

Gerd Bürger, Angela Pfister & Axel Bronstert

Zunehmende Starkregenintensitäten als Folge der Klimaerwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion

Increasing intensity of heavy rainfall caused by global warming: data analysis and future projections

Extreme Regenereignisse von kurzer Dauer im Bereich von Stunden und darunter rücken aufgrund der dadurch bedingten Schäden durch Sturzfluten und auch wegen ihrer möglichen Intensivierungen durch den anthropogenen Klimawandel immer stärker in den Fokus. Die vorliegende Studie untersucht auf Basis von teilweise sehr langen (> 50 Jahre) und zeitlich hochaufgelösten Zeitreihen (≤ 15 Minuten) mögliche Trends in Starkregenintensitäten für Stationen aus schweizerischen und österreichischen Alpenregionen sowie für das Emscher-Lippe-Gebiet in Nordrhein-Westfalen. Es wird deutlich, dass es eine Zunahme der extremen Niederschlagsintensitäten gibt, welche gut durch die Erwärmung des regionalen Klimas erklärt werden kann: Die Analysen langfristiger Trends der Überschreitungssummen und Wiederkehrniveaus zeigen zwar erhebliche Unsicherheiten, lassen jedoch eine Zunahme in einer Größenordnung von 30 % pro Jahrhundert erkennen. Zudem wird in diesem Beitrag, basierend auf einer "mittleren" Klimasimulation für das 21. Jahrhundert, für ausgewählte Stationen der Emscher-Lippe-Region eine Projektion für extreme Niederschlagsintensitäten in sehr hoher zeitlicher Auflösung beschrieben. Dabei wird ein gekoppeltes räumliches und zeitliches "Downscaling" angewendet, dessen entscheidende Neuerung die Berücksichtigung der Abhängigkeit der lokalen Regenintensität von der Lufttemperatur ist. Dieses Verfahren beinhaltet zwei Schritte: Zuerst werden großräumige Klimafelder in täglicher Auflösung durch Regression mit den Temperatur- und Niederschlagswerten der Stationen statistisch verbunden (räumliches Downscaling). Im zweiten Schritt werden dann diese Stationswerte mithilfe eines sogenannten multiplikativen stochastischen Kaskadenmodells (MC) auf eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten disaggregiert (zeitliches Downscaling). Die neuartige, temperatursensitive Variante berücksichtigt zusätzlich die Lufttemperatur als erklärende Variable für die Niederschlagsintensitäten. Dadurch wird der mit einer Erwärmung zu erwartende höhere atmosphärische Feuchtegehalt, welcher sich aus der Clausius-Clapeyron-Beziehung (CC) ergibt, mit in das zeitliche Downscaling einbezogen.

Für die statistische Auswertung der extremen kurzfristigen Niederschläge wurden die oberen Quantile (99,9 %), Überschreitungssummen (ÜS , $P > 5$ mm) und 3-jährliche Wiederkehrniveaus (WN) einer Dauerstufe von ≤ 15 -Minuten betrachtet. Diese Auswahl erlaubt die gleichzeitige Analyse sowohl von Extremwertstatistiken als auch von deren langfristigen Trends; leichte Abweichungen von dieser Wahl beeinflussen die Hauptergebnisse nur unwesentlich. Nur durch die Hinzunahme der Temperatur wird die beobachtete Temperaturabhängigkeit der extremen Quantile (CC-Scaling) gut wiedergegeben. Bei Vergleich von Beobachtungsdaten und Gegenwartssimulationen der Modellkaskade zeigt das temperatursensitive Verfahren konsistente Ergebnisse. Im Vergleich zu den Entwicklungen der letzten Jahrzehnte werden für die Zukunft ähnliche oder sogar noch stärkere Anstiege der extremen Niederschlagsintensitäten projiziert. Dies ist insofern bemerkenswert, als diese anscheinend hauptsächlich durch die örtliche Temperatur bestimmt werden, denn die projizierten Trends der Niederschlags-Tageswerte sind für diese Region vernachlässigbar.

Schlagwörter: Starkregen, kurzfristige Dauerstufe, Klimawandel, Clausius-Clapeyron-Gleichung, Niederschlagsintensitäten, Multiplikatives Kaskadenmodell

Extreme rainfall events of short duration in the range of hours and below are increasingly coming into focus due to the resulting damage from flash floods and also due to their possible intensification by anthropogenic climate change. The current study investigates possible trends in heavy rainfall intensities for stations from Swiss and Austrian alpine regions as well as for the Emscher-Lippe area in North Rhine-Westphalia on the basis of partly very long (> 50 years) and temporally highly resolved time series (≤ 15 minutes). It becomes clear that there is an increase in extreme rainfall intensities, which can be well explained by the warming of the regional climate: the analyses of long-term trends in exceedance counts and return levels show considerable uncertainties, but are in the order of 30 % increase per century. In addition, based on an "average" climate simulation for the 21st century, this paper describes a projection for extreme precipitation intensities at very high temporal resolution for a number of stations in the Emscher-Lippe region. A coupled spatial and temporal "downscaling" is applied, the key innovation of which is the consideration of the dependence of local rainfall intensity on air temperature. This procedure involves two steps: First, large-scale climate fields at daily resolution are statistically linked by regression to station temperature and precipitation values (spatial downscaling). In the second step, these station values are disaggregated to a temporal resolution of 10 minutes using a so-called multiplicative stochastic cascade model (MC) (temporal downscaling). The novel, temperature-sensitive variant additionally considers air temperature as an explanatory variable for precipitation intensities. Thus, the higher atmospheric moisture content expected with warming, which results from the Clausius-Clapeyron (CC) relationship, is included in the temporal downscaling.

For the statistical evaluation of the extreme short-term precipitation, the upper quantiles (99.9 %), exceedance counts ($P > 5$ mm), and 3-yr return levels of the ≤ 15 -min duration step has been used. Only by adding temperature is the observed temperature observed of the extreme quantiles ("CC scaling") well reproduced. When comparing observed data and present-day simulations of the model cascade, the temperature-sensitive procedure shows consistent results. Compared to trends in recent decades, similar or even larger increases in extreme intensities are projected for the future. This is remarkable in that these appear to be driven primarily by local temperature, as the projected trends in daily precipitation values are negligible for this region.

Keywords: heavy rainfall, short duration, global warming, Clausius-Clapeyron equation, precipitation intensity, multiplicative cascade model

1 Einleitung

Extreme Regenintensitäten bei Ereignisdauern von Stunden oder noch kürzer können eine erhebliche Gefährdung für unterschiedliche Systeme der natürlichen und anthropogen beeinflussten Umwelt darstellen, wie etwa Ackerflächen, aquatische Ökosysteme (Flüsse und Seen), Siedlungsgebiete oder die städtische Infrastruktur (LAWA, 2018; FUCHS et al., 2016). So führen in urbanen Gebieten überlastete Kanalisationssysteme zur Überflutung u. a. von Verkehrsflächen sowie Gewerbegebieten und dadurch verursachte Spülstöße oder Schadstoffhavarien zu erheblichen ökologischen Gefahren, da sie im Notfall direkt in Flüsse oder Seen abgeleitet werden müssen (ASCE, 1992; GRÜNING & PECHER, 2020). Bei Ackerland kann die angebaute Frucht bzw. die Ernte direkt durch die hohe kinetische Energie des Regens zerstört werden, und zudem kommt es dann oft zu einer starken Bodenerosion. Die materiellen Verluste können in der Größenordnung der jährlichen Gesamternte liegen (SALLES et al., 2000). Die Erosion der humosen Oberböden reduziert die Fruchtbarkeit der betroffenen Flächen und führt zu erheblicher Eutrophierung in den Gewässerökosystemen, denen diese Sedimentfracht zuströmt (WOOD et al., 2005). In hügeligen oder bergigen Einzugsgebieten kann sich sowohl in ländlichen als auch in urbanen Bereichen innerhalb von wenigen Minuten viel Oberflächenwasser ansammeln, wodurch Sturzfluten verursacht werden können (LANUV, 2016; KELLER et al., 2018). Diese bedingen oft die Mobilisierung und den Transport erheblicher Sediment- und Geschiebefrachten, u. a. die Entwurzelung und Verlagerung von Bäumen und/oder die Entstehung von Muren. Solche Ereignisse können katastrophale Auswirkungen haben, i. d. R. ohne die Möglichkeit einer frühzeitigen Warnung, und entsprechende menschliche und materielle Verluste verursachen (BRONSTERT et al., 2017 und 2018).

