



KLIWA-Kurzbericht

Zukünftige Entwicklung von Starkregen

Auswertung eines konvektionserlaubenden Ensembles

im Rahmen der Kooperation KLIWA

Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft



KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

Impressum

Bearbeitung

Kooperation KLIWA – www.kliwa.de –

Redaktion

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Griesbachstraße 1

76185 Karlsruhe

Manuela Nied

manuela.nied@lubw.bwl.de

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Hans-Högn-Straße 12

95030 Hof/Saale

Sirid Wintertal

sirid.wintertal@lfu.bayern.de

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Kaiser-Friedrich-Str. 7

55116 Mainz

Matthias Voigt

matthias.voigt@lfu.rlp.de

Lukas Schefczyk

lukas.schefczyk@lfu.rlp.de

Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen

Hauptstraße 16

67705 Trippstadt

Tilman Sauer

tilmann.sauer@klimawandel-rlp.de

Deutscher Wetterdienst

Frankfurter Straße 135

63067 Offenbach am Main

Thomas Junghänel

thomas.junghaenel@dwd.de

Harald Rybka

harald.rybka@dwd.de

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingaustraße 186

65203 Wiesbaden

Christine Kolbe

christine.kolbe@hlnug.hessen.de

Stand

Januar 2024

Nachdruck, auch auszugsweise, ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	6
1 Konvektionserlaubende Simulationen.....	7
1.1 Tagesgang.....	7
1.2 Niederschlagsintensitäten.....	8
2 Daten und Methodik.....	9
2.1 Modelldaten.....	9
2.2 Beobachtungsdaten.....	9
2.3 Perzentile.....	9
2.4 Wiederkehrzeiten	10
3 Ergebnisse	10
3.1 Temperatur und Niederschlagsintensität steigen.....	10
3.2 Trockenere Sommer mit mehr Starkniederschlag.....	11
3.3 Absoluter Anstieg der Intensität bei seltenen Ereignissen höher.....	13
3.4 Deutlicher Anstieg der Regenintensität in den Nachtstunden.....	14
3.5 Geringe regionale Unterschiede in der Starkregenänderung bei großer Bandbreite der Modelle.....	15
3.6 Wiederkehrzeiten verkürzen sich.....	16
3.7 Die Intensitäten steigen vom Starkregen- bis in den Dauerregenbereich	17
3.8 Kernbotschaften	19
4 Literaturverzeichnis.....	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ensemble. Die Tabelle zeigt die Modellkette, das Szenario und die simulierten Zeiträume des konvektionserlaubenden Ensembles.....	9
--	---

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tagesgang des Niederschlages (Meredith, Ulbrich, Rust, & Truhetz, 2021) abgeleitet aus einer konvektionserlaubenden Simulation (Gitterweite 2,8 km in Schwarz), nicht konvektionserlaubenden Simulationen (Gitterweite 12 km in Rot, Blau, Grün und Rosa) und aus dem RADKLIM Datensatz des DWD (in grau). Die Statistiken basieren auf den Sommermonaten (Juni, Juli, August) 2001 bis 2018. Gezeigt ist ein räumlicher Mittelwert über Deutschland aufgetragen gegen die lokale Tageszeit.....	7
Abbildung 2: Wahrscheinlichkeitsdichte des 99,9 Perzentils des stündlichen Niederschlages im Alpenraum und Süddeutschland für eine konvektionserlaubende Simulation (Schwarz), eine konvektionsparametrisierende Simulation (Lila) und den Beobachtungsdatensatz (Grau) (Adinolfi, Raffa, Reder, & Mercogliano, 2020).....	8
Abbildung 3: Absolute Änderung der Temperatur und relative Änderung des 99,99 Perzentils des einständigen Niederschlages im KLIWA Gebiet (KW) im Vergleich des Projektionszeitraums mit dem historischen Zeitraum.....	11
Abbildung 4: Entwicklung der sommerlichen Niederschläge (Juni-August) im KLIWA Gebiet. Auf der waagrechten Achse ist die relative Änderung der sommerlichen Niederschläge aufgetragen. Auf der senkrechten Achse ist die relative Änderung der Niederschlagssumme oberhalb des 99,99 Perzentils aufgetragen, also der Anteil des Niederschlages der als Starkregen fällt.	12
Abbildung 5: Perzentile der einständigen Niederschlagsintensität im KLIWA Gebiet. Blau dargestellt sind Simulationen im Bezugszeitraum Ende des 20. Jahrhunderts. Rot dargestellt sind Simulationen im Projektionszeitraum Ende des 21. Jahrhunderts. Die schwarzen Dreiecke zeigen die Lage der Perzentile im RADKLIM Datensatz 2001-2020.	14
Abbildung 6: Tagesgang des 99,99 Perzentils der beobachteten sommerlichen RADKLIM Niederschläge im KLIWA Gebiet in Schwarz auf der rechten Achse. Relative Änderung des 99,99 Perzentils der sommerlichen Niederschläge in den Projektionen Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts aufgetragen gegen die Tageszeit auf der linken Achse.....	15
Abbildung 7: Relative Änderung der Intensität des 99,99 Perzentils des Niederschlages im gesamten KLIWA Gebiet (KW) und in den einzelnen Bundesländern Hessen (HE), Rheinland-Pfalz (RP), Baden-Württemberg (BW) und Bayern (BY).....	16
Abbildung 8: Wiederkehrzeiten nach Bundesländern für ein dreistündiges Ereignis Ende des 21. Jahrhunderts, das Ende des 20. Jahrhunderts alle 10 Jahre stattgefunden hat.....	17

