Starkniederschläge
Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft
– Kurzbericht –

(Stand: 07/2019)

im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA –

Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

Impressum

Bearbeitung: Kooperation KLIWA – www.kliwa.de –

Redaktion:
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof/Saale
Christoph Müller
Christoph.Müller@lfu.bayern.de

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Griesbachstraße 1
76185 Karlsruhe
Dr. Manuela Nied
Manuela.Nied@lubw.bwl.de

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Str. 7
55116 Mainz
Matthias Voigt
Matthias.Voigt@lfu.rlp.de
Christian Iber
Christian.Iber@lfu.rlp.de

Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen
Hauptstraße 16
67705 Trippstadt
Dr. Tilmann Sauer
Tilmann.Sauer@klimawandel-rlp.de

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main
Thomas Junghänel
Thomas.Junghaenel@dwd.demailto:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Rheingaustr. 186
65203 Wiesbaden
Dr. Andreas Hoy
Andreas.Hoy@hlnug.hessen.de
Dr. Heike Hübener
Heike.Huebener@hlnug.hessen.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 6
1 Einführung 8
2 Grundlagen 10
2.1 Definition von Starkregen 10
2.2 Datengrundlage 14
2.3 Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsintensität und Niederschlagsmenge 16
3 Beobachtete Starkniederschläge in Süddeutschland 18
4 Änderungen in Vergangenheit und Gegenwart 22
5 Zukünftige Änderungen 27
6 Ausblick 31
7 Literaturverzeichnis 32

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vergleich der höchsten in Deutschland gemessenen Tagesniederschlagshöhen während der Starkregen-Episoden in den Frühsommern 2016 und 2018. 8

Abb. 2: Die höchsten je beobachteten Niederschlagsmengen in Deutschland und weltweit für Dauerstufen zwischen 1 Minute und 1.000.000 Minuten (~ 694 Tage). 11

Abb. 3: Räumliche Verteilung der korrespondierenden Wiederkehrzeit nach KOSTRA-DWD 2010R eines Ereignisses von 35 mm Niederschlag in 6 Stunden in Deutschland (Schwellenwert Warnkriterium „Unwetter“). 12

Abb. 4: Maximale gemessene einstündige Niederschlagssumme an Stationen des DWD mit zeitlich hochaufgelöster Niederschlagsmessung im Zeitraum 1951-2017. 13

Abb. 5: Links: Anzahl der verfügbaren Niederschlagsstationen des DWD pro Tag in Deutschland im Zeitraum 1951-2010. Rechts: Standorte von Stationen durchgängiger Messreihe (Fehlwerte < 10%) im Zeitraum 1951-2010. Blau: Tageswerte, rot: zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen. 15

Abb. 6: Gesamtanzahl der Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen des DWD für Starkregen. 19

Abb. 7: Starkregenereignisse in Baden Württemberg (1980-2016). 21

Abb. 8: Mittlere Änderung der Anzahl der Tage mit Niederschlägen > 20 mm, gemittelt über Deutschland für den Zeitraum 2070-2100 im Vergleich zu 1971-2000 pro Jahr, Szenario RCP8.5.. 28

Abb. 9: Mittlere jährliche Niederschlagsmenge oberhalb des 95. Perzentils, gemittelt über Deutschland für den Zeitraum 2070-2100 im Vergleich zu 1971-2000 pro Jahr, Szenario RCP8.5. 28

Abb. 10: Beispiel für eine Klimaprojektion CCLM5.0/MPI-ESM-LR/r1/RCP8.5 mit der Änderung der Niederschlagssumme für Dauerstufe 1 Stunde und einer Jährlichkeit 10 Jahre für die nahe Zukunft (NF 2021-2050) für das Sommerhalbjahr (SHY) und Winterhalbjahr (WHY) sowie analog für die ferne Zukunft (DF 2071-2100). 30

Abb. 11: Relative Änderung der Zellzahl und des maximalen, sowie mittleren Starkniederschlags im Sommerhalbjahr in den COSMO5.0_CLM9 2,8km-Simulationen angetrieben mit EC-EARTH im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 gegenüber 1976-2005 unter Annahme des RCP8.5-Szenarios. 30

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammenfassung der Aussagen relevanter Studien zum Langzeitverhalten der Niederschlagsmenge bei Starkregenereignissen in Gesamt- und Südwestdeutschland im Sommer bzw. Sommerhalbjahr. 24

Tab. 2: Zusammenfassung der Aussagen weiterer relevanter Studien zum Langzeitverhalten der Tage mit Starkniederschlagsereignissen in Gesamt- und Südwestdeutschland. 25

Zusammenfassung

In den letzten Jahren traten immer wieder räumlich begrenzte, aber z. T. extreme konvektive Starkregenereignisse in Deutschland auf. Lokal führten diese Ereignisse zu hohen Schäden, wie z. B. die Ereignisse in Braunsbach und Simbach im Mai/Juni 2016 sowie im Bayerischen Wald im Juni 2018 bezeugen. Aufgrund der hohen lokalen und letztlich auch regionalen Relevanz solcher Starkregenereignisse hat sich das Kooperationsvorhaben KLIWA dazu entschlossen, dem Thema mit einer im Frühjahr 2018 eingerichteten Arbeitsgruppe „Starkregen" eine stärkere Aufmerksamkeit entgegenzubringen.

Bei den Untersuchungen, die KLIWA im Bereich Starkregen seit Beginn der Kooperation regelmäßig durchgeführt hat, wurden lang andauernde Niederschlagsereignisse ($D \geq 24$ h) betrachtet. Zukünftig sollen in KLIWA zusätzlich vor allem kurzzeitige, speziell **ein- bis sechsstündige Starkregenereignisse** untersucht werden. Für Aussagen bezüglich der Änderung der Intensität und Häufigkeit von konvektiven Starkregenereignissen in Süddeutschland muss KLIWA daher aktuell auf bestehende Ergebnisse aus der Literatur zurückgreifen. Dieser Kurzbericht beschreibt die (Prozess-)Grundlagen und fasst den aktuellen Kenntnisstand zusammen.

Unter den Bedingungen des Klimawandels muss gemäß der **Clausius-Clapeyron-Gleichung** mit einer Zunahme der Wasserdampfmenge um ca. **7 % pro °C Erwärmung** gerechnet werden. Diese bedingt auch die Intensität von Niederschlagsereignissen, die somit mit vergleichbarer Rate ansteigt. Für den konvektiven Anteil des Niederschlagsgeschehens zeigen Untersuchungen sogar eine Zunahme der Intensität um bis zu **14 % pro °C Erwärmung**. Dies wird auch als **Super-Clausius-Clapeyron-Beziehung** bezeichnet.

Bei der regional differenzierten Quantifizierung dieser Änderung stellt die oftmals kleinräumige Ausdehnung von Starkregenereignissen sowie deren kurze Andauer eine Herausforderung dar. Mit Messstationen können Ereignisse nur punktuell und somit nicht räumlich vollständig erfasst werden. Des Weiteren basieren viele (lange) Niederschlagszeitreihen in Deutschland auf Tageswerten. Dies erschwert Aussagen hinsichtlich der Änderung der Intensität von konvektiven Starkniederschlägen in Raum und Zeit. Die flächendeckende Erfassung von Niederschlägen mittels Radar ermöglicht hingegen eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung, befindet sich in Deutschland allerdings erst seit 2001 im operativen Betrieb. Eine klimatologische Auswertung dieser Daten ist daher besonders im Bereich extremer Niederschlagsereignisse noch nicht möglich.

Generell scheinen besonders die **extremsten Starkniederschläge** und Niederschläge **kurzer Dauerstufen** zumindest in Teilen Süddeutschlands in den vergangenen Jahrzehnten **zugenommen** zu haben. Auf der täglichen Skala konnte im Winterhalbjahr eine Zunahme der Starkniederschlagsereignisse festgestellt werden. vgl. Kap. 4).

Im Hinblick auf zukünftige Änderungen von konvektiven Starkniederschlagsereignissen sind insbesondere Projektionen mit sogenannten **konvektionserlaubenden Modellen** vielversprechend. Ein von KLIWA durchgeführter Expertenworkshop hat gezeigt, dass diese Projektionen bereits heute das Potenzial haben, Aussagen über zukünftige Starkniederschlagsänderungen abzuleiten. Aktuell sind diese hochaufgelösten Klimaprojektionen allerdings nur in geringer Anzahl verfügbar und müssen weiter auf ihre Belastbarkeit geprüft werden. Daher ver-

folgt KLIWA aktuell das Ziel aus verschiedenen Quellen ein (kleines) Ensemble von hochaufgelösten Klimaprojektionen zusammenzustellen. Eine einzelne Projektion dieser Art auf Basis des Emissionsszenarios RCP8.5 liegt bereits für Süddeutschland vor und zeigt im **Sommerhalbjahr** im Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 in **weiten Teilen Süddeutschlands Zunahmen der Niederschlagsintensitäten für kurze Dauerstufen** (Laube et al. 2017).

Weitere für KLIWA relevante Ergebnisse zu zukünftigen Änderungen der Starkniederschlagsereignisse auf Basis von nicht-konvektionserlaubenden Modellen wurden im Rahmen von ReKliEs-De (HLNUG 2018a) gewonnen und sind aus dem bayerischen Projekt ClimEx (http://www.climex-project.org) zu erwarten. Die Analyse der Änderung des 95. Niederschlagperzentils der ReKliEs-De-Projektionen zeigt für 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000 auf Tagesbasis eine **Zunahme der Anzahl an Starkniederschlagsereignissen** und deren **Intensität**.

Generell sind im Themenfeld „Klimawandel und konvektive Starkniederschläge“ noch viele Aussagen mit großen Unsicherheiten behaftet, oder es ist auf Basis der vorliegenden Datengrundlage noch keine Aussage möglich. In den kommenden Jahren soll diese Lücke durch KLIWA verkleinert werden.

1 Einführung

Süddeutschland war in den vergangenen Jahren immer wieder von teils extremen Niederschlagsereignissen betroffen. Im rheinland-pfälzischen Donnersbergkreis fielen 2014 bis zu 140 mm Niederschlag in drei Stunden. 2015 waren Bretten, Bonndorf (beide Baden-Württemberg) und Oberstdorf (Bayern) Schauplätze extremer Niederschlagsereignisse. Mit Ausnahme des Ereignisses in Bonndorf wiesen alle diese Ereignisse eine statistische Wiederkehrzeit von über 100 Jahren auf (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) 2016). Im Mai und Juni 2016 wurden in Süddeutschland weitere extreme Niederschlagsereignisse, wie etwa am 29. Mai in Braunsbach (Baden-Württemberg) sowie am 01. Juni in Simbach am Inn (Bayern) verzeichnet (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2017). Auch der Frühsommer 2018 war über einen Zeitraum von mehreren Wochen von einzelnen, sich nur langsam verlagernden und daher sehr intensiven Starkregenereignissen mit z. T. mehr als 100 mm in nur wenigen Stunden geprägt. Vom 11. bis 13. Juni 2018 fielen bei stationären Unwettern vor allem in Bayern z. T. mehr als 100 mm Niederschlag in wenigen Stunden. Die Station „Mauth-Finsterau“ im Bayerischen Wald verzeichnete dabei eine Niederschlagssumme von 167 mm.

Die jeweils höchsten Tagesniederschlagsmengen der beiden in etwa gleich langen Starkniederschlagsperioden in den Frühsommern 2016 und 2018 sind in Abb. 1 dargestellt.

