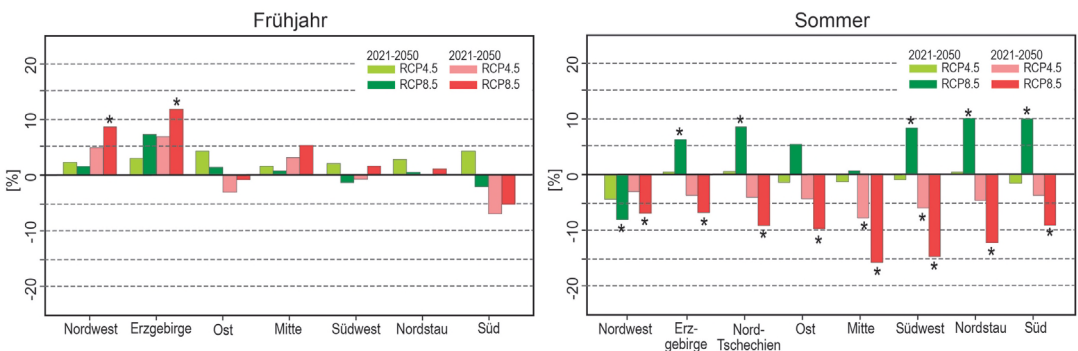


Abb. 4.4-3: Häufigkeitsänderungen (%) regionaler Starkniederschläge (>95% Perzentil) im Frühjahr und Sommer auf der Grundlage von ECHAM6 Prädiktoren: mittlere Ensemble-Änderungen für zwei Projektionsperioden (2021-2050, 2071-2100) und zwei Szenarien (RCP 4.5 und RCP 8.5) im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000. Signifikante Änderungen (95% Niveau) sind markiert mit * (verändert nach HOMANN 2017).

toren von allen verwendeten globalen Klimamodellen reproduziert (gleichermaßen auch im Frühjahr) und erscheinen damit nicht als hinreichend robust. Nur im Sommer kann ein höherer Grad an Übereinstimmung erzielt werden (Abb. 4.4-4): die signifikant zunehmenden Starkniederschläge für den Zeitraum 2021-2050 werden zumeist bestätigt zumindest mit Prädiktoren von ECHAM5 (nicht dagegen von EC-EARTH), die signifikant abnehmenden Starkniederschläge für den Zeitraum 2071-2100 werden in sieben Regionen mit ECHAM5-Prädiktoren und in drei Regionen mit EC-EARTH-Prädiktoren reproduziert. Somit verdichtet sich der Befund einer gegensätzlichen Entwicklung regionaler Starkniederschläge im südlichen Mitteleuropa zwischen Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts.

Schlussfolgerungen

Im IPCC Spezial-Report zu Extremereignissen sind für Zentraleuropa saisonal unterschiedliche Aussagen zu künftigen Starkniederschlägen formuliert worden (wahrscheinliche Zunahmen im Winter, inkonsistente Befunde im Sommer, siehe SENEVIRATNE et al. 2012, S. 198). Im Rahmen des WETRAX-Projektes sind auf der Grundlage monatlicher Häufigkeiten von großskaligen Zirkulationstypen regressionsanalytische Häufigkeitsabschätzungen großflächiger Starkniederschläge für zwei zukünftige Zeiträume (2021-2050 und 2071-2100) durchgeführt worden. Die deutlichsten Änderungen haben sich für den Sommer und das Hochemissions-Szenario RCP 8.5 ergeben: Zunahmen regionaler