Für die Analyse und Prognose von Sturzfluten ist auf eine für die Prozesse adäquate Zeit- und Raumskala zu achten. Die adäquate Raumskala ist hier für Planungs- und Managementfragen die Mesoskala, worunter Gebietsgrößen bis etwa 1.000 km² zu verstehen sind (BECKER, 1992). Die eigentliche Prozessskala, also die Flächengröße, in der die Extremniederschläge und nachfolgende Abflussbildungsprozesse stattfinden, ist die untere Mesoskala, d. h. zwischen ca. 10 und 100 km². Prozessanalysen sollten dabei in einer räumlichen Auflösung von etwa 1 km² (Niederschlag) und, sofern die Grunddaten in entsprechender Genauigkeit vorliegen, von etwa 1 ha (Abflussbildung) erfolgen. Die relevante Zeitskala liegt zwischen etwa einer Stunde und ca. 1 Tag, bei einer mindestens stündlichen bis ca. 5-minütlichen zeitlichen Auflösung.

Die Auftretenswahrscheinlichkeiten von solchen lokalen und extremen Starkregenereignissen lassen sich statistisch nur mit deutlicher Unsicherheit quantifizieren. Grundsätzlich gilt, dass je stärker und damit seltener ein Ereignis ist, desto weniger zuverlässig sich die Art und Intensität des Ereignisses statistisch einordnen lässt. Hinzu kommt, dass regional innerhalb Deutschlands große Unterschiede der Messnetzdichte und Aufzeichnungsdauer vorliegen (BECKER, 2019), was auch zu regionalen Unterschieden der statistischen Unsicherheit führt.

Extreme Regenereignisse von kurzer Dauer, die im Bereich von wenigen Stunden und unter einer Stunde stattfinden, rückten in den letzten Jahren aufgrund der dadurch bedingten Schäden

durch Sturzfluten sowohl in ländlichen als auch in urbanen Räumen immer stärker in den Fokus (UBA, 2019). Dabei wird auch die Frage einer möglichen Intensivierung der Starkregenintensitäten durch die anthropogen bedingte Erwärmung gestellt (BRASSEUR et al., 2016). Das Zahlenwerk des Gesamtverbandes Deutscher Versicherer (GDV) spiegelt eindrücklich die klaren Größenordnungen wider. Zum Beispiel wurden in den Jahren von 2002 bis 2017 durch Starkregen bundesweit Schäden von insgesamt 6,7 Mrd. € verursacht.

Der Zusammenhang zwischen extremen lokalen Niederschlägen und der örtlichen Lufttemperatur ist statistisch signifikant und gut untermauert. Aus langjährigen Beobachtungsreihen in Westeuropa (LENDERINK & VAN MEIJGAARD, 2008), Deutschland (MUELLER & PFISTER, 2011; BÜRGER et al., 2014) und darüber hinaus in Kanada (PANTHOU et al., 2014), den USA (MISHRA et al., 2012) und Australien (HARDWICK JONES et al., 2010) ergab sich, dass extreme Regenintensitäten in stündlicher oder höherer Auflösung um mindestens 7 % pro 1 K Erwärmung ansteigen. Ein Anstieg von 7 % pro 1 K entspricht genau der Clausius-Clapeyron-Beziehung (CC) für die Zunahme des (gesättigten) atmosphärischen Wasserdampfes mit steigender Temperatur, weshalb ein entsprechendes Verhalten im Englischen als "CC Scaling" bezeichnet wird. Unter der durch einige Indizien gestützten Annahme, dass die globale Erwärmung nicht zu einem Anstieg der relativen Feuchte führt (TRENBERTH et al., 2003), ergibt sich aus dem CC-Scaling eine erste, rein heuristische Abschätzung für die künftige Statistik der extremen Niederschlagsintensitäten (LENDERINK & ATTEMA, 2015).

Die hier präsentierte Studie zielt daher auf eine Zeitreihenanalyse von langen und trotzdem zeitlich hochaufgelösten Niederschlagsdaten, um etwaige Trends der extremen Regenintensitäten quantifizieren zu können. Zudem wird eine Methode präsentiert, mit der sich der Zusammenhang zwischen der örtlichen Tagestemperatur und einer extremen lokalen Niederschlagsintensität zeigt, und mit der sich zudem Projektionen der künftigen extremen Regenintensitäten unter einem weiter erwärmten Klima ableiten lassen. Um Auswirkungen des Klimawandels auf die Stärke und Häufigkeit von solchen Starkregen- und zugehörigen Sturzflutereignissen zu beurteilen (DWA, 2012), werden Projektionen des Niederschlags (P) für kurze Dauerstufen bzw. Zeitabschnitte (bis deutlich unter einer Stunde) benötigt. Derartig zeitlich hochaufgelöste Projektionen sind von den derzeit existierenden dynamischen Klimamodellen nicht mit hinreichender Zuverlässigkeit und zeitlich-räumlicher Auflösung zu erhalten.

Durch die Beschränkung auf die zu erwartenden Intensitäten pro Ereignis vereinfacht sich die Analyse erheblich, allerdings auf Kosten der Gesamtverteilung des Niederschlags, welche auch Internittenzen und dementsprechend die Wahrscheinlichkeit von Dürren umfasst und hierdurch nicht abgedeckt wird. Die Erfahrung der vergangenen drei Jahre (2018 bis 2020) führte drastisch den Wechsel zwischen den Extremen vor Augen, wobei sich langandauernde Trockenheitsphasen und großräumige Dürren auch in Europa lokal mit extremen Starkregenereignissen abwechselten (PATON et al., 2021).

Zwischen einer einfachen Korrelation zwischen Tagestemperatur und extremen Regenintensitäten (Approximation "nullter Ordnung") und einer momentan noch nicht realisierbaren vollen, dynamischen, hochaufgelösten Simulation der konvektiven

Niederschlagsentstehung nehmen eine Reihe geeigneter Vereinfachungen eine Mittelstellung ein. So benutzen WESTRA et al. (2013) zur Abschätzung zukünftiger Niederschlagsextreme das statistische "resampling" von historischen Analogien; dies geschieht in Abhängigkeit von großräumigen atmosphärischen Zuständen, u. a. auch der Temperatur. Mithilfe eines weiteren Statistikwerkzeugs, nämlich der "Copula-Methode", verbinden SO et al. (2017) die Häufigkeit der Extreme von Dauerstufen unterhalb eines Tages ($< 1d$) mit denen der 1d-Dauerstufe, und wenden dies auf die 1d-Dauerstufen für Ostasien an. Die Autoren WASKO & SHARMA (2017) implementieren eine Temperaturabhängigkeit für Wettergeneratoren und wenden es auf das erwärmte Klima an.

Die Hauptziele der dargestellten Arbeit sind:

1. Die Analyse von Niederschlagszeitreihen langer Dauer (> 50 Jahre) und zeitlich hoher Auflösung ($\Delta t \leq 15$ Minuten) zur Erkennung möglicher Trends in Starkregenintensitäten in den letzten Jahrzehnten. Geeignete Zeitreihen dafür liegen für Stationen in der Schweiz, in einer österreichischen Alpenregion und für das Emscher-Lippe-Gebiet in Nordrhein-Westfalen vor.
2. Die Ableitung eines Verfahrens, mit dem der Einfluss der Lufttemperatur auf extreme Niederschlagsintensitäten darstellbar ist. Damit können im Erfolgsfall lokale Zeitreihen der Niederschlagsintensität unter der Bedingung einer weiteren Klimaerwärmung erzeugt werden. Diese sollen hochaufgelöst und realistisch genug sein, um etwa hydrologische Modelle anzutreiben, mit denen Überflutungsszenarien von städtischer Infrastruktur und landwirtschaftlichen Flächen oder mögliche Spülstöße aus urbaner Entwässerung und den damit einhergehenden Problemen für See- und Flussökosysteme simuliert werden können.

2 Methodik

2.1 Trendanalyse zeitlich hochaufgelöster Datenreihen

Für die statistische Auswertung der extremen kurzfristigen Niederschläge wurden obere Quantile (99,9 %), Überschreitungssummen ($\sum S, P > 5\text{mm}$) und 3-jährliche Wiederkehrniveaus (WN) der ≤ 15 -Minuten-Dauerstufe betrachtet. Analysiert wurden Datenreihen aus Österreich, der Schweiz und Deutschland. Zusätzliche lokale Temperaturtrends dienen als Anhaltspunkt für die Änderungen der Starkregenintensitäten, wie sie sich allein aus der Zunahme des Wasserdampfgehalts der Luft mit steigender Temperatur (CC-Scaling) ergeben würden.

Bei den gezeigten Trends ist Folgendes zu beachten: Deren Berechnung erfolgt auf Basis sämtlicher Daten, was einen Vergleich mit früheren Analysen ermöglicht (MUELLER & PFISTER, 2011); das CC-Scaling bezieht sich demgegenüber auf zu erwartende Änderungen der Intensitäten pro Ereignis, weshalb trockene Phasen ausdrücklich ausgeblendet werden.