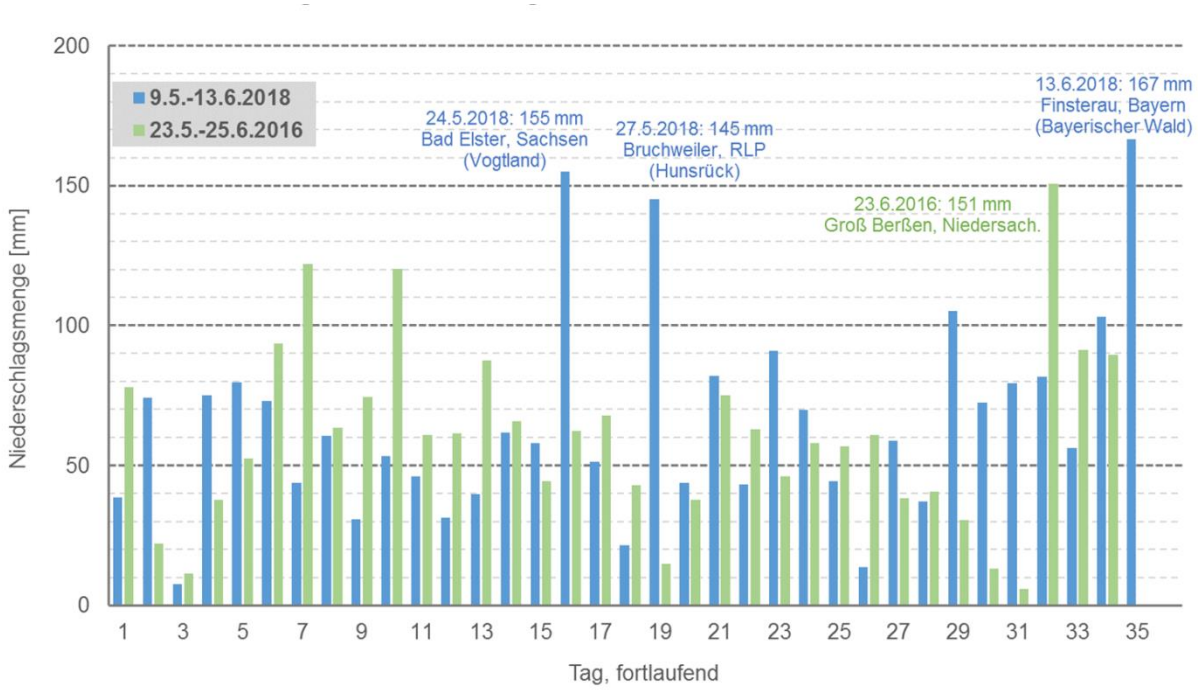

Abb. 1: Vergleich der höchsten in Deutschland gemessenen Tagesniederschlagshöhen während der Starkregen-Episoden in den Frühsommern 2016 und 2018 (Daten: Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes).

Unter dem Eindruck der Starkregenereignisse mit teils verheerenden Schäden in jüngster Vergangenheit rückt deren mögliche Änderung hinsichtlich Häufigkeit und Intensität in den Fokus von KLIWA-Untersuchungen. Abgesehen von den vergangenen und gegenwärtig beobachteten Änderungen sind auch mögliche zukünftige Änderungen von Interesse. Diese

grundlegenden Fragestellungen werden durch die 2018 eingerichtete KLIWA-Arbeitsgruppe „Starkregen“ (AG SR) bearbeitet. Neben den KLIWA-Partnern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) ist auch Hessen in dieser Arbeitsgruppe vertreten.

Ziel dieses Kurzberichts ist es, die nach dem aktuellen Stand der Forschung getroffenen Aussagen hinsichtlich der klimawandelbedingten Änderungen von konvektiven Starkregenereignissen in Süddeutschland zusammenzutragen, aber auch Fragen zu identifizieren, auf die derzeit noch keine belastbaren Antworten gegeben werden können.

Der Bericht ist wie folgt strukturiert: In Kap. 2 erfolgt die Definition des Begriffs „Starkregen“ wie er innerhalb der Kooperation KLIWA verwendet werden soll. Es werden die aktuell verfügbaren Datengrundlagen und Methoden der Erfassung und Auswertung vorgestellt, sowie auf die Grundlagen der (Stark-)Niederschlagsveränderung unter dem Einfluss des Klimawandels eingegangen. Kap. 3 charakterisiert beobachtete Starkregenereignisse in Süddeutschland. In Kap. 4 werden bereits beobachtete Änderungen der Starkniederschlagsmengen sowie der Starkniederschlagshäufigkeit und in Kap. 5 mögliche zukünftige Änderungen im Starkniederschlagsgeschehen beschrieben. Ein Ausblick auf das weitere Vorgehen, das KLIWA im Hinblick auf das Thema Starkregen plant, findet sich in Kap. 6.

2 Grundlagen

2.1 Definition von Starkregen

Eine Definition der Begrifflichkeit „Starkregen“ ist erforderlich, um einheitliche Auswertungen für die verschiedenen Zeiträume in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft zu schaffen. Zudem existiert bereits eine Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen in verschiedenen Anwendungsbereichen, die sich an jeweils unterschiedlichen Zielen orientieren. Die Kooperation KLIWA wird sich, wie im Folgenden beschrieben, eng an den Empfehlungen des DWD orientieren.

Als „Starkniederschlag“ oder „Starkregen“ werden im Allgemeinen Niederschläge mit ungewöhnlich hoher Intensität bezeichnet, d.h. mit großen Niederschlagsmengen pro Zeiteinheit. So warnt zum Beispiel der DWD vor Unwettern mit Starkregen, wenn Niederschlagsmengen von mehr als 25 mm in 1 Stunde oder 35 mm in 6 Stunden zu erwarten sind (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2018).

Neben der Betrachtung eines Schwellenwertes sind auch Definitionen auf Grundlage von Wiederkehrintervallen beziehungsweise Über-/Unterschreitungswahrscheinlichkeiten gebräuchlich, da die Ausprägungen von Starkregenereignissen global und regional stark variieren können.

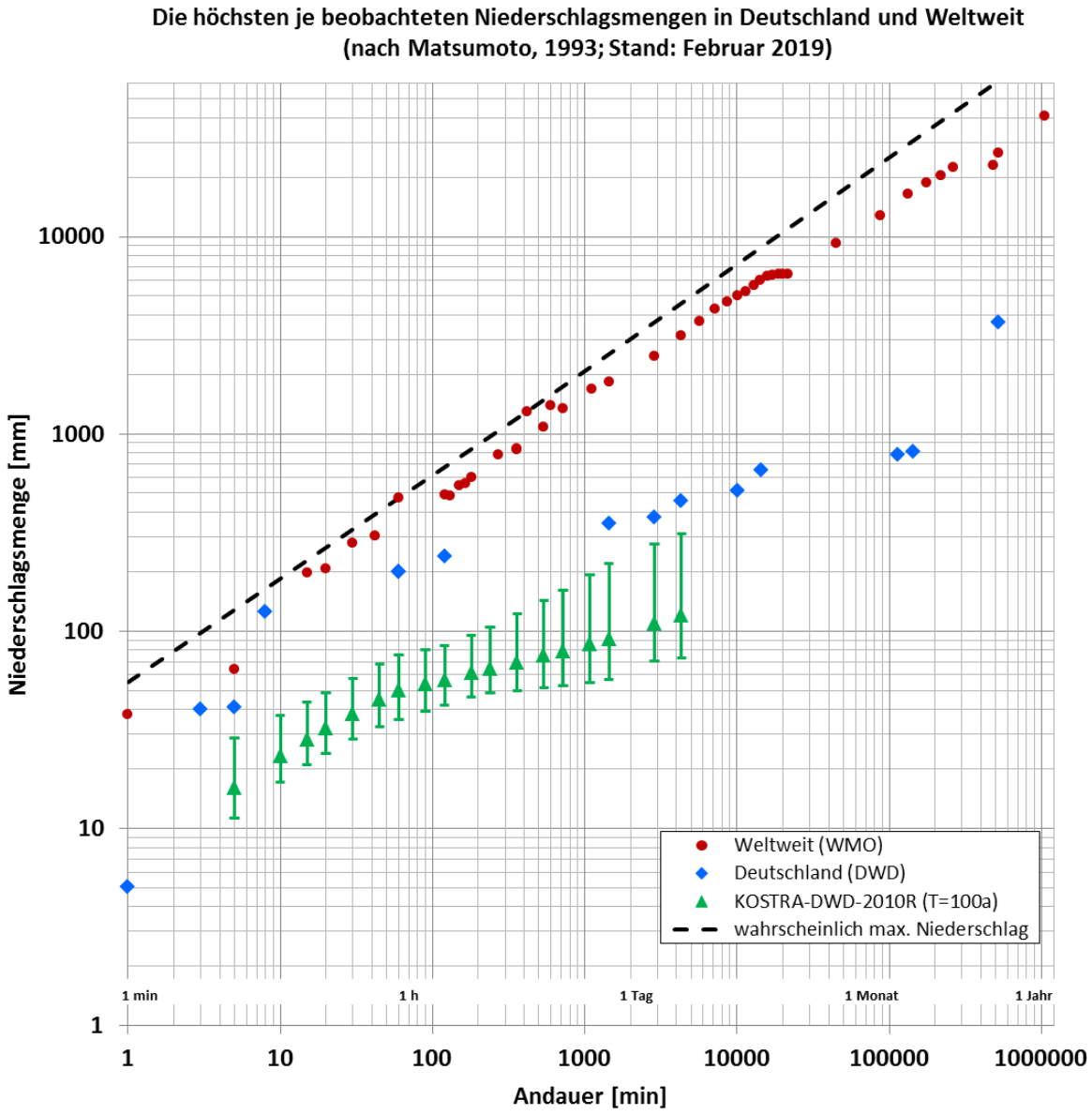

Abb. 2: Die höchsten je beobachteten Niederschlagsmengen in Deutschland (blaue Rauten) und weltweit (rote Punkte) für Dauerstufen zwischen 1 Minute und 1.000.000 Minuten (~ 694 Tage). Die schwarze gestrichelte Linie markiert die wahrscheinlich maximal möglichen Niederschläge (Probable Maximum Precipitation, PMP). In grün sind das Mittel (Dreiecke) und die Streubreite der statistisch 100-jährlichen Starkniederschlagshöhen für alle Rasterfelder von KOSTRA-DWD-2010R dargestellt.

In Abb. 2 sind die höchsten jemals beobachteten Niederschlagsmengen weltweit und die in Deutschland aufgetretenen höchsten Ereignisse für verschiedene Dauerstufen dargestellt. Zudem ist für einige Dauerstufen die Niederschlagsmenge markiert, die gemäß KOSTRA-DWD-2010R einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis entspricht, d. h. dieser Niederschlag tritt statistisch einmal in 100 Jahren auf (grüne Dreiecke und Balken). Die Darstellung des 100-jährlichen Niederschlagsereignisses in Form von Spannbreiten zeigt die regionalen Unterschiede der Starkniederschlagsintensität innerhalb Deutschlands.

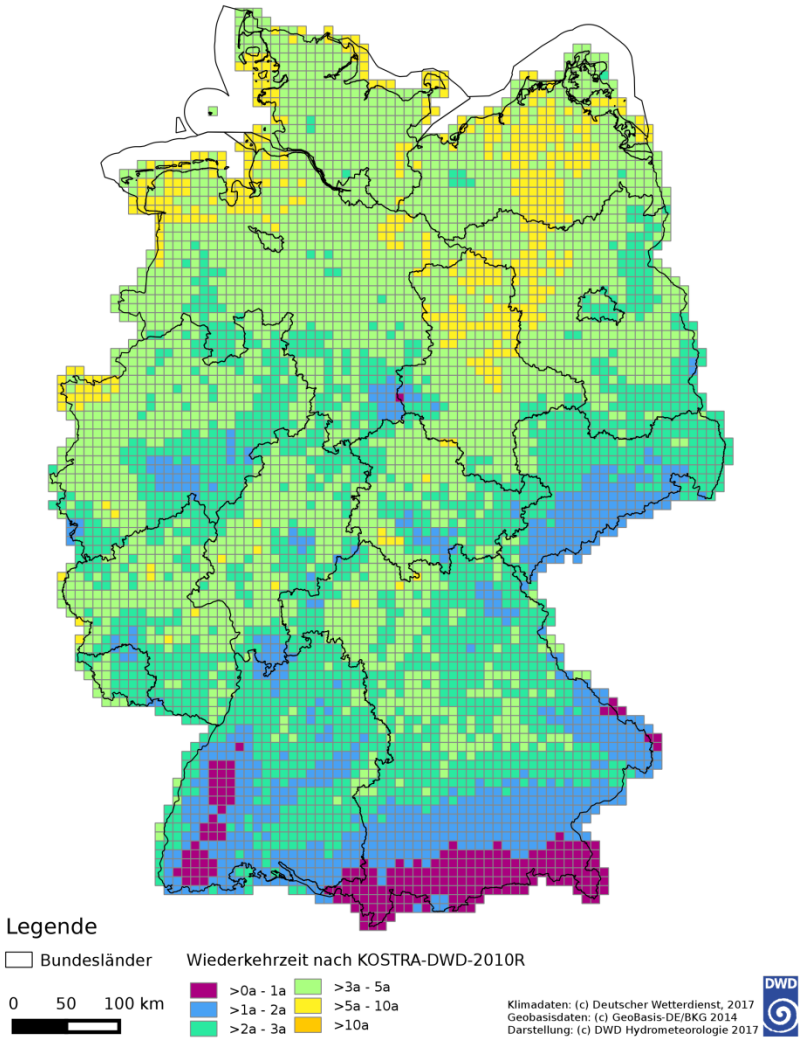

Abb. 3: Räumliche Verteilung der korrespondierenden Wiederkehrzeit nach KOSTRA-DWD 2010R eines Ereignisses von 35 mm Niederschlag in 6 Stunden in Deutschland (Schwellenwert Warnkriterium „Unwetter“).