Starkniederschläge im früheren Zeitraum und noch verbreitete Abnahmen im späteren Zeitraum. Letzteres wird durch eine unabhängige Analyse der Änderungen von Zyklonenzugbahnen mit sogar noch höheren Prozentwerten abnehmender regionaler Starkniederschläge bestätigt (HOFSTÄTTER et al. 2015). Dies deutet auf ein verstärktes antizyklonales Regime in der Zukunft während des Sommers hin (JACOBET et al. 2017), das auch im Zusammenhang mit generell abnehmenden Sommerniederschlägen in Mitteleuropa (RAJZAK & SCHÄR 2017) gesehen werden kann. Es muss allerdings betont werden, dass sich die projizierte Abnahme sommerlicher Starkniederschläge auf großflächige Regionen wie in Abb. 4.4-1 bezieht, nicht erfasst sind dagegen kleinräumigere konvektive Niederschlagsereignisse, die sich aufgrund eines erhöhten atmosphärischen Wasserdampfgehalts gleichzeitig intensivieren können, wie es in Simulationen mit hochauflösenden regionalen Klimamodellen in Erscheinung tritt (RAJZAK & SCHÄR 2017).

Zu berücksichtigen bleiben weitere Unsicherheitsfaktoren bei Zukunftsabschätzungen: so kann die Spannweite der Projektionen bei zusätzlichem Einbezug weiterer Klimamodelle sogar noch anwachsen. Auch können sich interne dynamische und thermodynamische Charakteristika von Zirkulationstypen im Zuge von Klimawandel und Klimavariabilität ändern (BECK et al. 2007), und generell sind adäquate Techniken erforderlich, um Instationaritäten in den Beziehungen zwischen Prädiktoren und Prädiktanden explizit zu be-

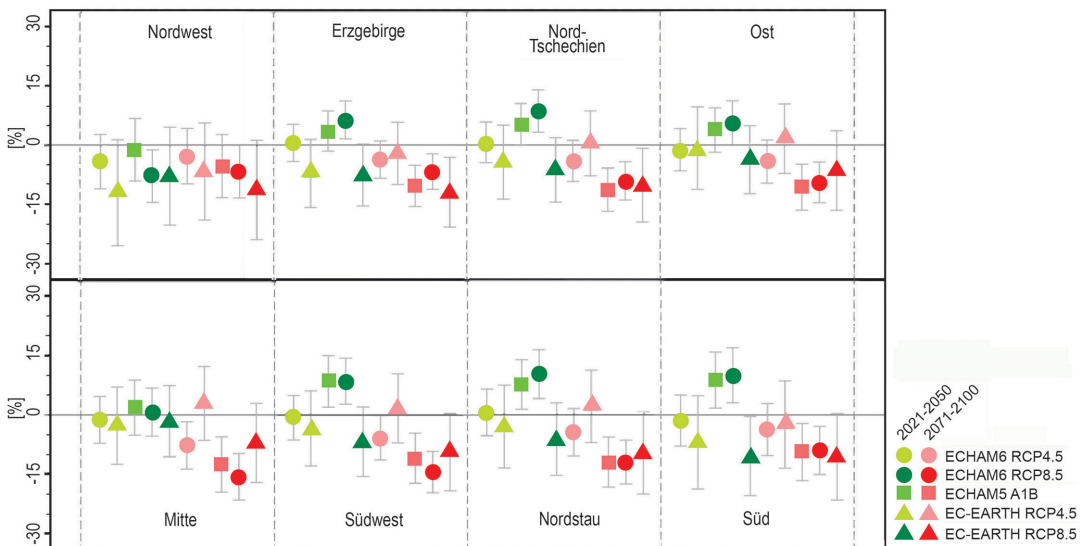


Abb. 4.4-4: Häufigkeitsänderungen (%) regionaler Starkniederschläge (>95% Perzentil) im Sommer für verschiedene Modell-Prädiktoren: ECHAM6 und EC-EARTH (RCP4.5/8.5 Szenarien) sowie ECHAM5 (A1B Szenario). Die mittleren Häufigkeitsänderungen für 2021-2050 (grün) und 2071-2100 (rot) im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 werden zusammen mit ihren 95% Konfidenzintervallen (Signifikanz bei Ausschluss der Null) dargestellt (verändert nach HOMANN 2017).

rücksichtigen (HERTIG & JACOBET 2013). Gerade bei der Zukunftsabschätzung von Extremereignissen sind methodische Weiterentwicklungen unabdingbar.