2.2 Statistische Verknüpfung der Lufttemperatur mit lokalen und zeitlich hochaufgelösten extremen Regenintensitäten

Diese Analyse erfolgte exemplarisch mit den Daten aus Deutschland (Emscher-Lippe-Region). Das Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten mit dem Ziel, beobachtete und simu-

lierte großräumige atmosphärische Felder in täglicher Auflösung räumlich und zeitlich zu regionalisieren, d. h. auf Stationsbasis in 10-minütlicher Auflösung. Als Resultat erhält man ein "Klimaszenario" für die Jahre 1961 bis 1990 und ein "Zukunfts-klima" für 2010 bis 2069.

2.2.1 Räumliches Downscaling: Statistische Verknüpfung großräumiger Klimafelder mit den Tageswerten der Temperatur- und Niederschlagswerten der Stationen

Das "Expanded Downscaling" (XDS) ist eine regressionsbasierte Methode, lokale Wetterereignisse realistisch und zudem so konsistent wie möglich mit der atmosphärischen Zirkulation zu simulieren. Da aber bei der klassischen Regression wegen der absoluten Fehlerminimierung ein Teil der Variabilität verloren geht, enthält das XDS die Nebenbedingung zur Erhaltung der lokalen Kovariabilität. Das XDS bildet als lineares Modell einen Vektor aus großräumigen atmosphärischen Variablen (aus Beobachtungen, Reanalysen oder Simulationen) auf einen Vektor aus lokalen Variablen ab (BÜRGER et al., 2019).

2.2.2 Zeitliches Downscaling: Zeitliche Disaggregation der Stationswerte

Das originale Modell der multiplikativen Zufallskaskaden "multiplicative random cascade" (MC) von OLSSON (1998) disaggregiert Niederschläge einer täglichen (oder längeren) Dauerstufe auf kürzere, etwa stündliche oder minütliche Dauerstufen. Dies geschieht kaskadenartig, wobei ein Ereignis aus einer längeren Stufe stochastisch aufgeteilt wird in kürzere Ereignisse. Dabei bestimmen wenige Parameter, welche an beobachteten Langzeitreihen mit kurzen Zeitschritten kalibriert werden, diese Aufteilung.

Die Parameter dieses Verfahrens sind allerdings nicht sensitiv zur Temperatur (T). Das führt u. a. dazu, dass MC-disaggregierte Werte nur dann temperatursensitiv sind, wenn die ursprüngliche längere Dauerstufe dies ebenfalls ist. Temperatureffekte, die sich unterhalb dieser Dauerstufe abzeichnen, werden nicht erfasst. Um dies zu ändern, wurde die MC-Parametrisierung temperaturabhängig gemacht, und zwar durch eine simple T-Klassifizierung der Kalibrierungsdaten. Das Resultat ist das Multiplikative Kaskadenmodell MC^+ , wofür als Input außer dem Niederschlag der Dauerstufe auch die Temperatur derselben dient. Das Modell MC und daher auch MC^+ werden an Mittelwerten und nicht an (seltenen) Extremwerten kalibriert. Damit abgeleitete Extremwerte besitzen meist einen Bias, weshalb für beide Varianten (MC und MC^+) der Bias multiplikativ ausgeglichen wird (BÜRGER et al., 2019).

3 Datengrundlage

3.1 Atmosphärische Felder

Als atmosphärische Prädiktorfelder dienen großräumige, atlantisch-europäische tägliche Gitterwerte des Gesamtniederschlags sowie Temperatur, spezifische Feuchte und Wind aus den höheren Schichten der Troposphäre (700 hPa und 850 hPa). Diese werden auf wenige dominante räumliche Variabilitätsmuster projiziert – spezifisch: empirische Orthogonalfunktionen als Eigenvektoren der Kovarianzmatrix (EOFs) – und aneinandergelagert, sodass eine tägliche, multivariate Vektorzeitreihe als Prädiktor entsteht (STORCH & ZWIERS, 2002). Für Kalibrierung und Validierung dienen die Reanalysen "ERA interim" des europäischen Zentrums ECMWF (EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS, 2009) für die Jahre von

1981 bis 1996 und von 1997 bis 2010. In der vorliegenden Studie werden diese Felder und alle daraus simulierten lokalen Reihen als "ANA" bezeichnet. Simulierte Klimafelder stammen vom "Earth-System-Model of Medium Resolution" des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI-ESM-MR) (GIORGETTA et al., 2012), welches historische (20. Jahrhundert, bezeichnet als "CUR") und zukünftige Klimabedingungen (21. Jahrhundert, RCP4.5-basiert, bezeichnet als "FUT" (VAN VUUREN et al., 2011)) generiert. Zum Input für XDS werden alle Felder auf dasselbe Gitter in dem Rechteck zwischen [11W, 22N] und [40E, 62N] interpoliert, welches in etwa Nordafrika, das Mittelmeergebiet und Europa, mit Ausnahme Nordskandiaviens und Nordrusslands, umfasst.

3.2 Langjährige Niederschlagsdaten

Tabelle 1 zeigt die Zahl und Art der verwendeten Stationsdaten. Für die langjährigen Trends wurden zunächst pro Station – sofern hinreichend Daten vorhanden waren – die beiden jährlichen Extremwertstatistiken für die Überschreitungssummen (ÜS) und Wiederkehrniveaus (WN) berechnet und diese dann über alle Stationen gemittelt. Die zeitliche Auflösung der Niederschlagsdaten betrug für Deutschland und die Schweiz 10 Minuten bzw. für Österreich 15 Minuten; Temperaturwerte waren durchweg auf Tagesbasis. Wegen der für das CC-Scaling relevanten höheren Temperaturwerte hat man sich in der vorliegenden Studie auf Stationen unterhalb einer Geländehöhe von 500 m ü. NN beschränkt.

3.2.1 Emscher-Lippe-Region

Untersucht wurden Niederschlagsdaten von 21 langjährig beobachteten Stationen der Emschergenossenschaft und des Lippeverbands (EGLV), die seit den 1930er Jahren kontinuierlich in einer Auflösung von 1 Minute vorliegen (PFISTER, 2016). Die EGLV betreiben aufgrund ihrer gesetzlichen wasserwirtschaftlichen Aufgaben ein dichtes Messnetz, das zum Teil Aufzeichnungen über 120 Jahre umfasst und von daher eine außergewöhnlich gute und belastbare Datenbasis darstellt. Hinzu kommt, dass diese auch über den gesamten Zeitraum Qualitätskontrollen und Datenprüfungen unterliegen. Heute sind standardmäßig Pluviometer im Einsatz. Die historischen Daten wurden in den 1990er Jahren nach den anerkannten Regeln der Technik digitalisiert und gegebenenfalls lückenbereinigt; Messabweichungen wurden nicht bereinigt. Die Analysemethoden reichen von einfacher Regression bis hin zu komplexen statistischen Verfahren (JOHANN et al., 1998). Alle Standorte werden online übertragen und gehen größtenteils in das EGLV-interne Hochwasserinformationssystem mit integriertem Warnmanagement ein.

Einige dieser Stationen wurden von MUELLER & PFISTER (2011), und BÜRGER et al. (2014) bereits auf Trends untersucht. Um sie für die MC⁺-Kalibrierung verwenden zu können, wurden zunächst die 1-Minuten-Daten zu 10-Minuten-Blöcken aggregiert. Als Plausibilisierung der Arbeiten von MUELLER & PFISTER (2011) wurden hier nun jährliche Werte der ÜS für einen Schwellenwert von 5 mm ermittelt. Zu beachten ist, dass Trends in den Wiederkehrniveaus in der Regel durch eine kombinierte Änderung der Häufigkeit und der Intensität der Extremereignisse verursacht werden, die hier nicht separat analysiert wurden.

Tabelle 1

Übersicht über die analysierten Stationen mit zeitlich hochaufgelösten Niederschlagsdaten (N) und zugehörigen Tageswerten der Temperatur (T) in Deutschland (Emscher-Lippe-Region), Österreich und der Schweiz. In der Klammer sind die Datenquellen genannt.
Overview of the analyzed stations with temporally high-resolution precipitation data (N) and associated daily temperature values (T) in Germany (Emscher-Lippe region), Austria and Switzerland. The data sources are given in parentheses.

Deutschland (EGLV)	Österreich (SeRAC-CC-Projekt)	Schweiz (IDAWEB-Portal)
21 Stationen (N), 10 min	4 Stationen (N), 15 min	7 Stationen (N), 10 min
6 Stationen (T), tägl.	2 Stationen (T), tägl.	3 Stationen (T), tägl.