Abb. 3 veranschaulicht die regionalen Unterschiede der Starkniederschlagsintensitäten in Deutschland. Dort ist auf Basis von KOSTRA-DWD-2010R die räumliche Verteilung der korrespondierenden Wiederkehrzeit eines Niederschlags von 35 mm in 6 Stunden dargestellt. Generell lässt sich aus dieser Abbildung erkennen, dass vergleichbare Niederschlagsereignisse in Süddeutschland eine kleinere Wiederkehrzeit aufweisen, als in Norddeutschland. Zum Beispiel treten Niederschlagssummen von 35 mm innerhalb von 6 Stunden im Raum München statistisch alle 1-2 Jahre auf, in Hamburg dagegen nur alle 3-5 Jahre und in einigen Gebieten im Nordosten Deutschlands sogar nur alle 5-10 Jahre.

Aus dem in Abb. 3 erkennbaren Nord-Süd-Gradienten hinsichtlich der Wiederkehrzeit verschiedener Starkniederschlagsintensitäten lässt sich allerdings nicht ableiten, dass die höchsten je gemessenen Niederschlagssummen in Deutschland verstärkt in Süddeutschland aufgetreten sind. Abb. 4 zeigt die maximale gemessene einstündige Niederschlagssumme an Stationen des DWD mit zeitlich hochaufgelöster Niederschlagsmessung im Zeitraum 1951-2017. Ein räumliches Muster der Niederschlagsmengen lässt sich nicht erkennen.

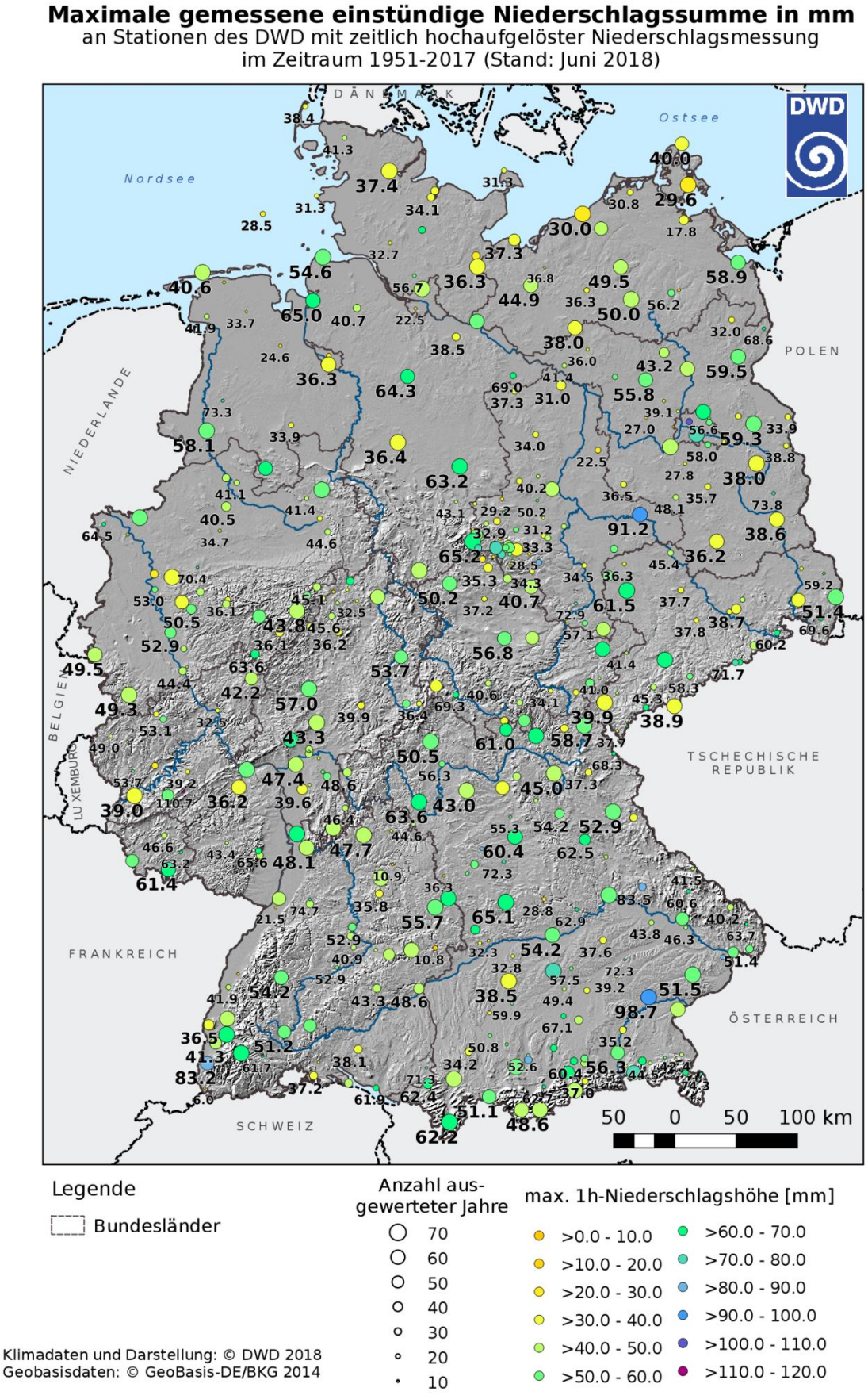

Abb. 4: Maximale gemessene einstündige Niederschlagssumme an Stationen des DWD mit zeitlich hochaufgelöster Niederschlagsmessung im Zeitraum 1951-2017.

Das Auftreten von erheblichen Niederschlagsmengen wird in Deutschland hauptsächlich durch zwei Niederschlagstypen bestimmt:

a. großflächige und zum Teil lang andauernde (mehrere Stunden bis wenige Tage), aber vergleichsweise weniger intensive stratiforme Niederschläge, sowie

b. kleinskalige (lokale) und zumeist kürzere (Minuten bis mehrere Stunden) hochintensive konvektive Niederschläge.

Je nach Starkniederschlagstypus, muss die betrachtete Dauerstufe angepasst werden. Da im Rahmen der KLIWA-AG SR der Fokus vorrangig auf kleinskaligen und kurzen Niederschlägen liegt, werden vergleichsweise kurze Dauerstufen gewählt.

Für Untersuchungen und Auswertungen in KLIWA orientiert sich die Arbeitsgruppe daher an den Warnstufen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für „Markantes Wetter" (Stufe 2) sowie „Unwetter" (Stufe 3) (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2018):

- **Markantes Wetter**
  - **> 15 bis 25 mm in 1 Stunde**
  - **> 20 bis 35 mm in 6 Stunden**
- **Unwetter**
  - **> 25 mm in 1 Stunde**
  - **> 35 mm in 6 Stunden**

Diese Schwellenwerte werden zum einen in der Praxis häufig als Starkregendefinition verwendet, zum anderen ist die Anzahl darin inbegriffener Ereignisse im Gegensatz zu höheren Schwellenwerten in der Regel ausreichend hoch um statistische Auswertungen vornehmen zu können.

In der Vergangenheit wurden sowohl in KLIWA, als auch in vielen anderen Studien Niederschlagsereignisse der Dauerstufe 24 h ebenfalls als „Starkregenereignisse" bezeichnet. Niederschlagsereignisse der Dauerstufe 24 h können jedoch sowohl kleinskalige, zumeist kürzere hochintensive konvektive Niederschläge („Niederschlagstyp b"), als auch lang andauernde, vergleichsweise weniger intensive stratiforme Niederschläge („Niederschlagstyp a") umfassen. Beide Niederschlagstypen sind bei einer Dauerstufe von 24 h folglich nicht klar voneinander trennbar. Um (neue) Ergebnisse basierend auf kürzeren Dauerstufen („Niederschlagstyp b") besser in den Kontext vergangener Auswertungen bringen zu können, soll die Dauerstufe 24 h jedoch weiterhin mitbetrachtet werden, auch wenn diese ebenfalls Ereignisse des „Niederschlagstyps a" umfasst, welche im Rahmen der AG SR nicht mehr als Starkregen, sondern als maximale eintägige Niederschläge bezeichnet werden.

Des Weiteren soll auch dem Umstand der regional unterschiedlichen Wiederkehrintervalle Rechnung getragen werden, sodass Auswertungen in Perzentilen betrachtet werden.

2.2 Datengrundlage

Zur Untersuchung der Änderung der Häufigkeit von Starkniederschlägen und/oder der Niederschlagsmenge von Starkniederschlagsereignissen unter Beachtung der Definition in Kapitel 2.1 sind Messdaten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung notwendig. Dem DWD

liegen derzeit für den Zeitraum 1951-2010 Daten von im Mittel rund 3.500 Stationen vor. Davon besitzen nur rund 1.500 Standorte eine durchgängige Messzeitreihe (Fehlwerte < 10 %) seit 1951. Dabei handelt es sich vor allem um Zeitreihen in täglicher Auflösung. Zeitlich höher aufgelöste Messdaten stehen in diesem langen Zeitraum momentan lediglich an rund 100 Stationen innerhalb Deutschlands zur Verfügung. Ende der 1980er bzw. Anfang der 1990er Jahre wurden erste elektronische Niederschlagssensoren eingeführt. Aber erst Anfang der 2000er Jahre wurde damit begonnen das Messnetz großflächig auf digitale und zeitlich hochaufgelöste Niederschlagsmessung umzurüsten. Diese Entwicklung kann anhand von Abb. 5 nachvollzogen werden. Aktuell messen etwa 1.200 DWD-Stationen den Niederschlag hochaufgelöst.

Der DWD beabsichtigt im Projekt MUNSTAR („Methodische Untersuchungen zur Novellierung der Starkregenstatistik für Deutschland“, Laufzeit 2018 bis 2021) u. a. die Datenbasis für künftige Auswertungen deutlich zu verbessern. Dazu gehört eine Konsolidierung der Daten des DWD mit Daten aus Partnermessnetzen (z. B. den Messnetzen der Bundesländer), aber auch die weitere Aufarbeitung historischer Daten.