Literatur

- BECK, C., J. JACOBET & P. D. JONES (2007): Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in Central Europe since 1780. *Int. J. Climatol.*, 27, 473-491.
- HAZELEGER, W., X. WANG, C. SEVERIJNS et al. (2012): EC-Earth V2.2: description and validation of a new seamless Earth system prediction model. *Clim. Dyn.*, 39, 2611-2629.
- HERTIG, E. & J. JACOBET (2013): A novel approach to statistical downscaling considering non-stationarities: application to daily precipitation in the Mediterranean area. *J. Geophys. Res. – Atmospheres*, 118, 520-533.
- HOMANN, M. (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf atmosphärische Zirkulationstypen im südlichen Mitteleuropa. Dissertation Universität Augsburg, 153 S.
- HOFSTÄTTER, M., J. JACOBET, M. HOMANN, A. LEXER, B. CHIMANI, A. PHILIPP, C. BECK & M. GANEKIND (2015): WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. *Geographica Augustana*, 19, 239 S.
- HOFSTÄTTER, M., LEXER, A., HOMANN, M. & G. BLÖSCHL (2017): Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.5386.
- JACOBET, J., J. RATHMANN, A. PHILIPP & P. D. JONES (2009): Central European precipitation and temperature extremes in relation to large-scale atmospheric circulation types. *Met. Zeitschrift*, 18, 397-410.
- JACOBET, J., M. HOMANN, A. PHILIPP & C. BECK (2017): Atmospheric circulation types and extreme areal precipitation in southern central Europe. *Advances in Science and Research*, 14, 71-75.
- KALNAY, E., M. KANAMITSU, R. KISTLER et al. (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- PHILIPP, A., P. M. DELA-MARTA, J. JACOBET, D. R., FEREDAY, P. D. JONES, A. MÖBERG & H. WANNER (2007): Long term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*, 20, 4065-4095.
- PHILIPP, A., C. BECK, R. HUTH & J. JACOBET (2016): Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *Int. J. Climatol.*, 36, 2673-2691.
- RAJCZAK, J. & C. SCHÄR (2017): Projections of future precipitation extremes over Europe: a multimodel assessment of climate simulations. *J. Geophys. Res. – Atmospheres*, DOI: 10.1002/2017JD027176.
- REICK, C., M. GIORGETTA, J. JUNGCLAUS et al. (2012): CMIP5 Simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) Based on the MPI-ESM-LR Model: The esmrcp85 Experiment. World Data Cent. for Clim, DKRZ, doi:10.1594/WDCC/CMIP5.MXELe8.
- RIEDIGER, U. & A. GRATZKI (2014): Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. *Met. Zeitschrift*, 23, 231-252.
- ROECKNER, E., G. BÄUML, L. BONAVENTURA et al. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5 - Part I: Model description. Tech. Rep. 349, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- SENEVIRATNE, S. I., N. NICHOLLS, D. EASTERLING et al. (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Field, C.B. et al. (Hrsg.): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC.* Cambridge University Press, 109-230.

Danksagung: Das WETRAX-Projekt wurde gefördert vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Österreich), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland) sowie vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz/Landesamt für Umwelt (Bayern).

Kontakt:

Prof. Dr. Juncudus Jacobeit
 Dr. Markus Homann
 PD Dr. Andreas Philipp
 PD Dr. Christoph Beck
 Institut für Geographie - Universität Augsburg
 Jacobeit@geo.uni-augsburg.de

Jacobeit, J., M. Homann, A. Philipp & Chr. Beck (2018): Großflächige Starkniederschläge im südlichen Mitteleuropa. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Extremereignisse.* pp. 175-180. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. DOI: 10.25592/warnsignal.klima.extremereignisse.25.