3.2.2 Stationsdaten aus den österreichischen Alpen

Die österreichischen Daten entstammen dem Projekt "Sensitivity of the Runoff Characteristics of Small Alpine Catchments to Climate Change" (SeRAC-CC) der Universität Innsbruck. Darin wurde der Einfluss des Klimawandels auf drei kleine alpine Einzugsgebiete der Regionen Tirol und Vorarlberg untersucht. Es handelt sich um die Flüsse Ruggbach im Vorarlberg und den Brixenbach sowie den Längentalbach in Tirol. Die Höhe der Messstationen liegt in einem Bereich von etwa 500 bis 2.000 m ü. NN, wobei man sich auf den Bereich um 500 m ü. NN beschränkt hat. Die zeitliche Auflösung beträgt 15 Minuten. Die längste Beobachtungsreihe stammt von der Station Bregenz und reicht zurück bis ins Jahr 1950. Erst in den 70er Jahren kommen weitere Stationen hinzu.

Diese gegenüber der Emschergenossenschaft und des Lippeverbands eher spärliche Datenlage verlangt besondere Umsicht bei der Abschätzung der Langfristtrends. Während BÜRGER et al. (2019) eine mehr oder weniger komplette Abdeckung ab den 60er Jahren benutzen konnten, ist es jedoch an dieser Stelle nötig, alle verfügbaren Daten für die Diagnose heranzuziehen. Die aus einer derart zeitlich heterogenen und nicht-stationären Datenbasis abgeschätzten Langfristtrends müssen daher unter Vorbehalt beurteilt werden, und entsprechende Signifikanzanalysen erhalten besonderes Gewicht.

3.2.3 Stationsdaten aus der Schweiz

Die Schweizer Stationsdaten sind über das Datenportal IDAWEB für wissenschaftliche Zwecke frei verfügbar. Gegenüber der EGLV und dem Projekt SeRAC-CC stehen von IDAWEB nur zwei Dekaden (1980 bis 2000) von 10-minütlichen Messungen zur Verfügung. Die Daten besitzen zwar kaum Lücken, die Zeitspanne ist für Langfristtrends jedoch recht kurz. Außerdem sind die Daten nicht auf eine überschaubare Region beschränkt, sondern überdecken die gesamte Schweiz: von den 7 Niederschlagsstationen unterhalb 500 m ü. NN liegen 4 nördlich und 3 südlich des Alpenhauptkamms, klimatisch gesehen also ein eher heterogenes Studiengebiet.

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Trendanalyse der Zeitreihen der Starkregen

4.1.1 Daten der Emscher-Lippe-Region

Die über alle 21 Stationen gemittelten Statistiken der Überschreitungssummen (ÜS) und der Wiederkehrniveaus (WN) für extreme Niederschlagsereignisse aus Beobachtungen sind in Abbildung 1 dargestellt, zusammen mit der Temperatur. Für den Zeitraum von 1931 bis 2016 ergeben sich positive Jahrhunderttrends sowohl

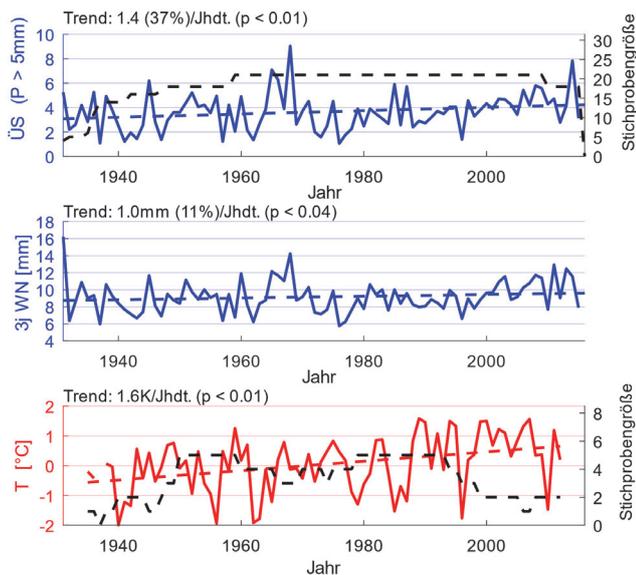


Abbildung 1

Für die Stationen der Emscher-Lippe-Region für den Zeitraum von 1931 bis 2016. Oben: Jährliche Entwicklung der Anzahl extremer Niederschlagsereignisse in 10-minütlicher Auflösung ($P > 5 \text{ mm}$) dargestellt als Mittelwert (durchgezogene, blaue Linie) mit Trend (gestrichelte, blaue Linie) und Anzahl der Stationen (gestrichelte, schwarze Linie). Mitte: Wie oben, für die Jährlichkeit von 3 Jahren. Unten: Temperaturentwicklung aus Tageswerten dargestellt als Mittelwert (durchgezogene, rote Linie) mit Trend (gestrichelte, rote Linie) und Anzahl der Stationen (gestrichelte, schwarze Linie).

For the stations in the Emscher-Lippe region for the period from 1931 to 2016. Top: Annual evolution of the number of extreme precipitation events in a resolution of 10 minutes ($> 5 \text{ mm}$) displayed as average (solid blue line), with trend (dashed blue line) and the number of stations (black dashed line). Middle: As on top, for 3-year return levels. Bottom: Temperature evolution from daily values displayed as average (solid red line), with trend (dashed red line) and the number of stations (black dashed line).

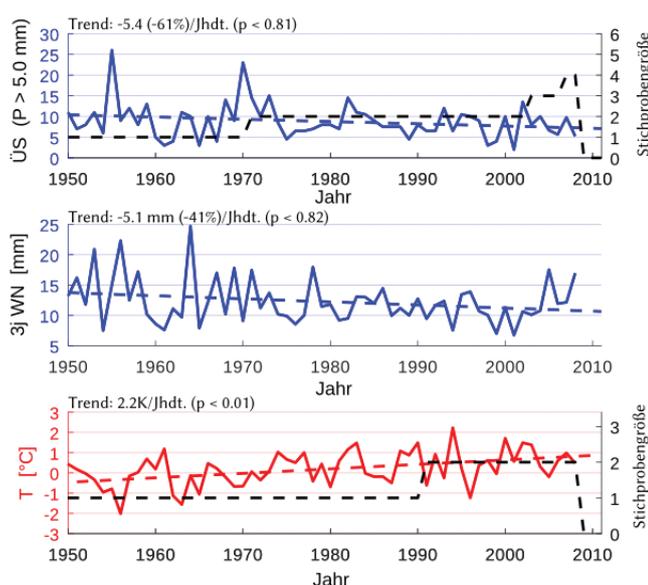


Abbildung 2

Wie Abbildung 1, für die österreichischen Daten, für den Zeitraum von 1950 bis 2010.

As Figure 1, for the Austrian data, for the period from 1950 to 2010.

für die ÜS (+37 %, $p < 0,01$) als auch für die WN (+11 %, $p < 0,04$); die mittlere Erwärmung beträgt +1,6 K pro Jahrhundert. Die Signifikanz dieser Trends beruht allerdings wesentlich auf der räumlichen Aggregation, die zu besseren Schätzungen führt; die Trends der einzelnen Stationen sind weniger signifikant (BÜRGER et al., 2019). Zum Vergleich siehe auch MUELLER & PFISTER (2011).

4.1.2 Daten aus Tirol und Vorarlberg

Für die österreichischen Daten (Abb. 2) ergeben sich weder für die ÜS noch für die WN signifikante Trends ($p < 0,81$, $p < 0,82$). Wie Abbildung 2 zeigt, sind beide Größen durch eine erhöhte Variabilität, mit starken positiven Anomalien, zu Beginn der Untersuchungsperiode gekennzeichnet, was insgesamt in einem negativen Trend resultiert. Die erhöhte Variabilität in der frühen Phase ist allerdings sehr wahrscheinlich ein Artefakt der Schätzung und beruht auf der minimalen Stichprobe von einer Station (Bregenz) vor dem Jahr 1970. Durch eine Verkürzung der Analysezeit, etwa nach 1970, erreicht man zwar eine Erhöhung der Stationszahlen, diese ist aber immer noch nicht hinreichend, um signifikante Trends hervorzubringen.

4.1.3 Daten aus der Schweiz

Die relativ kurzen Schweizer Zeitreihen lassen wie die österreichischen keinen signifikanten Trend erkennen (ÜS positiv, $p < 0,96$, WN negativ, $p < 0,31$), Abb. 3). Eine Einschränkung der Datenbasis, hier etwa auf den nördlichen oder südlichen Alpenkamm, ergibt auch keine signifikanten Trends.