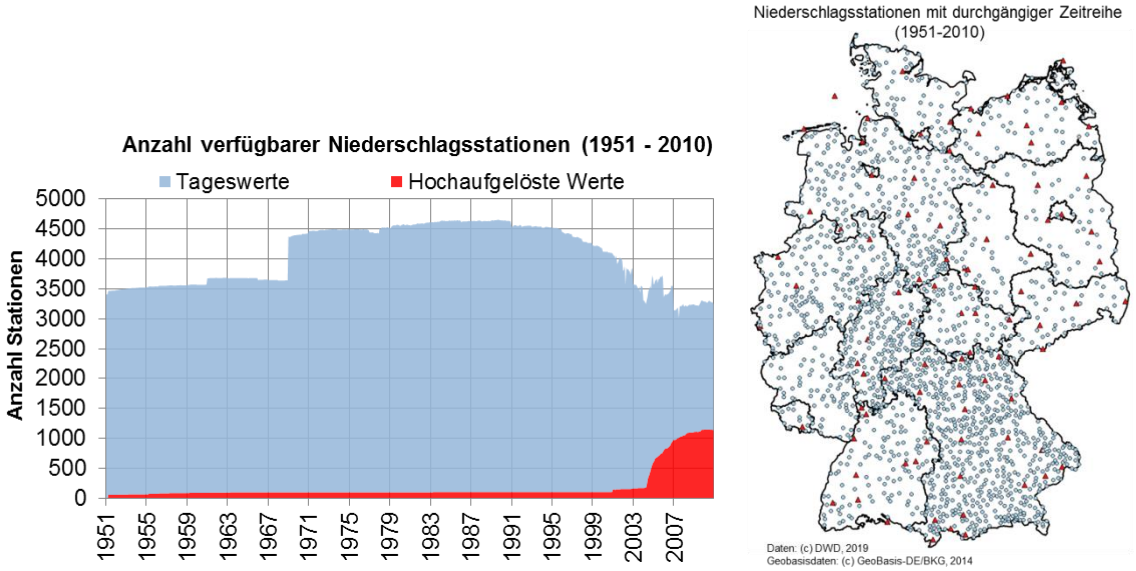

Abb. 5: Links: Anzahl der verfügbaren Niederschlagsstationen des DWD pro Tag in Deutschland im Zeitraum 1951-2010. Rechts: Standorte von Stationen durchgängiger Messreihe (Fehlwerte < 10%) im Zeitraum 1951-2010. Blau: Tageswerte, rot: zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen.

Wird die Anzahl der Messstationen/Messdaten unter Berücksichtigung der geringen räumlichen Ausdehnung von Starkregenereignissen, mit der Fläche Deutschlands verglichen, wird deutlich, dass Aussagen über Veränderungen der Starkniederschlagshäufigkeit und -menge nur sehr eingeschränkt möglich sind. Bereits seit den 1960er Jahren werden daher in Deutschland, zunächst vereinzelt und nicht flächendeckend, Radargeräte zur Unterstützung der Wetterbeobachtung eingesetzt. Der Vorteil von Radarmessungen liegt in der flächenhaften Erfassung des Niederschlagsgeschehens, jedoch handelt es sich um ein indirektes Fernerkundungsverfahren, sodass zunächst nur qualitative Informationen gewonnen werden können und zudem verschiedenste Probleme in der Erfassung (z. B. infolge Radarabschattung) bestehen können.

Der Deutsche Wetterdienst hat im Jahr 2013 damit begonnen, die ab dem Jahr 2001 flächendeckend vorhandenen digitalen Radardaten aufzubereiten und auszuwerten. Trotz der vergleichsweise kurzen Zeitreihe, konnten bereits viele neue Erkenntnisse zum Prozessverständnis gewonnen werden (vgl. Kap. 4). Belastbare klimatologische Aussagen können aber aufgrund der zu kurzen Zeitspanne derzeit noch nicht getroffen werden (Winterrath et al. 2017).

Für Untersuchungen der zukünftigen Entwicklung von Starkniederschlägen müssen Daten aus regionalen Klimaprojektionen verwendet werden. Dabei ist für belastbare Aussagen besonders darauf zu achten, dass die zugrundeliegenden Prozesse auch vom Modell wiedergegeben werden können, was u.a. auch bedeutet, dass die räumliche und zeitliche Auflösung adäquat sein muss.

2.3 Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsintensität und Niederschlagsmenge

Bevor in den folgenden Kapiteln Änderungen in den Eigenschaften von Starkniederschlägen beschrieben werden, wird zunächst auf den physikalischen Zusammenhang zwischen einer erhöhten Lufttemperatur und (Stark-)Niederschlagsveränderungen, sowie die generelle Evaluierung/Validierung dieses Zusammenhangs in verschiedenen Studien eingegangen.

Die Niederschlagsintensität nimmt, wenn genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht, um ca. 7 % pro Grad Celsius Erwärmung zu (u a. Trenberth 1999; Trenberth et al. 2003). Dieser Zusammenhang lässt sich aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung (Clapeyron 1834; Clausius 1850) ableiten, wenn die plausible Annahme gleichbleibender relativer Feuchte gemacht wird.

Aktuelle Veröffentlichungen weisen jedoch darauf hin, dass nach Überschreiten eines bestimmten Temperaturlimits die Intensität extremer Niederschläge zurückgeht. Wang et al. (2017) zeigen anhand von Stationsdaten, Reanalysen und verschiedenen Klimamodellen, dass eine mögliche Temperaturlimitierung (zumeist bezogen auf die Tagesmitteltemperatur) zwischen ca. 10 °C und 25 °C in den mittleren und hohen Breiten je nach Studie und Region liegt. Anhand von Klimamodellen zeigen die Autoren, dass sowohl das Temperaturlimit als auch das Niederschlagsintensitätsmaximum mit zunehmender Erwärmung ansteigen (in den mittleren und hohen Breiten gemäß der Clausius-Clapeyron-Beziehung) (Wang et al. 2017).

Für Deutschland analysierten Berg et al. (2013) und Berg & Haerter (2013) die Beziehung zwischen Temperatur und Niederschlag anhand von Messdaten, getrennt nach stratiformen und konvektiven Niederschlagstypen. Sie fanden heraus, dass stratiforme Niederschlagsmengen entsprechend der Clausius-Clapeyron-Beziehung mit der Temperatur ansteigen. Für starke konvektive Niederschläge in einem Temperaturbereich zwischen ca. 10 und 20 °C liegt der Anstieg allerdings deutlich über dem Wert der Clausius-Clapeyron-Beziehung und kann bis zu 14 % pro Grad Celsius Erwärmung betragen (z. B. Berg et al. 2013). Dieser Effekt wird auch als Super-Clausius-Clapeyron-Phänomen bezeichnet. Das zuvor erwähnte Temperaturlimit, über dem die Niederschlagsintensität nicht mehr ansteigt bzw. zurückgeht, liegt in diesen Studien bei einer Tagesmitteltemperatur von ca. 22 °C.

Durch den Temperaturanstieg steigt auch die Verdunstung und der globale Wasserkreislauf intensiviert sich. Dieser Anstieg ist aber geringer als der Anstieg im Wasserdampf. Die globale Niederschlagsmenge steigt unter Annahme plausibler Szenarien um 1-3% pro 1°C Erwärmung (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2013). Da die Intensität der Nie-

derschlagsereignisse stärker steigt als die Niederschlagsmenge, muss die globale Anzahl der der Niederschlagsereignisse durch die Erwärmung zurückgehen (Trenberth 2003).

3 Beobachtete Starkniederschläge in Süddeutschland

Die in Kap. 2 beschriebenen Starkregenereignisse von 2016 und 2018 haben in Deutschland stark zur Sensibilisierung der Bevölkerung und der Kommunen bezüglich Starkregen beigetragen. Derlei Ereignisse sind hierzulande allerdings kein neues bzw. unbekanntes Phänomen. Auch aus der weiter zurückliegenden Vergangenheit sind verschiedene Starkregenereignisse in Süddeutschland dokumentiert. Einen Überblick über historische Hochwasserereignisse in Bayern liefert beispielsweise die Veröffentlichung „Leben mit dem Fluss – Hochwasser im Spiegel der Zeit“. Dort finden sich Hinweise auf verschiedene teils verheerende Starkregenereignisse. Für die Stadt Immenstadt im Allgäu wird beispielsweise berichtet: „Am 23. August 1846 wurde in Folge eines Wolkenbruches der obere Teil des Städtchens unter Wasser gesetzt. Der Steigbach trat aus seinem Bett […] und brachte alles mit was ihm im Wege lag: Holz und Steine. Brücken und Stege wurden bedeutend beschädigt. Diese Katastrophe wiederholte sich am 30. und 31. August.“ (Bernhardt 2008). Jedoch sind solche Ereignisse heute weniger bekannt, da sich eine flächendeckende Wetterbeobachtung erst Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte und solche Ereignisse z. B. nur in historischen Texten zu finden sind. Die bisher größte Tagesniederschlagssumme wurde am 12. August 2002 in Zinnwald im Erzgebirge gemessen. An diesem Tag fielen durch intensiven, langanhaltenden Dauerregen, der zeit- und gebietsweise noch konvektiv verstärkt wurde, rund 353 mm Niederschlag in 24 h (Rudolf & Rapp 2003).

Basierend auf den seit 2001 vorliegenden flächendeckenden Radardaten (s. Kap. 2.2) hat der DWD Auswertungen zu den Überschreitungshäufigkeiten verschiedener Warnstufen durchgeführt. Diese sind für den Zeitraum 2001-2016 in Abb. 6 dargestellt. Hier zeigt sich, dass die gesamte Bundesrepublik in diesem Zeitraum von Starkniederschlägen betroffen war. Für die Gesamtzahl der Starkniederschlagsereignisse der Stufe 2 ist noch ein Zusammenhang mit der Orographie erkennbar (Abb. 6 linke Karte). Im Übergang zu extremen Ereignissen (Stufe 3 und 4) scheint die Orographie hingegen immer mehr an Bedeutung zu verlieren (Abb. 6 mittlere und rechte Karte).

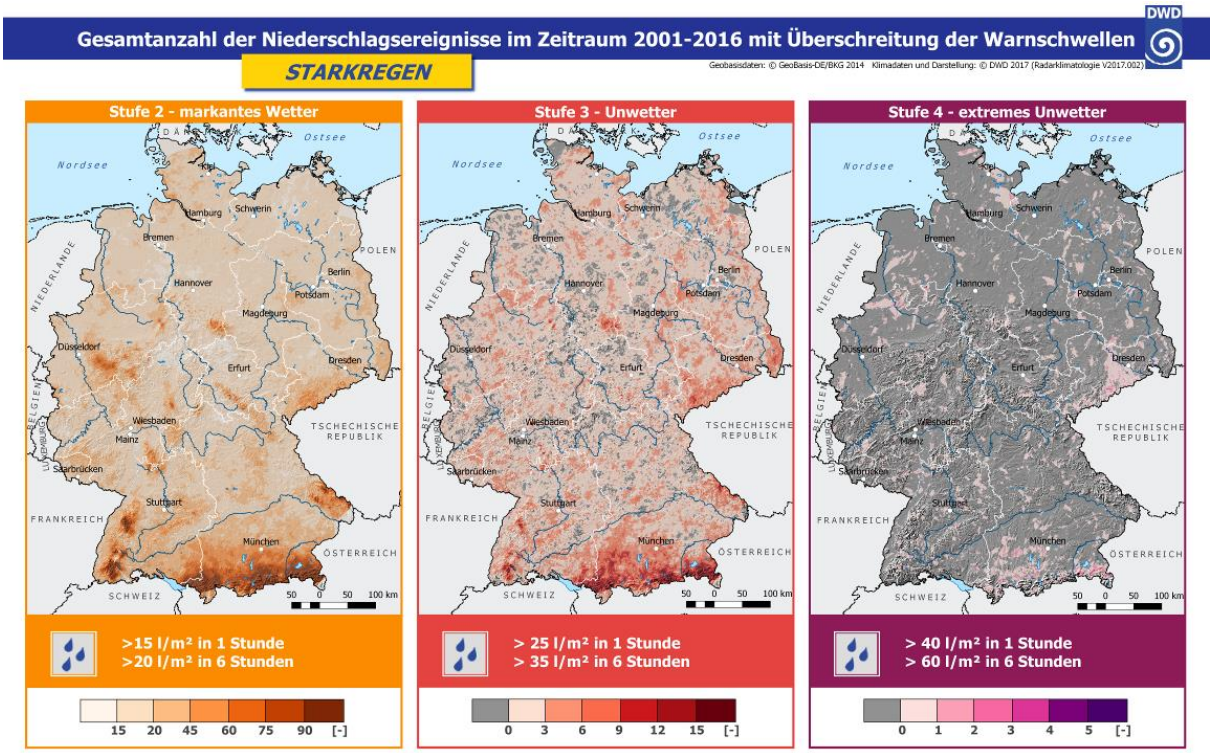

Abb. 6: Gesamtanzahl der Niederschlagsereignisse im Zeitraum 2001-2016 mit Überschreitung der Warnschwellen des DWD für Starkregen.