Abbildung 9: Änderung der Intensität von Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren im Projektionszeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum für verschiedene Dauerstufen. Die Violinplots in Grau zeigen die Bandbreite eines konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensembles mit dem Median als schwarzem Balken.	18
Abbildung 10: Änderung der Intensität von Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren im Projektionszeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum für verschiedene Dauerstufen. Die Violinplots in Grau zeigen die Bandbreite eines konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensembles mit dem Median als schwarzem Balken.	18
Abbildung 11: Änderung der Intensität von Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 1 Jahr im Projektionszeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum für verschiedene Dauerstufen. Die Violinplots in Grau zeigen die Bandbreite eines konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensembles mit dem Median als schwarzem Balken.	19

Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel und der damit einhergehenden Erwärmung steigt die maximale mögliche Wasserdampfmenge in der Luft und damit auch das Potential für intensivere Niederschlagsereignisse (Trenberth, Dai, Rasmussen, & Parsons, 2003). Die intensivsten Niederschlagsereignisse sind konvektiver Natur, also kleinräumige bzw. meist lokal begrenzte Schauer und Gewitter, und finden in Deutschland meist in den Sommermonaten statt. Um bessere Aussagen über deren zukünftige Entwicklung zu treffen, können konvektionserlaubende Klimamodelle genutzt werden, die diese Ereignisse abbilden können.

In dieser Studie wurde ein Ensemble fünf konvektionserlaubender Projektionen über Süddeutschland für das Ende des 21. Jahrhunderts ausgewertet. Sie zeigen übereinstimmend einen zukünftigen Anstieg der Intensitäten sommerlicher Starkregenereignisse und Verkürzungen der Wiederkehrdauern gegenüber der Vergangenheit.

1 Konvektionserlaubende Simulationen

Regionale Klimasimulationen der CMIP-5 Generation haben eine Gitterweite von ca. 12 km (Jacob, et al., 2013) und können daher einzelne Schauer und Gewitter, deren Ausdehnung kleiner sein kann, nicht auf dem Rechengitter auflösen. Konvektive Niederschläge müssen daher parametrisiert, d.h. aus auf dem Gitter aufgelösten Variablen wie Feuchte und Temperatur abgeleitet werden. Es handelt sich um sogenannte konvektionsparametrisierende regionale Klimaprojektionen. Unterhalb einer Gitterweite von 4 km, wie im Fall der konvektionserlaubenden Projektionen, kann die Parametrisierung der hochreichenden Konvektion ausgeschaltet werden, da die Auf- und Abwindbereiche dann räumlich und zeitlich auf dem Gitter aufgelöst werden können. Schauer und Gewitter können somit explizit simuliert werden. Eine Parametrisierung der mikrophysikalischen Prozesse wie beispielsweise Tröpfchen-Bildung ist jedoch weiterhin erforderlich. Konvektionserlaubende regionale Klimaprojektionen können den Tagesgang und die maximale Intensität von Niederschlägen besser abbilden als konvektionsparametrisierende regionale Klimaprojektionen.

1.1 Tagesgang

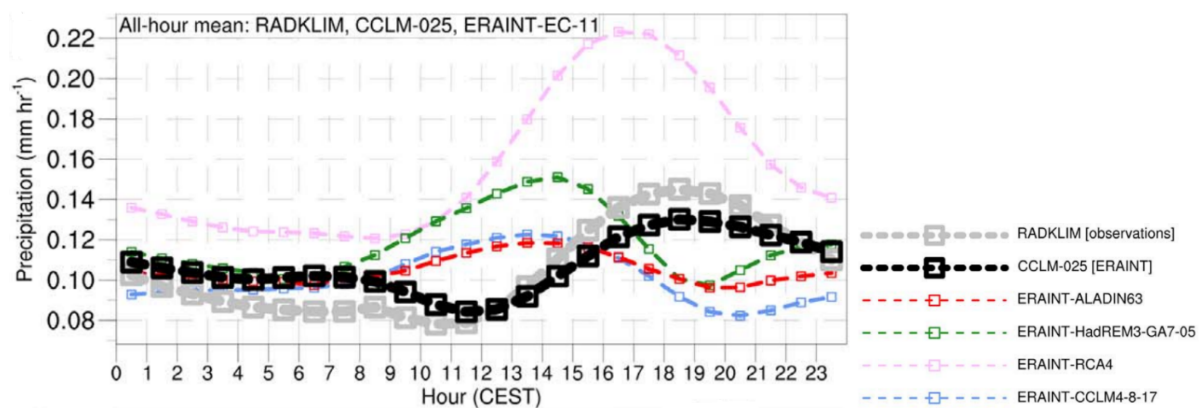


Abbildung 1: Tagesgang des Niederschlags (Meredith, Ulbrich, Rust, & Truhetz, 2021) abgeleitet aus einer konvektionserlaubenden Simulation (Gitterweite 2,8 km in Schwarz), nicht konvektionserlaubenden Simulationen (Gitterweite 12 km in Rot, Blau, Grün und Rosa) und aus dem RADKLIM Datensatz des DWD (in grau). Die Statistiken basieren auf den Sommermonaten (Juni, Juli, August) 2001 bis 2018. Gezeigt ist ein räumlicher Mittelwert über Deutschland aufgetragen gegen die lokale Tageszeit.