4.2 Validierung des räumlichen Downscalings mit zeitlicher Disaggregation

Die Validierung des räumlichen und zeitlichen Downscalings geschieht anhand der Daten der Emscher-Genossenschaft und des Lippeverbands (EGLV). Diese sind umfangreich und homogen genug, um zunächst eine verlässliche Abschätzung des

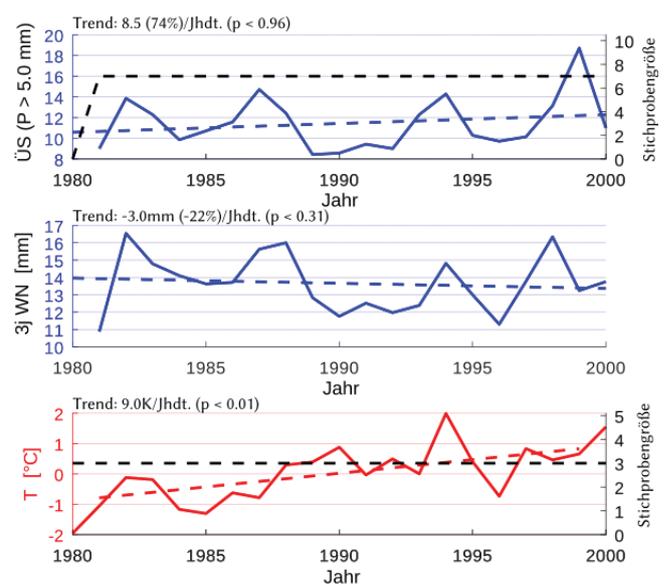


Abbildung 3

Wie Abbildung 1, für die schweizerischen Daten, für den Zeitraum von 1980 bis 2000.

As Figure 1, for the Swiss data for the period from 1980 to 2000.

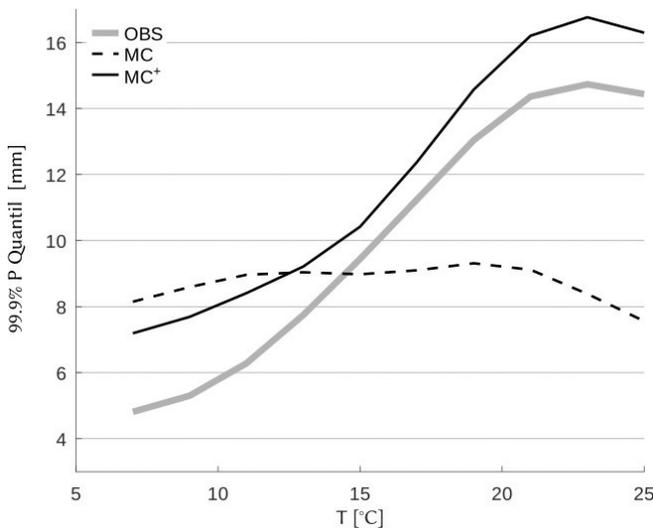


Abbildung 4
 Für die Stationen der Emscher-Lippe-Region: Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsextreme abgeschätzt aus der beobachteten 10-min-Dauerstufe (grau) und disaggregiert aus der beobachteten täglichen Dauerstufe mit MC (gestrichelt) und MC⁺ (durchgezogen). Die Werte wurden mittels einer Kernel-Regression geglättet. Aus BÜRGER et al. (2019).
For the stations in the Emscher-Lippe region: Temperature dependence of precipitation extremes estimated from the observed 10-min duration (gray) and disaggregated from the observed daily duration with MC (dashed) and MC⁺ (solid). Values were smoothed using kernel regression. From BÜRGER et al. (2019).

CC-Scalings zu bekommen. In einem zweiten Schritt werden die erhaltenen signifikanten Langfristrends mit simulierten Trends aus dem raum-zeitlichen Downscaling verglichen.

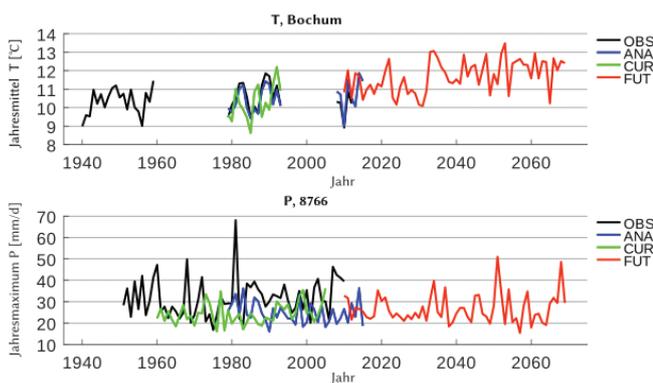


Abbildung 5
 Oben: XDS-Simulation der jährlichen Mittelwerte der Temperatur am Beispiel der EGLV-Station Bochum auf täglicher Basis aus den Antriebsfeldern ANA (blau), CUR (grün) und FUT (rot). Beobachtungen OBS (schwarz) zum Vergleich. Unten: XDS-Simulation der jährlichen Maximalwerte des Niederschlags am Beispiel der EGLV-Station Bönen auf täglicher Basis. Antriebsfelder und Farbgebung wie oben.
Top: XDS simulation of the annual mean values of temperature by the example of the EGLV station Bochum on a daily basis from the ANA (blue), CUR (green), and FUT (red) forcing fields; observations OBS (black) for comparison. Bottom: XDS simulation of the annual maximum values of precipitation by the example of the EGLV station Bönen. Forcing fields and color scheme as on top.

4.2.1 Zusammenhang zwischen extremen Regenintensitäten und der Lufttemperatur

Um genauer zu untersuchen, wie extreme Niederschlagsintensitäten mit der Temperatur zusammenhängen und ob dieser Zusammenhang dem CC-Scaling entspricht, zeigt die Abbildung 4 für die Daten der Emscher-Lippe-Region die Abhängigkeit der extremen (also sehr seltenen) Niederschlagsintensitäten (oberes 99.9%-Quantil) und der Tagestemperatur, unterteilt in 2-K-Abschnitte zwischen 6 °C und 26 °C. Dies erfolgt sowohl für die beobachteten Daten der Dauerstufe von 10 Minuten als auch für die aus der täglichen Dauerstufe disaggregierten Daten von MC und MC⁺. Es ist deutlich, dass die beobachteten Starkregenintensitäten mit zunehmender Temperatur stark ansteigen, bis sie ab etwa 22 °C eine gewisse Sättigung erfahren. Dasselbe Verhalten zeigen die MC⁺-Daten, allerdings mit einem positiven Bias von etwa 2 mm pro 10 min. Im mittleren Temperaturbereich folgen beide Datensätze dem CC-Scaling (LENDERINK & VAN MEIJGAARD, 2008), während die MC-Werte keine Temperaturabhängigkeit aufweisen.

4.2.2 Räumliches Downscaling auf Tagesbasis

Die Brauchbarkeit von XDS für die Anwendung wie etwa für hydrologische Modellierungen, speziell für die Abschätzungen von Extremereignissen, ist hinreichend dokumentiert (BÜRGER et al., 2019). Um die mögliche zeitliche Entwicklung der simulierten Dauerstufen unterhalb eines Tages zu verstehen, müssen zunächst die simulierten Tages-Dauerstufen betrachtet werden. Abbildung 5 zeigt jährliche Mittel- und Maximalwerte für die tägliche Temperatur (T) und den Niederschlag (P) zwei benachbarter Stationen, basierend auf Beobachtungen und XDS-Simulationen. Man sieht, dass die Langzeitklimatologie recht gut getroffen wird und dass die allgemeine interannuelle Variabilität realistisch ist, wobei die Temperatur besser als der Niederschlag abgebildet werden konnte. Für eine Interpretation des Zukunftsignals kommt es hierbei hauptsächlich auf die beiden Simulationen CUR vs. FUT an. Deutlich zu sehen ist ein Anstieg bei der Temperatur und ein fast stationäres Verhalten beim Niederschlag.