Generell treten kurzzeitige, heftige Starkregenereignisse in Deutschland vor allem im Sommerhalbjahr auf. Für Hessen wurden im Rahmen des Projektes KLIMPRAX-Starkregen in einer Masterarbeit (Brieber 2018) Niederschlagsdaten zweier Messnetze (Deutscher Wetterdienst und Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) in einer Auflösung von einer Minute zusammengetragen und aufbereitet. Ziel war die Identifizierung räumlicher Niederschlagsschwerpunkte durch die Verwendung von 126 Stationen im Zeitraum 2000 bis 2016, in dem eine gute Datenverfügbarkeit in dieser hohen Auflösung vorlag. Damit konnte ein deutlich dichteres Messnetz hochaufgelöster Niederschlagsmessungen ausgewertet werden, als zuvor für solche Untersuchungen verfügbar war. Systematische Unterschiede in den sehr hohen Auflösungsstufen (1 und 5 Minuten) in beiden Messnetzen machten es notwendig, die Daten auf 15 Minuten zu aggregieren. Die Starkniederschlagssaison in Hessen konnte auf den Zeitraum von ca. Mitte April bis Mitte September, mit einem Kernzeitraum Anfang Mai bis Mitte August, eingegrenzt werden. Gleichzeitig zeigt die Arbeit, dass im Zeitraum von ca. 14 bis 19 Uhr MEZ mit den stärksten Niederschlagsereignissen gerechnet werden muss. Räumliche Muster ergeben sich für die Starkniederschlagsverteilung – im Unterschied zu den hohen Tagessummen – kaum. Dies bestätigt die bereits aus den Radardaten für Hessen erzielte Erkenntnis, dass intensive Starkniederschläge in Hessen keine belastbaren räumlichen Muster aufweisen. Intensive 15-minütige Niederschläge sind im Sommerhalbjahr zumeist bei südlichen Anströmrichtungen sowie zentralen Tiefdruckgebieten zu erwarten. Die mit Abstand bedeutsamste Wetterlage für Hessens Starkniederschlagsklimatologie ist die Troglage Westeuropa, gefolgt von der zyklonalen Südwestlage.

Weitere Untersuchungen zur Änderung von Wetterlagen, die in Süddeutschland konvektive Starkniederschläge begünstigen, sind aus dem Projekt WETRAX+ zu erwarten. Im Vorläu-

ferprojekt WETRAX wurden bereits Untersuchungen zu Wetterlagen, die stratiforme Niederschläge begünstigen, durchgeführt.

Die Schwächen vorhandener Datengrundlagen, wie in Kap. 2.2 bereits beschrieben, werden anhand von Abb. 7 verdeutlicht. Dargestellt ist ein Ereigniskatalog für Baden-Württemberg bestehend aus über 300 Starkregenereignissen im Zeitraum 1980 bis 2016. Für einen Großteil der Ereignisse (insbesondere bei den weiter in der Vergangenheit liegenden) sind keine Angaben zur Niederschlagsmenge verfügbar. Auch fehlt bei vielen Ereignissen eine Angabe zur Ereignisdauer. Informationen zur Intensität vieler Ereignisse können daher ebenfalls nicht abgeleitet werden. Erkennbar ist jedoch, dass es in Baden-Württemberg keine Region gibt, in der in diesem Zeitraum kein Starkregenereignis stattgefunden hat. In einigen Regionen scheint Starkregen hingegen vermehrt aufgetreten zu sein.

Durch das bereits erwähnte Verbundprojekt MUNSTAR, wird in den nächsten 3 bis 5 Jahren eine verbesserte Datengrundlage und damit auch eine höhere Aussagefähigkeit hinsichtlich der Starkniederschlagsentwicklung seit 1951 erwartet. Die AG SR plant basierend auf den dort gewonnen Ergebnissen die Erstellung von nach Dauerstufen gegliederten Tabellen und Karten zu den bisher gemessenen stärksten Niederschlagsereignissen vergleichbar zu Abb. 4.

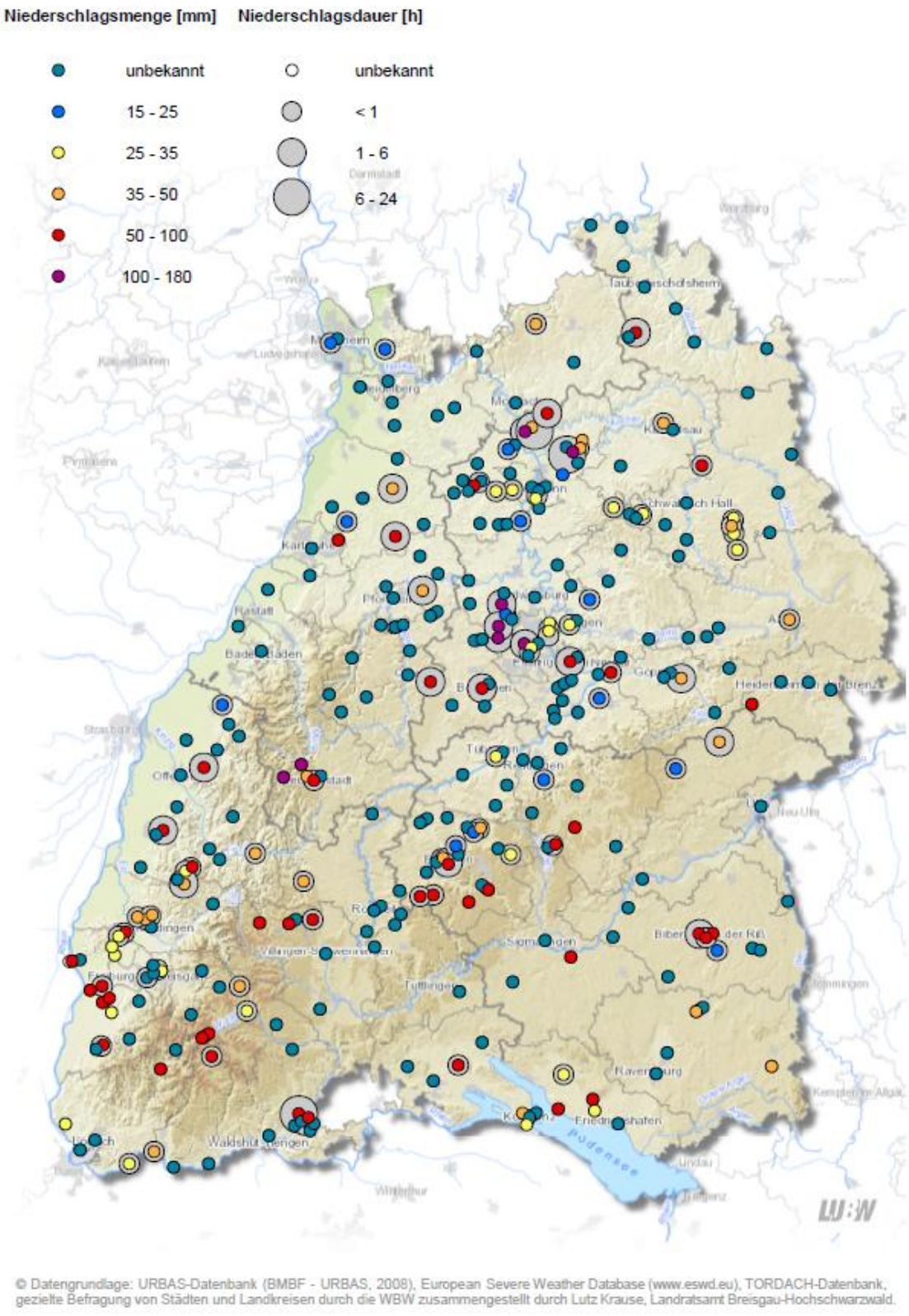

Abb. 7: Starkregenereignisse in Baden Württemberg (1980-2016), Datengrundlagen: URBAS-Datenbank (BMBF – URBAS, 2008), European Severe Weather Database (www.eswd.eu), die TORDACH-Datenbank sowie eine gezielte Befragung von Städten und Landkreisen durch die WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH. (LUBW, Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg, Seite 14).

4 Änderungen in Vergangenheit und Gegenwart

Für das europäische Festland weisen Fischer & Knutti (2016) anhand von Klimamodellsimulationen und Beobachtungen nach, dass es nicht nur wie in Kapitel 2.3 beschrieben theoretisch begründet ist, sondern im Vergleich der Zeiträume 1981-2013 und 1951-1980 bereits beobachtet wurde, dass Starkniederschläge in ihrer Intensität und Häufigkeit zunehmen. Diese Zunahme ist umso größer, je intensiver und seltener die betrachteten Ereignisse sind. Für Russland und die früheren Sowjetrepubliken haben Ye et al. (2017) Anteile und Charakteristika von konvektiven und stratiformen Niederschlagstypen analysiert. Der in den vergangenen Jahrzehnten auch in der früheren Sowjetunion beobachtete Temperaturanstieg ging demnach mit einem Rückgang stratiformer und einem Anstieg konvektiver Niederschlagsereignisse einher (Ye et al. 2017). Eine ähnliche Schlussfolgerung ist auch für Europa, basierend auf den Erkenntnissen von Fischer & Knutti (2016), zu vermuten.

Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes (Becker et al. 2016) zeigen, dass die Intensität von täglichen Niederschlagssummen im Winter im Zeitraum 1951-2006 in Deutschland um ca. 25 % zugenommen hat. Für den Sommer lässt sich eine solche Aussage aufgrund der starken Jahr-zu-Jahr Schwankungen nicht treffen. Für die Untersuchung von subtäglichen Niederschlagswerten liegen flächendeckend keine langen Datenreihen vor (vgl. Kap. 2.2). Bisher scheint sich eine Intensivierung der stärksten Stundenereignisse (99. Perzentil, d h. der Wert wird einmal in 100 Tagen überschritten) anzudeuten. Hier sind aber noch weitere Studien und längere Zeitreihen erforderlich, um belastbare Aussagen zu treffen (Becker et al. 2016).

Eine Vielzahl an Studien hat sich mit dem Langzeitverhalten der sommerlichen Starkregenereignisse in Gesamt- bzw. Südwestdeutschland beschäftigt (Tab. 1). In der Regel definieren die Studien Starkniederschläge über ein hohes Quantil der täglichen Niederschlagssumme. Zusammenfassend ergibt sich ein uneinheitliches Bild der vergangenen Entwicklung der Starkniederschlagsmengen. In den meisten Studien zeigen sich je nach Region und Starkregendefinition sowohl Zu- als auch Abnahmen der täglichen Starkniederschlagsmengen.

Im Rahmen des Projektes KLIMPRAX-Starkregen durchgeführte Untersuchungen anhand hochaufgelöster Daten deuten an, dass für Hessen vor allem die hochintensiven Starkregenereignisse im Vergleich der Perioden 1991-2015 und 1961-1990 zugenommen haben. Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Damster 2018) wurde für West- und Mitteldeutschland anhand von 19 Stationen mit Daten in fünfminütiger Auflösung untersucht, ob im Zeitraum 1961-2015 Trends hochintensiver Niederschläge identifizierbar sind. Starke Änderungssignale treten vor allem bei fünfminütigen und stündlichen Daten auf, während für Tagesdaten kaum Änderungen zu finden sind. Für Baden-Württemberg wurde eine Zunahme der Niederschlagsmenge bei Starkregenereignissen von unter 6 Stunden ermittelt. Durchschnittlich betrug die Zunahme 10 % im Zeitraum 1981-2003 im Vergleich zum Zeitraum 1958-1980. Diese Zunahme ist jedoch für kürzere Dauerstufen noch deutlich höher (Beck 2013). Auch in Nordrhein-Westfalen wurden sehr lange Zeitreihen extrem hochaufgelöster Niederschlagsdaten (ein- und fünfminütige Daten) ausgewertet und ein Anstieg vor allem der hochintensiven Ereignisse beobachtet (Mueller & Pfister 2011; Fiener et al. 2013).