4.2.3 Zeitliches Downscaling für die 10-min-Dauerstufe

Mit steigender Temperatur sollte das CC-Scaling (Abb. 4) einen zusätzlichen Effekt der Temperatur auf den Niederschlag für die kürzere (< 1 d) Zeitskala erzeugen: Die wärmeren Temperaturen führen zu einer Verschiebung in Richtung größerer Extreme. Der Effekt wird beim Vergleichen von MC- und MC⁺-Disaggregation deutlich, die auf den gleichen Satz von Simulationen (Abb. 5) angewendet werden. Die nächsten beiden Abbildungen zeigen die Statistiken der Überschreitungssummen (ÜS) und der Wiederkehrniveaus (WN) der entsprechenden disaggregierten Daten. Für ÜS zeigt Abbildung 6, dass für das gegenwärtige Klima Mittelwert und Variabilität für beide MC-Versionen zufriedenstellend reproduziert werden. Für die Zukunft ist ein klarer Unterschied zwischen MC und MC⁺ offensichtlich, denn MC bleibt im Wesentlichen stationär und MC⁺ zeigt einen deutlich steigenden Trend. Abbildung 7 zeigt das Analoge für WN: Hier ist allerdings das gegenwärtige Klima schlechter reproduziert, mit reduziertem Mittelwert und Variabilität für MC⁺, insbesondere für das Antriebsfeld ANA; vergleichbar dem Bias in Abbildung 5.

Dessen ungeachtet sind die positiven Trends sowohl für die Simulationen unter Gegenwartsbedingungen als auch für die der Zukunft (Abb. 7) deutlich für die Methode MC und besonders für

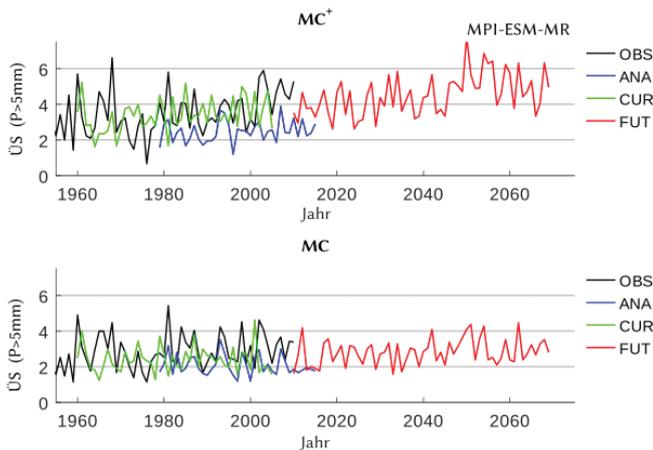


Abbildung 6

Oben: Jahreswerte der Überschreitungssummen nach Disaggregation mit MC+, angetrieben von täglichem Niederschlag und der Temperatur. Unten: Jahreswerte der Überschreitungssummen nach Disaggregation mit MC, angetrieben von täglichem Niederschlag. Farbgebung wie Abbildung 5.

Top: Annual values of exceedance counts from MC+ disaggregation, driven by daily precipitation and temperature. Bottom: Annual values of exceedance counts from MC disaggregation, driven by daily precipitation. Color scheme as Figure 5.

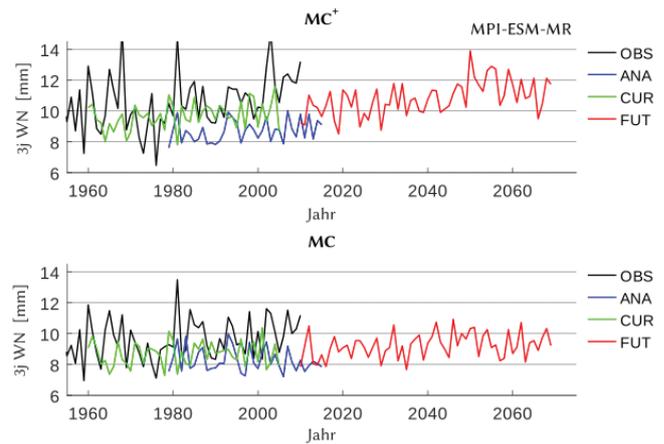


Abbildung 7

Wie Abbildung 6, für die Wiederkehrniveaus. As Figure 6, for return levels.

MC+ zu erkennen. Die berechneten Trends der 10-minütlichen Starkregenintensitäten werden in Tab. 2 für die Simulationen auf Basis der vier verschiedenen Ausgangsdaten angegeben:

"OBS": zeitliche Disaggregation der gemessenen Tagesdaten der Starkregen;

"ANA": räumliches Downscaling auf Basis der Re-Analysen aus dem Projekt Era-Interim und anschließende zeitliche Disaggregation;

"CUR": räumliches Downscaling auf Basis der modellierten heutigen Klimabedingungen und anschließende zeitliche Disaggregation;

"FUT": räumliches Downscaling auf Basis der modellierten zukünftigen Klimabedingungen und anschließende zeitliche Disaggregation.

Die Trends, jeweils zur Vergleichbarkeit einheitlich auf 100 Jahre bezogen (Jahrhunderttrends), sind, falls signifikant, durchweg

positiv und für MC+ stärker, mit einem für das 21. Jahrhundert (Simulation "FUT") prognostizierten Anstieg von mehr als 3 mm für die Wiederkehrniveaus WN. Die beobachteten Trends der 10-minütlichen Starkregenintensitäten für den Zeitraum von 1950 bis 2010 (Abb. 1) betragen für die ÜS +1,0 Ereignisse pro Jahrhundert und für die WN +2,5 mm pro Jahrhundert. Vergleicht man diese mit den Simulationsergebnissen der Methoden MC und MC+ für die Gegenwart (Mittelwerte aus "OBS", "ANA", und "CUR"), so erhält man für die Überschreitungssummen ÜS +0,2 Ereignisse pro Jahrhundert bei MC und +1,9 Ereignisse pro Jahrhundert bei MC+. Für die Wiederkehrniveaus ergeben sich +0,3 mm pro Jahrhundert bei MC und +2,2 mm pro Jahrhundert bei MC+. Man sieht, dass die MC+-Ergebnisse deutlich näher an den Trends der gemessenen 10-minütlichen Starkregenintensitäten liegen. Das allgemeine Niveau der simulierten ÜS- und WN-Werte in den Abbildungen 6 und 7 ist für die Gegenwart meist ähnlich dem bei MC und MC+, mit Ausnahme der OBS-Werte der Wiederkehrniveaus, die einige große Ausreißer für MC+ zeigen. Die FUT-Werte sind höher für MC+, was offensichtlich auf die stärkeren Trends zurückzuführen ist.

Schließlich wurde der direkte CC-Effekt der Temperatur auf die simulierten klimaabhängigen Niederschlags extreme (P-Extreme) genauer untersucht. Zu diesem Zweck zeigt die Abbildung 8, ähnlich wie Abbildung 4, die Temperaturabhängigkeit der extremen (99,9 %) P-Quantile für MC und MC+, für die 10-Minuten-Beobachtungsdaten sowie für alle disaggregierten Simulationen.

Tabelle 2

Trend in Überschreitungssummen (ÜS) und 3-jährlichen Wiederkehrniveaus (WN) pro Jahrhundert für alle Simulationen, in den Einheiten [Anzahl der Ereignisse über 5 mm/10 min] (ÜS) und [mm/10 min] (WN). Signifikant positive Trends (Mann-Kendall $p < 5\%$) sind fett dargestellt. Trend in exceedance counts (ÜS) and 3-yr return levels (WN) per century for all simulations, in units of [number of events over 5 mm/10 min] (ÜS) and [mm/10 min] (WN). Significant positive trends (Mann-Kendall $p < 5\%$), are shown in bold.

Trend/Jhdt.	OBS 1951–2010		ANA 1979–2015		CUR 1960–2005		FUT 2010–2069	
	ÜS	WN	ÜS	WN	ÜS	WN	ÜS	WN
MC	1.4	1.9	-0.9	-1.3	0.0	0.4	1.1	1.4
MC+	2.3	2.8	1.3	1.9	2.1	1.9	3.1	3.2

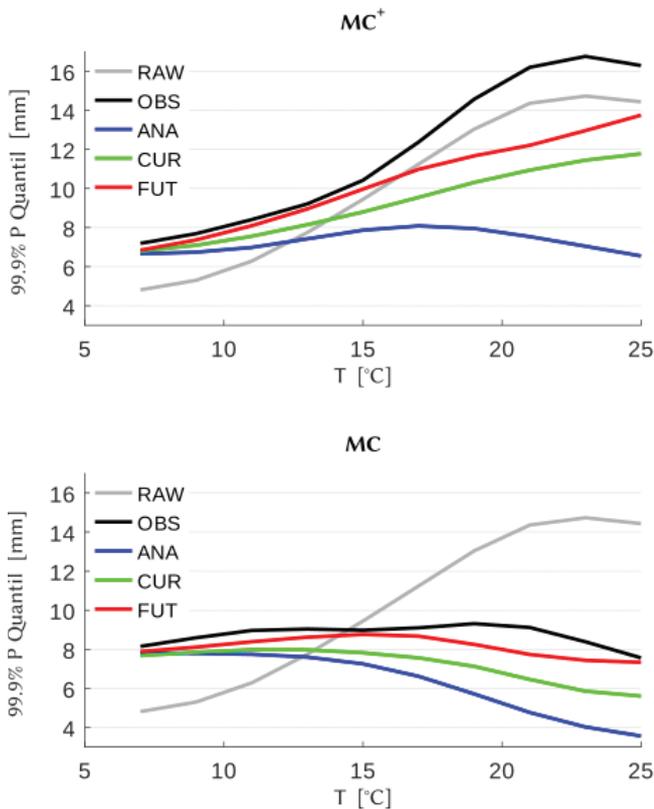


Abbildung 8

Ähnlich wie Abbildung 4, Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsextreme aus Simulationen mit MC⁺ (oben) und MC (unten).
 Similar to Figure 4, temperature dependence of precipitation extremes from MC⁺ (top) and MC (bottom) simulations.

In erster Näherung würde man erwarten, dass der Charakter des CC-Scalings – wie die Physik des CC selbst – in allen Simulationen erhalten bleibt und die Temperaturabhängigkeit sich in der Zukunft nicht ändert. Indirekte Effekte wie etwa im Konvektionsgeschehen, die man derzeit noch nicht quantifizieren kann, sind dabei also ausgeblendet. Voraussetzung hierfür ist, dass die Disaggregation die Temperaturabhängigkeit respektiert. Und wie zu erwarten war, sieht man für MC das gleiche temperaturunempfindliche Verhalten wie in Abbildung 4. Die Simulationen CUR und insbesondere ANA zeigen sogar eine negative Temperaturabhängigkeit. Für MC⁺ hat nur ANA keine Temperaturabhängigkeit. Die simulierten Klimabedingungen der Gegenwart (CUR) und Zukunft (FUT) zeigen ähnliche Eigenschaften, wobei die CUR-Werte etwas unter den FUT-Werten liegen. Bei beiden sieht es nach einer linearen Temperaturabhängigkeit aus (d. h. kein CC-Scaling), was allerdings zum einen ein Artefakt der starken Kernelglättung sein kann, und zum anderen am allgemeinen Bias in der Modellierungskette liegen kann.

5 Schlussfolgerungen

Die zur Verfügung stehenden langen und zeitlich sehr hochaufgelösten Niederschlagszeitreihen aus dem Emscher-Lippe-Gebiet in Nordrhein-Westfalen und ebensolche aus der Schweiz und dem Westen Österreichs bildeten die notwendige Datenbasis zur Erkennung möglicher Trends von Starkniederschlagsintensitäten in den letzten Jahrzehnten. Die räumlich gemittelten

Trendanalysen für alle Stationen des Emscher-Lippe-Gebietes ergaben einen signifikanten Trend von 37 % Ereigniszunahme auf 100 Jahre. Ein Starkregeneignis wurde dabei definiert als > 5 mm pro 10 min, die statistische Signifikanz nach dem Mann-Kendall-Test entspricht dem 5%-Niveau. Auch die Analysen der Datenreihen aus Österreich und der Schweiz ergaben teilweise ähnliche Trends, allerdings mit deutlich größeren Unsicherheiten, was vermutlich mit der geringeren Stationsanzahl und den kürzeren Zeitreihen verbunden ist. Man kann also konstatieren, dass zumindest für diese Gebiete, für die solch eine gute Datenerhebung vorhanden ist, positive (also zunehmende) Trends der extremen Niederschlagsintensitäten in einer zeitlichen Auflösung von unter einer Stunde existieren.

Die Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und möglichen extremen Niederschlagsintensitäten ist insbesondere für die Abschätzung der künftigen Entwicklung von Starkregenintensitäten notwendig. Bevor dynamische und hochaufgelöste globale Klimasimulationen zuverlässig eingesetzt werden können, um solche lokalen konvektiven Starkregeneignisse abzubilden, kann man den erforderlichen Informationstransfer von den Skalen der großräumigen atmosphärischen Bedingungen zur lokalen Starkregen-Skala mit einfacheren empirischen Methoden überbrücken. In der vorliegenden Studie wurde ein zweistufiges Verfahren vorgeschlagen: erstens räumlich, von der globalen zur lokalen Tagesskala mit einem "konventionellen" statistischen Downscaling, und zweitens zeitlich durch eine temperaturabhängige Disaggregation der Tageswerte auf einen kurzfristigen Bereich in einer Auflösung von wenigen Minuten. Das Modell kann ohne Weiteres an hydrologische Modelle gekoppelt werden, wie etwa zur Bewertung des künftigen Risikos für urbane Überflutungen, der Bodenerosion oder anderer Schäden in der Landwirtschaft.

Gleichwohl zeigt dieses Modell auch noch einige Beschränkungen. Dazu gehört der positive Bias für extreme Niederschlagsintensitäten. Dies erfordert eine Anpassung des ursprünglichen MC-Modells und kann vermutlich in einer zukünftigen Version behoben werden. Schwerer wiegen die Unstimmigkeiten von Abbildung 8: Während die Unterschiede zwischen den Simulationen CUR und ANA vermutlich aus Fehlern im antreibenden Klimamodell (MPI-ESM-MR) resultieren, ist die Diskrepanz zwischen den Werten zu ANA und den Beobachtungswerten OBS ein Hinweis auf ein Downscaling-Problem, vermutlich an der Schnittstelle zwischen dem Expanded Downscaling und dem Modell MC⁺.

Unter Berücksichtigung der Einschränkungen können die wichtigsten Phänomene, welche sich robust in dem 2-stufigen Downscaling-Verfahren widerspiegeln, folgendermaßen zusammengefasst werden:

1. Eine auf der täglichen Zeitskala erkennbare Veränderung des Niederschlags lässt sich generell aus der großräumigen Skala erklären, und zwar verursacht durch eine möglicherweise veränderte großräumige atmosphärische Zirkulation, die mehr Feuchtigkeit von den Ozeanen landwärts transportiert und dort als Niederschlag ausfällt. Für die Emscher-Lippe-Region zeigt sich hier allerdings kein wesentliches Signal.
2. Hinsichtlich der Werte der kurzfristigen Dauerstufe überlagert sich ein zweiter, meist unabhängiger und lokaler Effekt, und zwar die erhöhte Wasserdampfspeicherung erwärmter

Luft. Das in der Beispielregion Emscher-Lippe beobachtete und simulierte Ansteigen der lokalen und kurzzeitigen Regenextrema lässt sich daher im Wesentlichen durch die lokale Erwärmung erklären. Dies ist so zu deuten, dass wenn die Entstehungsbedingungen der Konvektion im wärmeren Klima gleichbleiben, sich die Starkregenintensitäten in Zeitskalen von unter einer Stunde entsprechend der regionalen Temperaturabhängigkeit der oberen Quantile des Niederschlags (bei genauem CC-Scaling um 7 % pro K) verstärken.

Wenn in anderen Regionen – oder bei anderen großräumigen Zirkulationsbedingungen – ein zunehmendes großräumiges Signal vorliegt, z. B. durch eine veränderte Zirkulation oder eine wachsende relative Luftfeuchtigkeit, überlagerten sich sowohl die globalen als auch lokalen Signale und könnten noch größere Niederschlagsextreme erzeugen.

Conclusions

The long precipitation time series of very high temporal resolution from the Emscher-Lippe area in North Rhine-Westphalia and from Switzerland and western Austria provided the necessary data basis for the identification of possible trends in heavy precipitation intensities over the last decades. The spatially averaged trend analyses for all stations of the Emscher-Lippe area showed a significant trend of 37 % increase of heavy rain events over 100 years. A heavy rain event was defined as > 5 mm per 10 min, and statistical significance according to the Mann-Kendall test at the 5 % level. The analyses of the data series from Austria and Switzerland also showed partly similar trends, but with markedly larger uncertainties, which is probably related to the smaller number of stations and the shorter time series. Thus, it can be stated that positive (i.e., increasing) trends of extreme rainfall intensities in sub-hourly temporal resolution exist at least for these areas for which such a good data set exists.

Consideration of the relationship between air temperature and possible extreme rainfall intensities is particularly necessary for estimating the future development of heavy rainfall intensities. Before dynamic global climate models of high resolution can reliably simulate such local convective events, simpler empirical methods must be employed to bridge the gap from the large-scale atmospheric conditions to the local scales of heavy rainfall. This study proposed a two-step procedure: first, spatially, from the global to the local daily scale with a "conventional" statistical downscaling, and second, temporally, using a temperature-dependent disaggregation of the daily values to a resolution of a few minutes. The model can be coupled to models for hydrological applications, for the future risk assessment of urban flooding, soil erosion, or other agricultural damage.