Jedoch führt der Wechsel zu modernen Messgeräten ab Anfang der 1990er Jahre auch zu Inhomogenitäten in den Messzeitreihen. Die in den Studien identifizierten Zunahmen sind vermutlich zumindest teilweise auf eine Verbesserung der Erfassungsmethodik zurückzuführen.

Welchen Anteil klimatologische Veränderungen dabei haben, ist in weiterführenden Analysen zu untersuchen (z. B. im Projekt MUNSTAR). Die Trends in Richtung intensiverer Niederschläge vor allem sehr kurzer Dauerstufen ordnen sich jedoch gut in theoretische und beobachtete Erkenntnisse für Deutschland (Berg et al. 2013) und Europa (Fischer & Knutti 2016) ein.

Neben dem Langzeitverhalten der Niederschlagsmengen wurde auch das Langzeitverhalten der Anzahl an Starkniederschlagstagen in Gesamt- und Südwestdeutschland untersucht (Tab. 2). Die Anzahl an zur Verfügung stehenden Studien ist hier deutlich geringer, auch wurde hier häufig keine Unterteilung in Sommer- und Winterereignisse durchgeführt. Wie auch in Tab. 1 kann die Definition eines Starkregentages zwischen einzelnen Studien variieren. Die Mehrzahl an zur Verfügung stehenden Studien hat einen Anstieg der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ermittelt.

Tab. 1: Zusammenfassung der Aussagen relevanter Studien zum Langzeitverhalten der Niederschlagsmenge bei Starkregenereignissen in Gesamt- und Südwestdeutschland im Sommer bzw. Sommerhalbjahr.

	Daten	Definition	Veränderung	Signifikanz	Zeitraum	Quelle
			Deutschland			
↓	301 Stationen	90 % Quantil tägl. Niederschlag	Abnahme	teilweise	1951-2000	Schönwiese et al. 2005
↑↓	> 1000 Stationen	99 % Quantil tägl. Niederschlag	Zu- und Abnahmen	k.A.	1951-2006	Becker et al. 2016
↓↑	> 2300 Stationen	95 % Quantil tägl. Niederschlag	Abnahmen, teilweise Zunahmen	teilweise	1952-2006	Murawski et al. 2016
↑↓	2072 Stationen	90 % Quantil tägl. Niederschlag, maximaler tägl. Niederschlag	Zu- und Abnahmen	selten	1951-2006	Hattermann et al. 2013
			Westdeutschland			
↓	> 2000 Stationen	95 % Quantil tägl. Niederschlag	Abnahmen um bis zu 8 % pro Jahrzehnt	teilweise	1950-2004	Zolina et al. 2008
			Deutsches Rheineinzugsgebiet			
↓↑	611 Stationen	90 % Quantil tägl. Niederschlag	Abnahmen, teilweise Zunahmen	selten	1958-2001	Hundecha und Bárdossy 2005
			Hessen und Umgebung			
↓	674 Stationen (10 Stationen)	99 % Quantil tägl. Niederschlag	Abnahme	teilweise	1951-2000 (1901-2003)	Schönwiese 2012
			Süddeutschland			
↑↓	<132 Stationen	95 % Quantil tägl. Niederschlag	Zunahmen um bis zu 15 %,	vorwiegend	1901-2000	Schönwiese et al. 2005

			vereinzelt Abnahmen			
↑↓	Gebietsmittel	Maximaler tägl. Niederschlag	Zu- und Abnahmen	selten	1931-2010	KLIWA 2011
↑↓	Gebietsmittel	Maximaler tägl. Niederschlag	Zu- und Abnahmen	selten	1931-2015	KLIWA 2016
			Baden-Württemberg			
↓	104 Stationen	5 höchsten Tageswerte pro Jahr	Abnahme	selten	1991-2003	Beck 2013
→	40 Stationen	5 höchsten Stundenwerte pro Jahr	Keine Änderung		1991-2003	Beck 2013
			Bayern			
→	104 Stationen	5 höchsten Tageswerte pro Jahr	Keine Änderung		1990-2006	Beck 2013
↑	40 Stationen	5 höchsten Stundenwerte pro Jahr	Zunahme	hoch	1990-2006	Beck 2013

Tab. 2: Zusammenfassung der Aussagen weiterer relevanter Studien zum Langzeitverhalten der Tage mit Starkniederschlagsereignissen in Gesamt- und Südwestdeutschland.

	Daten	**Definition**	**Veränderung**	**Signifikanz**	**Zeitraum**	**Jahreszeit**	**Quelle**
			Deutschland				
↑	83 Stationen	99 % Quantil tägl. Niederschlag	Zunahme im Sommer um 13 %, im Winter um 49 %	teilweise	1901-2000	Gesamt	Malitz et al. 2011
			Westdeutschland				
↑	< 2072 Stationen	Mind. 20 mm/Tag	Zunahme, insbesondere im Süden	teilweise	1951-2006	Gesamt	Hattermann et al. 2013

			Emscher-Lippe				
↑	8 Stationen	Niederschlagsmenge 1-6 mm, Dauerstufen 1-30 min	Zunahme um bis zu 0,5 Ereignisse/Jahr		1940-2009 1975-2009	Gesamt	Mueller und Pfister 2011, Fiener et al. 2013
			Deutsches Rheineinzugsgebiet				
↓	611 Stationen	Mind. 90 % Quantil tägl. Niederschlag	Abnahme im Mittel um -21 %		1958-2001	Sommer	Hundecha und Bárdossy 2005
↑	611 Stationen	Mind. 90 % Quantil tägl. Niederschlag	Zunahme im Mittel um 56 %		1958-2001	Winter	Hundecha und Bárdossy 2005
			Nordrhein-Westfalen				
↑	184 Stationen	Mind. 20 mm/Tag,	Zunahme	teilweise	1950-2008	Gesamt	NRW 2010
↑↓	184 Stationen	Mind. 30 mm/Tag, Dauerstufen 5 min - 12 h	Zu- und Abnahmen	teilweise	1950-2008	Gesamt	NRW 2010
↑	184 Stationen	Dauerstufen 5-60 min	Zunahmen	nein	1950-2008	Gesamt	NRW 2010

5 Zukünftige Änderungen

Die bereits zu beobachtenden Klimaveränderungen werden sich wahrscheinlich in Zukunft weiter verstärken. Es muss von einem weiteren Ansteigen der globalen Lufttemperatur ausgegangen werden. Dies hat zur Folge, dass die Atmosphäre mehr Wasserdampf aufnehmen und damit potenziell mehr Niederschlag fallen kann (s. Kap. 2.3). Eine Studie, die die Ergebnisse von 22 globalen Klimamodellen aus dem CMIP5-Ensemble miteinander vergleicht, stützt diese Annahme: die thermodynamische Komponente bewirkt weltweit eine Erhöhung des Starkniederschlagspotenzials (Pfahl et al. 2017). Allerdings wird dieses Potenzial durch Effekte atmosphärischer Zirkulation (Wetterlagen) beeinflusst, so dass zwar global betrachtet häufigere und heftigere Starkniederschläge erwartet werden, in einigen Regionen dieser Effekt jedoch gedämpft oder sogar ins Gegenteil umgekehrt werden kann (Pfahl et al. 2017). Ein Beispiel ist der Mittelmeerraum, der von der Ausdehnung der subtropischen Hochdruckgürtel in Richtung der Pole beeinflusst wird. Mann et al. (2018) zeigen darüber hinaus, dass sich die Stabilität („Verweildauer“) von Wetterlagen auf der Nordhemisphäre in den letzten Jahren erhöht hat. Als ein Grund werden die vergleichsweise schnellere Erwärmung der Arktis und die damit verbundene Reduzierung des Temperaturunterschiedes zwischen den Tropen und der Arktis angeführt. Dadurch würden in Zukunft Wettersituationen mit Starkregen noch verschärft werden, da diese z.B. tendenziell länger anhalten und/oder Wettersysteme langsamer ziehen.

Auswertungen von Ensemble-Simulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM zeigen keine signifikanten Änderungen im mittleren Sommerniederschlag (Feldmann et al. 2012). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Niederschlags lässt jedoch künftig auf eine Zunahme der Starkniederschlagsereignisse bei gleichzeitiger Abnahme der schwachen und mittleren Niederschläge schließen (Boberg et al. 2009, 2010; Feldmann et al. 2013; Wagner et al. 2013).

Im Projekt ReKliEs-De (http://reklies.hlnug.de/; Hübener et al. 2017) wurde ein Ensemble aus 37 regionalen Klimasimulationen für Deutschland und die Einzugsgebiete der nach Deutschland entwässernden Flüsse für das Emissionsszenario RCP8.5 analysiert. In der Zwischenzeit sind einige dieser Projektionen wieder zurückgezogen worden (Deutscher Wetterdienst (DWD) 2019). Die betroffenen Projektionen sind in Abb. 8 rot durchgestrichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen von mindestens 20 mm in allen Modellen zunimmt (Abb. 8). Auch wenn diese Zunahme insgesamt nur wenige Tage umfasst (linke Grafik), so ist die prozentuale Zunahme doch deutlich (rechte Grafik).

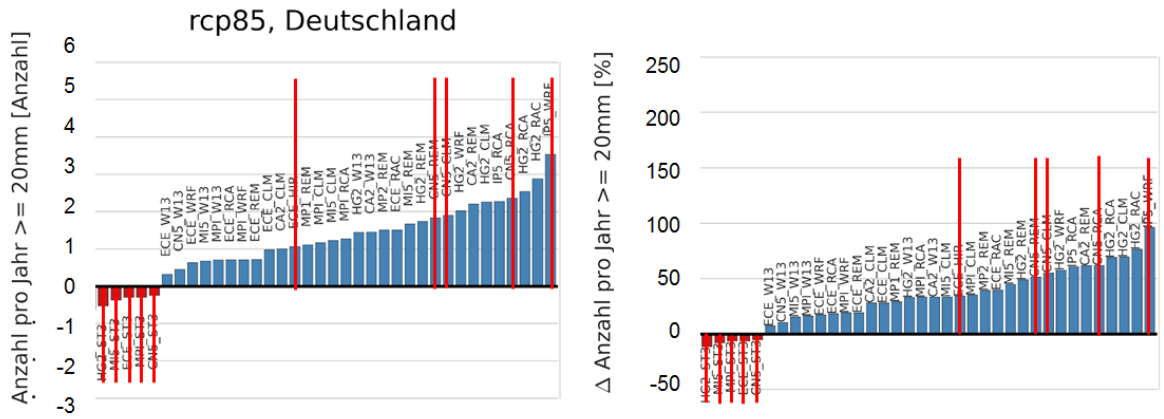

Abb. 8: Mittlere Änderung (links: in Absolutwerten, rechts: prozentual) der Anzahl der Tage mit Niederschlägen > 20 mm, gemittelt über Deutschland für den Zeitraum 2070-2100 im Vergleich zu 1971-2000 pro Jahr, Szenario RCP8.5. In blau sind Zunahmen, in rot Abnahmen dargestellt. Zurückgezogene Projektionen wurden rot durchgestrichen (verändert nach HLNUG 2018b).

Auch die Niederschlagsmenge oberhalb des 95. Perzentils zeigt bei allen Modellen eine Zunahme (Abb. 9). Auch hier wurden wie in Abb. 8 die zwischenzeitlich zurückgezogenen Projektionen rot durchgestrichen.

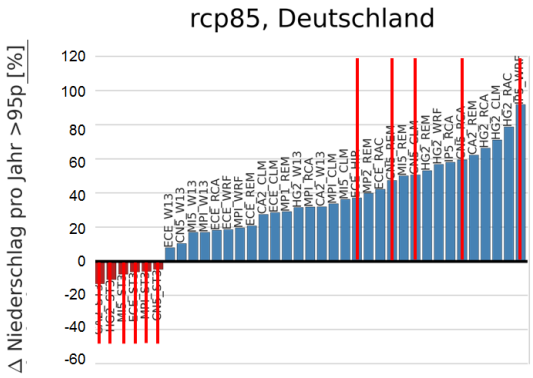

Abb. 9: Mittlere jährliche Niederschlagsmenge oberhalb des 95. Perzentils, gemittelt über Deutschland für den Zeitraum 2070-2100 im Vergleich zu 1971-2000 pro Jahr, Szenario RCP8.5. In blau sind Zunahmen, in rot Abnahmen dargestellt. Zurückgezogene Projektionen wurden rot durchgestrichen (HLNUG 2018b).

Diese Projektionen basieren auf Tageswerten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12 x 12 km. Weitere Ergebnisse in gleicher räumlicher, aber teilweise zeitlich höherer Auflösung von bis zu 1 Stunde sind aus dem Projekt ClimEx zu erwarten, das im September 2019 abgeschlossen sein wird. In KLIWA sind jedoch insbesondere kleinskalige (lokale) und zumeist kürzere (Minuten bis hin zu 6 Stunden) Niederschlagsereignisse von Interesse. Hierfür sind zeitlich und räumlich hochaufgelöste Klimasimulationen erforderlich, welche sich momentan noch in der Entwicklung befinden.

Eine erste Auswertung einer regionalen Klimaprojektion in 2,8 x 2,8 km Auflösung mit dem Modell COSMO-CLM zeigt, dass konvektive Starkregenereignisse je nach Region zukünftig heftiger ausfallen könnten (Laube et al. 2017). Für diese Projektion, angetrieben mit MPI-ESM-LR/RCP8.5 Lauf 1, wurden unter anderem die 1-, 10- und 100-jährlichen Wiederkehrwerte des 1-, 12- und 24-stündigen Niederschlags im Sommer- und Winterhalbjahr ausgewertet. Beispielhafte Ergebnisse des 10-jährlichen Niederschlags für die Dauerstufe 1 Stunde sind

in Abb. 10 dargestellt. Zu deutlicheren Änderungen kommt es im Sommerhalbjahr in der fernen Zukunft (2071-2100) in höheren Lagen und im Nordosten des KLIWA-Untersuchungsgebietes mit lokalen Erhöhungen der Niederschlagsmengen um bis zu 20 mm, stellenweise auch zu leichten Abnahmen (Abb. 10f). Im Sommerhalbjahr der nahen Zukunft (2021-2050) treten sowohl leichte Abnahmen als auch leichte Zunahmen auf (Abb. 10e). Diese kleinräumig sehr unterschiedlichen Veränderungen bestätigen auch die Beobachtungen in Kap. 3. Sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft gibt es im Winter keine Änderungen der Niederschlagsmengen (Abb. 10g & h).

Die seit kurzem verfügbaren Ergebnisse einer weiteren konvektionserlaubenden Simulation mit 5-Minuten-Daten auf 2,8 x 2,8 km Gitter mit COSMO-CLM (Purr et al. 2018), angetrieben allerdings durch EC-Earth, basieren auf der Analyse der Daten mit einem Zellverfolgungsalgorithmus (Brendel et al. 2014). Diese Auswertung zeigt ein differenziertes Bild bezüglich der Anzahl konvektiver Zellen in der Zukunft. Im Südwesten Deutschlands ist danach, wie in Abb. 11 zu sehen, eher mit einer Abnahme konvektiver Zellen zu rechnen, während im Norden und Osten die Zellzahlen steigen. Die Intensität der projizierten Zellen steigt nahezu deutschlandweit, wobei die Stärke des Anstiegs deutliche regionale Unterschiede aufweist.

Mit dem Ziel die Möglichkeiten und Limitierungen der konvektionserlaubenden Klimamodellierung hinsichtlich der zukünftigen Veränderungen von konvektiven Starkniederschlägen zu erörtern, wurde im November 2018 ein KLIWA-Workshop durchgeführt. Der Teilnehmerkreis umfasste Vertreterinnen und Vertreter verschiedener Forschungsgruppen, Ingenieurbüros sowie von Landes- und Bundesbehörden. Da sich der Ansatz der hochaufgelösten Klimamodellierung in der Folge des Workshops als vielversprechend erwiesen hat, wird er zukünftig in KLIWA weiterverfolgt werden. Auf Grund der Unsicherheiten in den globalen und regionalen Klimamodellen, sind Ensemblebetrachtungen unerlässlich um belastbare Aussagen über zukünftige klimabedingte Änderungen Treffen zu können. Dies gilt gleichwohl für die Starkregenmodellierung, hängt jedoch von der Verfügbarkeit von hochaufgelösten Datensätzen ab. Denkbar ist daher, aus verschiedenen Quellen ein (kleines) Ensemble von hochaufgelösten Klimaprojektionen zu erstellen.

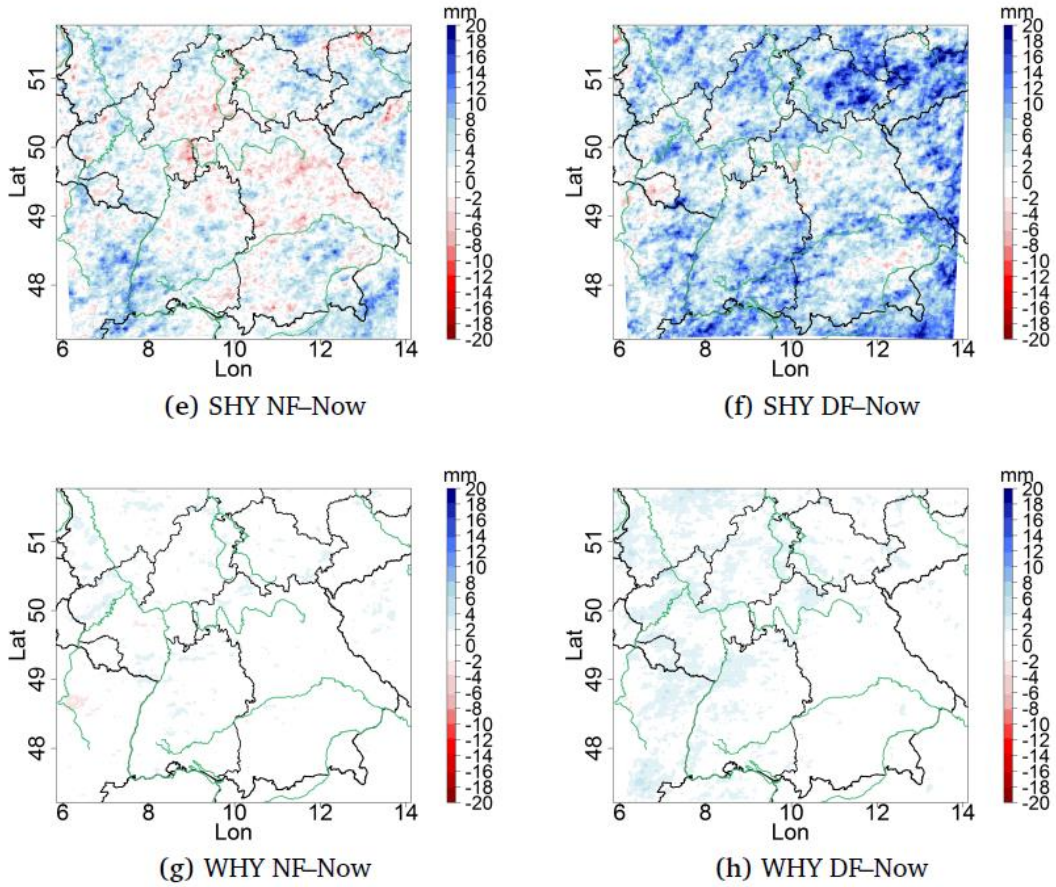

Abb. 10: Beispiel für eine Klimaprojektion CCLM5.0/MPI-ESM-LR/r1/RCP8.5 mit der Änderung der Niederschlagssumme für Dauerstufe 1 Stunde und einer Jährlichkeit 10 Jahre für die nahe Zukunft (NF 2021-2050) für das Sommerhalbjahr (SHY) (e) und Winterhalbjahr (WHY) (g) sowie analog für die ferne Zukunft (DF 2071-2100) (f) & (h) (Laube et al. 2017).

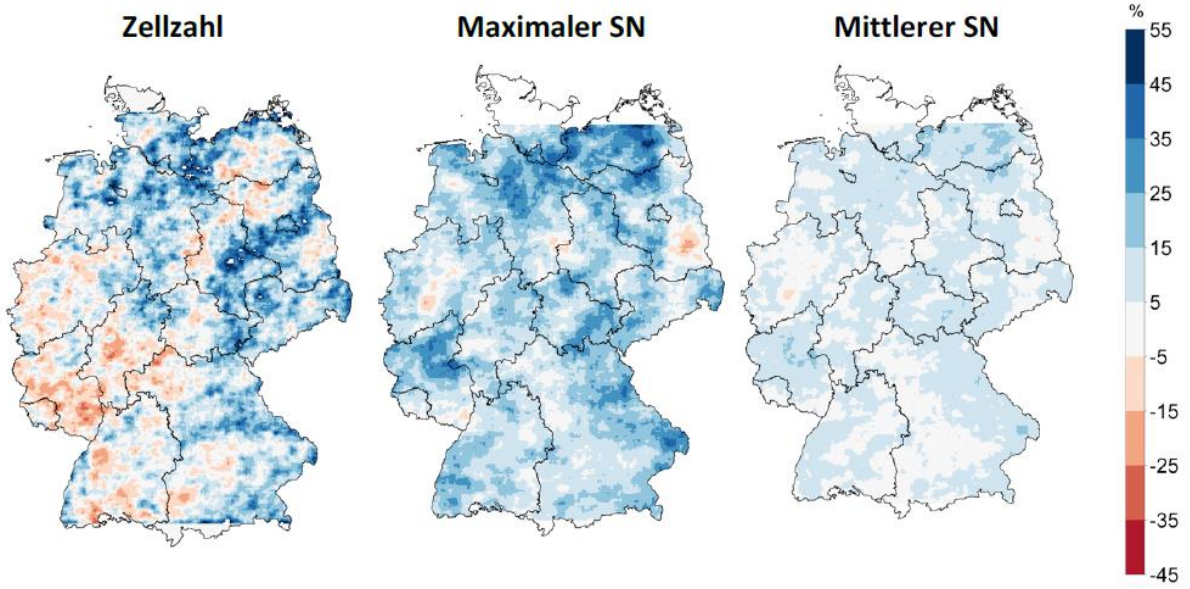

Abb. 11: Relative Änderung der Zellzahl und des maximalen, sowie mittleren Starkniederschlags im Sommerhalbjahr in den COSMO5.0_CLM9 2,8km-Simulationen angetrieben mit EC-EARTH im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 gegenüber 1976-2005 unter Annahme des RCP8.5-Szenarios (Purr et al. 2018).

6 Ausblick

Im Fokus der Untersuchungen zum Thema „Starkregen“ stand bisher aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit primär das Langzeitverhalten von Starkniederschlagsereignissen mit Dauerstufen von mindestens einem Tag. Dabei wurde im KLIWA-Gebiet vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr eine weitverbreitete Zunahme von Starkniederschlägen auf Tagesbasis festgestellt. Im Sommerhalbjahr sind jedoch keine einheitlichen Tendenzen auszumachen. Im Gegensatz zu den vergangenen Untersuchungen sollen nun die Änderungen von kurzzeitigen, konvektiven Starkniederschlägen in der Vergangenheit und Zukunft betrachtet werden.