Nevertheless, this model still shows some limitations. These include the positive bias for extreme rainfall intensities; this requires an adjustment to the original MC model and can presumably be addressed in a future version. More serious are the discrepancies of Figure 8: while the differences between CUR and ANA probably result from errors in the driving GCM (MPI-ESM-MR), the discrepancy between ANA and OBS is indicative of a downscaling problem, presumably at the interface between XDS and MC⁺.

Despite such limitations, the main findings that are robustly reflected in the 2-step downscaling procedure can be summarized:

1. A change in precipitation detectable on the daily time scale can generally be explained from the larger scales, caused by a possible change in atmospheric circulation that transports more moisture from the oceans towards the land and generates precipitation there. However, there is no significant signal here for the Emscher-Lippe region.
2. Superimposed on this for the short-term duration stage is a second, mostly independent and local effect, namely the increased water vapor storage of warmed air. The increase in local and short-term rainfall extremes observed and simulated in the example region Emscher/Lippe can therefore essentially be explained by local warming. It can be interpreted that if the convection-formation conditions remain the same in the warmer climate, heavy rainfall intensities on sub-hourly time scales will increase according to the regional temperature dependence of the upper precipitation quantiles (by 7 % per K for accurate CC scaling).

If there is an increasing large-scale signal in other regions – or other large-scale circulation conditions – e.g., due to changing circulation or increasing relative humidity, both the global and local signals would overlap and could produce even larger precipitation extremes.

Danksagung

Die österreichischen Daten wurden freundlicherweise von dem Projekt SeRAC-CC und die Schweizer Daten (IDAWEB) von MeteoSwiss, dem Schweizer Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie zur Verfügung gestellt.

Anschriften der Verfasser

Prof. Axel Bronstert
Dr. Gerhard Bürger
Universität Potsdam
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie
Karl-Liebknecht-Str. 24-25
14476 Potsdam-Golm
axelbron@uni-potsdam.de
gbuerger@uni-potsdam.de

Angela Pfister
Emschergenossenschaft/Lippeverband
Geschäftsbereich Grundlagen und Entwicklung
Abteilung Wasserwirtschaft
Kronprinzenstr. 24
45128 Essen
pfister.angela@eglv.de

Literaturverzeichnis

- ASCE (1992): Design and construction of urban stormwater management systems. American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation, 724 pp.
- BECKER, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.-B. (Ed.): Regionalisierung in der Hydrologie, VCH. Weinheim, 16-32.
- BECKER, A. (2019): Extremer Niederschlag im Klimawandel – Was wissen wir? *Wasserwirtschaft* 109(12), 10-16, SpringerNature, DOI: 10.1007/s35147-019-0297-y.

- BRASSEUR, G.P., JACOB, D. & S. SCHUCK-ZÖLLER (Hg.) (2016): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. 1. Aufl. 2017. Berlin, S.I.: Springer Berlin. Online verfügbar unter www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/064081/index.php.de.
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEISTERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & D. WENDI (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 - Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 1: Meteorologische und Hydrologische Analysen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa)*, 61(3), 150-162.
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., CRISOLOGO, I., FISCHER, M., HEISTERMANN, M., KÖHN-REICH, L., LÓPEZ-TARAZÓN, J.A., MORAN, T., OZTURK, U., REINHARDT-IMJELA, C. & D. WENDI (2018): Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: The 2016-05-29 event in Braunsbach, SW Germany. *Sci. Total Environ.*, 630, 977-991. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.241.
- BÜRGER, G., HEISTERMANN, M. & A. BRONSTERT (2014): Towards sub-daily rainfall disaggregation via Clausius-Clapeyron. *J. Hydrometeorol.*, 15, 1303-1311. DOI: 10.1175/JHM-D-13-0161.1.
- BÜRGER, G., PFISTER, A. & A. BRONSTERT (2019): Temperature-Driven Rise in Extreme Sub-Hourly Rainfall. *Journal of Climate*, 32(22), 7597-7609. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0136.1.
- DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL e. V. (DWA) (2012): Arbeitsblatt DWA-A 531. Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer. Hennef (DWA-Regelwerk, A 531).
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (2018): LAWAStrategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Erfurt.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS (2009): ERA-Interim Project. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. DOI: 10.5065/D6CR5RD9.
- FUCHS, L. (2016): Klimawandel und Stadtentwässerung - Konsequenzen für die Bemessung. In: Johannes Pinnekamp (Hg.): 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. "Wasserwirtschaft 4.0". Essen, 02.-04.03.2016. Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen (Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, 239), 33/01-33/16.
- GIORGETTA, M., JUNGCLAUS, J., REICK, C., LEGUTKE, S., BROVKIN, V. & T. CRUEGER, T. (2012): CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-MR model: The rcp45 experiment, served by ESGF [Data set]. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. DOI: 10.1594/wdccc/cmp5.mxmr4.
- GRÜNING, H. & K.H. PECHER (2020): Kanalnetzplanung und Überflutungsvorsorge. ISBN: 978-3-8356-7383-0/7, Essen: Vulkan Verlag.
- HARDWICK JONES, R., WESTRA, S. & A. SHARMA (2010): Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity. *Geophysical Research Letters*, 37(22).
- JOHANN, G., PAPADAKIS, I. & A. PFISTER (1998): Historical precipitation time series for applications in urban hydrology. *Water Sci. Technol.*, 37, 147-153. DOI: 10.1016/S0273-1223(98)00327-8.
- KELLER, T., GATTKKE, C. & B. BUCHER (2018): Entwicklung von Starkregen im Erftverbandsgebiet. In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 11 (11), S. 664-671. DOI: 10.3243/kwe2018.11.002.
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW) (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. Recklinghausen.
- LENDERINK, G. & J. ATTEMA (2015): A simple scaling approach to produce climate scenarios of local precipitation extremes for the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 10(8), 085001.
- LENDERINK, G. & E. VAN MEIJGAARD (2008): Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511-514.
- MISHRA, V., WALLACE, J.M. & D.P. LETTENMAIER (2012): Relationship between hourly extreme precipitation and local air temperature in the United States. *Geophysical Research Letters*, 39(16). DOI: 10.1029/2012GL052790.
- MUELLER, E.N. & A. PFISTER (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *Journal of Hydrology*, 411(3), 266-278.
- OLSSON, J. (1998): Evaluation of a scaling cascade model for temporal rain-fall disaggregation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2, 19-30.
- PANTHOU, G., MAILHOT, A., LAURENCE, E. & G. TALBOT (2014): Relationship between Surface Temperature and Extreme Rainfalls: A Multi-Time-Scale and Event-Based Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 15(5), 1999-2011. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0020.1.
- PATON, E., VOGEL, J., KLUGE, B. & T. NEHLS (2021): Ausmaß, Trend und Extrema von Dürren im urbanen Raum. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWa)* 65 (1), S. 5-16. DOI: 10.5675/HyWa_2021.1_1.
- PFISTER, A. (2016): Langjährige Entwicklung von Starkregen - Handlungsempfehlungen für die Zukunft. In: Johannes Pinnekamp (Hg.): 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. "Wasserwirtschaft 4.0". Essen, 02.-04.03.2016. Aachen: Ges. zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen (Gewässerschutz - Wasser - Abwasser, 239), 35/01-35/14.
- SALLES, C., POESEN, J.G. & G. GOVERS (2000): Statistical and physical analysis of soil detachment by raindrop impact: Rain erosivity indices and threshold energy. *Water Resour. Res.*, 36, 2721-2729. DOI: 10.1029/2000WR900024.
- SO, B.-J., KIM, J.-Y., KWON, H.-H. & C.H.R. LIMA (2017): Stochastic extreme downscaling model for an assessment of changes in rainfall intensity-duration-frequency curves over South Korea using multiple regional climate models. *Journal of Hydrology*, 553, 321-337. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.061.
- STORCH, H. von & F.W. ZWIERS (2002): *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press.
- TRENBERTH, K.E., DAI, A., RASMUSSEN, R.M. & D.B. PARSONS (2003): The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1217.
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau.
- VAN VUUREN, D.P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A. & K. HIBBARD (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5.
- WASKO, C. & A. SHARMA (2017): Continuous rainfall generation for a warmer climate using observed temperature sensitivities. *Journal of Hydrology*, 544, 575-590. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.12.002.
- WESTRA, S., EVANS, J. P., MEHROTRA, R. & A. SHARMA (2013): A conditional disaggregation algorithm for generating fine time-scale rainfall data in a warmer climate. *Journal of Hydrology*, 479, 86-99.
- WOOD, F., HEATHWAITE, A.L. & P. HAYGARTH (2005): Evaluating diffuse and point phosphorus contributions to river transfers at different scales in the Taw catchment, Devon, UK. *J. Hydrol.*, 304, 118-138. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.07.026.