Bei der Untersuchung der Änderungen von (konvektiven) Starkniederschlagsereignissen basierend auf Messdaten muss die begrenzte räumliche Repräsentativität solcher Ereignisse beachtet werden. Nicht alle (konvektiven) Ereignisse werden durch Messstationen erfasst. Zudem sind viele der Niederschlagsmessstationen, die in einer subtäglichen Auflösung Daten erfassen, noch nicht ausreichend lange in Betrieb, um Aussagen über Veränderungen des Starkniederschlagsverhaltens in Süddeutschland treffen zu können. Eine verbesserte Erfassung und damit eine belastbarere Datengrundlage für Trenduntersuchungen könnte durch die RADOLAN-Daten geschaffen werden. Im Projekt „Radarklimatologie“ reprozessierte der DWD-Wetterradardaten mit einem optimierten RADOLAN-Verfahren zurück bis zum Jahr 2001 (Winterrath et al. 2017). Der neue Datensatz wird zudem jährlich fortgeschrieben. Dennoch wird es noch einige Jahre dauern, bis diese Daten eine eigene Grundlage für Trenduntersuchungen bieten können. Unterstützend können sie aber schon heute eingesetzt werden, z. B. um verschiedene Prozesse, die zu kurzanhaltenden Starkniederschlägen führen, besser verstehen zu können.

Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Starkniederschlägen, ist der Einsatz von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Klimasimulationen erforderlich. Erste Ergebnisse einer einzelnen Projektion mit COSMO-CLM5.0 (Auflösung: 2,8 x 2,8 km) zeigen für die Zukunft im Sommer beispielhaft eine Zunahme der 10-jährlichen Niederschläge für die Dauerstufe 1 Stunde. An dieser Stelle sind jedoch weitere Untersuchungen und die Auswertung weiterer konvektionserlaubender Projektionen nötig, um die Unsicherheiten der Modellkette durch eine Ensemblebetrachtung abzuschätzen.

Die AG SR wird zukünftige Forschungsergebnisse im Bereich „Starkregen“ betrachten und in eine Gesamtschau integrieren. So kommt beispielsweise eine aktuelle Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zu dem Ergebnis, dass Starkregenereignisse auf verschiedenen Erdteilen miteinander in Verbindung stehen könnten. Als Ursache für die identifizierten Telekonnektionen werden sogenannte Rossby-Wellen angesehen (Boers et al. 2019).

Das weitere Vorgehen von KLIWA zum Thema „Starkregen“ ist von den Erkenntnissen abhängig, die 2018/2019 aus KLIWA aber auch aus anderen Projekten wie KLIMPRAX-Starkregen, ClimEx oder MUNSTAR zu erwarten sind.

7 Literaturverzeichnis

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hg.) (2017): Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016. Wasserwirtschaftlicher Bericht (UmweltSpezial).

Beck, Ferdinand (2013): Generation of spatially correlated synthetic rainfall time series in high temporal resolution. A data driven approach. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2012. Stuttgart: Inst. für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (Mitteilungen / Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, 219).

Becker, P.; Becker, C.; Dalelane, Clementine; Deutschländer, Thomas; Junghänel, Thomas; Walter, A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 30.04.2018.

Berg, P.; Haerter, J. O. (2013): Unexpected increase in precipitation intensity with temperature — A result of mixing of precipitation types? In: *Atmospheric Research* 119, S. 56–61. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.05.012.

Berg, Peter; Moseley, Christopher; Haerter, Jan O. (2013): Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. In: *Nature Geosci* 6 (3), S. 181–185. DOI: 10.1038/ngeo1731.

Bernhardt, Marco (2008): Leben mit dem Fluss. Hochwasser im Spiegel der Zeit. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (UmweltBasis).

Boberg, Fredrik; Berg, Peter; Thejll, Peter; Gutowski, William J.; Christensen, Jens H. (2009): Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. In: *Clim Dyn* 32 (7-8), S. 1097–1106. DOI: 10.1007/s00382-008-0446-y.

Boberg, Fredrik; Berg, Peter; Thejll, Peter; Gutowski, William J.; Christensen, Jens H. (2010): Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ENSEMBLES models. In: *Clim Dyn* 35 (7-8), S. 1509–1520. DOI: 10.1007/s00382-009-0683-8.

Boers, Niklas; Goswami, Bedartha; Rheinwalt, Aljoscha; Bookhagen, Bodo; Hoskins, Brian; Kurths, Jürgen (2019): Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. In: *Nature. DOI:* 10.1038/s41586-018-0872-x.

Brendel, C.; Brisson, E.; Heyner, F.; Weigl, E.; Ahrens, B. (2014): Bestimmung des atrmosphärischen Konvektionspotentials über Thüringen. Berichte des Deutschen Wetterdienstes (244).

Brieber, A. (2018): Statistische Auswertung zeitlich hochaufgelöster Niederschlagsdaten für Hessen. Masterarbeit am Geographischen Institut Mainz. Johannes-Gutenberg-Universität Mainz.

Clapeyron, Emile (1834): Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur. In: *J. l'Ecole Polytechnique* (XXIII), S. 153–191.

Clausius, R. (1850): Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. In: *Ann. Phys. Chem.* 155 (3), S. 368–397. DOI: 10.1002/andp.18501550306.

Damster (2018): Heavy Precipitation events in Central Germany on high temporal resolution and related atmospheric circulation in the period from 1961 until 2015. Bachelorarbeit an der Universität Gießen. Gießen.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2018): Warnkriterien. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882, zuletzt geprüft am 30.04.2018.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.) (2019): Informationen zu den verfügbaren regionalen Klimaprojektionen. Datensätze RCP-Szenarien. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/liste-klimaprojektionen.html?nn=541460, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

Feldmann, Hendrik; Schädler, Gerd; Panitz, Hans-Jürgen; Kottmeier, Christoph (2013): Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. In: *Int. J. Climatol.* 33 (8), S. 1964–1977. DOI: 10.1002/joc.3564.

Fiener, Peter; Neuhaus, Peter; Botschek, Johannes (2013): Long-term trends in rainfall erosivity–analysis of high resolution precipitation time series (1937–2007) from Western Germany. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 171-172, S. 115–123. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.11.011.

Fischer, E. M.; Knutti, R. (2016): Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. In: *Nature Clim Change* 6 (11), S. 986–991. DOI: 10.1038/nclimate3110.

Hattermann, Fred F.; Kundzewicz, Zbigniew W.; Huang, Shaochun; Vetter, Tobias; Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm; Werner, Peter (2013): Climatological drivers of changes in flood hazard in Germany. In: *Acta Geophys.* 61 (2), S. 463–477. DOI: 10.2478/s11600-012-0070-4.

HLNUG (Hg.) (2018a): ReKliEs-De. Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. Online verfügbar unter http://reklies.hlnug.de/home/, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

HLNUG (Hg.) (2018b): ReKliEs-De - Elektronisches Ergänzungsdokument (Supplement). ReKliEs-Ensemble - RCP8.5. Niederschlag: r95ptot - Jährliche Niederschlagsmenge aus Tagesmengen oberhalb des 95. Perzentils - Balkendiagramme für das Ensemble der Modelle. ReKliEs-De Gebiet, Deutschland und verschiedene Flusseinzugsgebiete. Online verfügbar unter https://swift.dkrz.de/v1/dkrz_a88e3fa5289d4987b4d3b1530c9feb13/ReKliEs-De/Supplement/RCP85/Ensembleabbildungen/19_ReKliEs_Plots_r95ptot_RCP85.pdf, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

Hübener, Heike Dr.; Bülow, Katharina Dr.; Fooken, Cornelia Dr.; Früh, Barbara Dr.; Hoffmann, Peter Dr.; Höpp, Simona et al. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. Hg. v. Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De).

Hundecha, Yeshewatesfa; Bárdossy, András (2005): Trends in daily precipitation and temperature extremes across western Germany in the second half of the 20th century. In: *Int. J. Climatol.* 25 (9), S. 1189–1202. DOI: 10.1002/joc.1182.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hg.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Allen, Simon K., Boschung, Judith, Alexander Nauels et al. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom, New York.

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (Hg.) (2016): Monitoringbericht 2016. Klimawandel in Süddeutschland - Veränderung von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW); Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP); Deutscher Wetterdienst (DWD).

Laube, N.; Panitz, H. J.; Schädler, G. (2017): Auswertung regionaler COSMO-CLM-Klimasimulationen mit 2.8 km Auflösung für das KLIWA-Gebiet und die Klimazeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100. Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Malitz, Gabriele; Beck, C.; Grieser, J. (2011): Veränderung der Starkniederschläge in Deutschland (Tageswerte der Niederschlagshöhe im 20. Jahrhundert). In: J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe

und Christian-D. Schönwiese (Hg.): Warnsignal Klima. Genug Wasser für alle? 3. Aufl. Hamburg: Universitätsverlag, S. 311–316.

Mann, Michael E.; Rahmstorf, Stefan; Kornhuber, Kai; Steinman, Byron A.; Miller, Sonya K.; Petri, Stefan; Coumou, Dim (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events. The role of quasi-resonant amplification. In: *Science advances* 4 (10), eaat3272. DOI: 10.1126/sciadv.aat3272.

Mueller, Eva Nora; Pfister, Angela (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. In: *Journal of Hydrology* 411 (3-4), S. 266–278. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.10.005.

Murawski, Aline; Zimmer, Janek; Merz, Bruno (2016): High spatial and temporal organization of changes in precipitation over Germany for 1951-2006. In: *Int. J. Climatol.* 36 (6), S. 2582–2597. DOI: 10.1002/joc.4514.

NRW (2010): ExUS Extremwertstatistische Untersuchungen von Starkregen in Nordrhein-Westfalen. aqua_plan GmbH; hydro & meteo GmbH & Co. KG; dr. papadakis GmbH.

Pfahl, S.; O'Gorman, P. A.; Fischer, E. M. (2017): Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. In: *Nature Clim Change* 7 (6), S. 423–427. DOI: 10.1038/nclimate3287.

Purr, Christopher; Brisson, Erwan; Ahrens, Bodo (2018): Abschlussbericht zum Projekt: Konvektive Gefährdung über Hessen und Rheinland-Pfalz. Institut für Atmosphäre und Umwelt der J.W. Goethe-Universität Frankfurt/Main. Frankfurt/Main.

Rudolf, B.; Rapp, J. (2003): Das Jahrhunderthochwasser der Elbe. In: Deutscher Wetterdienst (Hg.): Klimastatusbericht 2002. Offenbach am Main, S. 172–187.

Schönwiese, Christian-D. (2012): Analyse der Klimaänderungen in Hessen für den Zeitraum 1901-2003. In: INKLIM 2012 Baustein II - Klimawandel und Klimafolgen in Hessen; Abschlussbericht. Frankfurt/Main, S. 3–11.

Schönwiese, Christian-D.; Staeger, T.; Trömel, S. (2005): Klimawandel und Extremereignisse in Deutschland. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hg.): Klimastausbericht 2005. Offenbach am Main: Eigenverlag.

Trenberth, Kevin E. (1999): Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. In: *Climatic Change* 42 (1), S. 327–339. DOI: 10.1023/A:1005488920935.

Trenberth, Kevin E.; Dai, Aiguo; Rasmussen, Roy M.; Parsons, David B. (2003): The Changing Character of Precipitation. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 84 (9), S. 1205–1218. DOI: 10.1175/BAMS-84-9-1205.

Wagner, Sven; Berg, Peter; Schädler, Gerd; Kunstmann, Harald (2013): High resolution regional climate model simulations for Germany. Part II—projected climate changes. In: *Clim Dyn* 40 (1-2), S. 415–427. DOI: 10.1007/s00382-012-1510-1.

Wang, Guiling; Wang, Dagang; Trenberth, Kevin E.; Erfanian, Amir; Yu, Miao; Bosilovich, Michael G.; Parr, Dana T. (2017): The peak structure and future changes of the relationships between extreme precipitation and temperature. In: *Nature Clim Change* 7 (4), S. 268–274. DOI: 10.1038/nclimate3239.

Winterrath, Tanja; Brendel, Christoph; Hafer, Mario; Junghänel, Thomas; Klameth, Anna; Walawender, Ewelina et al. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 251).

Ye, Hengchun; Fetzer, Eric J.; Wong, Sun; Lambrigtsen, Bjorn H. (2017): Rapid decadal convective precipitation increase over Eurasia during the last three decades of the 20th century. In: *Science advances* 3 (1), e1600944. DOI: 10.1126/sciadv.1600944.

Zolina, Olga; Simmer, Clemens; Kapala, Alice; Bachner, Susanne; Gulev, Sergey; Maechel, Hermann (2008): Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. In: *J. Geophys. Res.* 113 (D6), D05109. DOI: 10.1029/2007JD008393.