Abbildung 1 zeigt den mittleren sommerlichen Tagesgang des Niederschlags ermittelt aus Beobachtungs- und Simulationsdaten. In den Radarbeobachtungen (RADKLIM) tritt die maximale Niederschlagsintensität am frühen Abend zwischen 18 und 19 Uhr (MESZ) auf. Das Intensitätsmaximum der konvektionserlaubenden Simulation (CCLM-025) tritt in Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten im gleichen Zeitraum auf, während das Maximum des Niederschlags in den meisten konvektionsparametrisierenden Simulationen schon zwischen 13 und 15 Uhr synchron mit der maximalen Einstrahlung auftritt.

1.2 Niederschlagsintensitäten

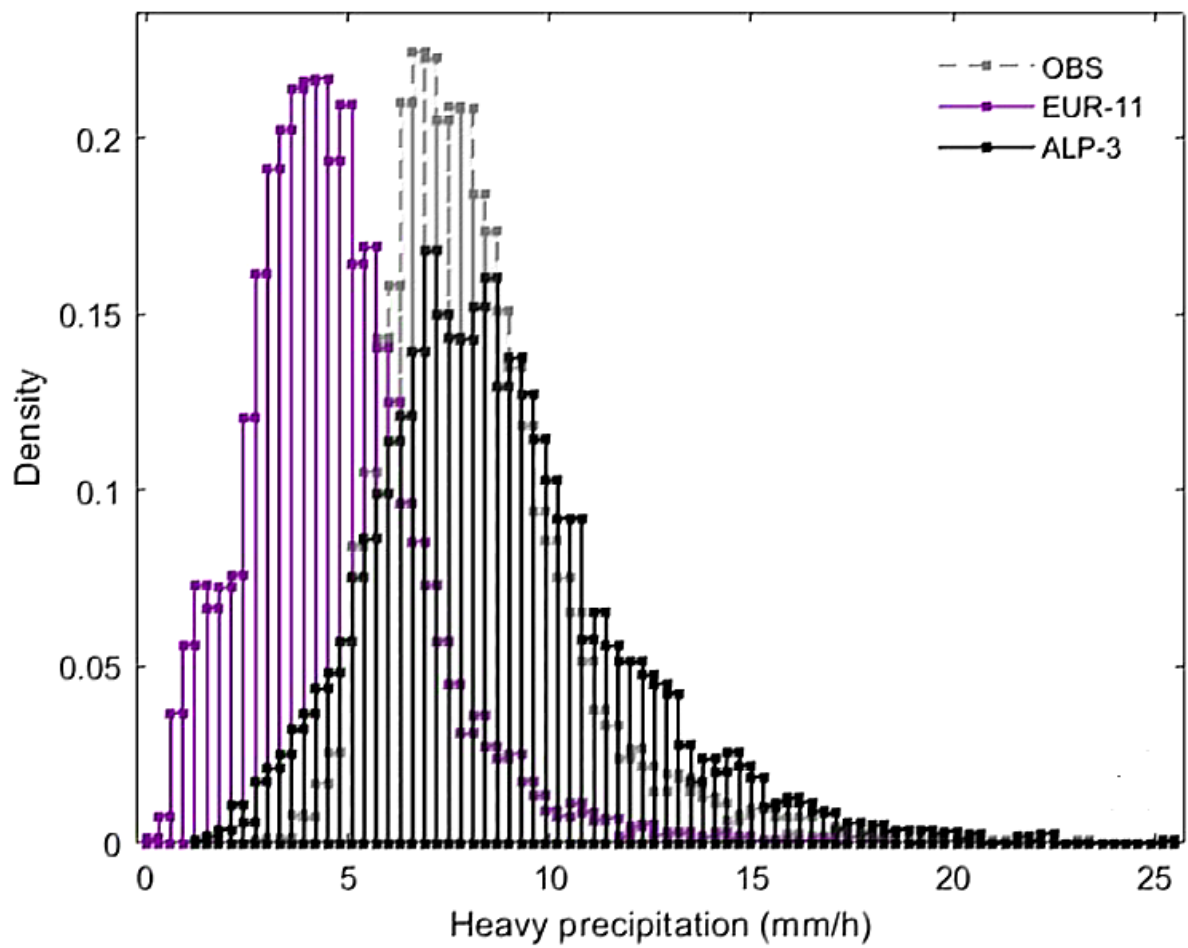


Abbildung 2: Wahrscheinlichkeitsdichte des 99,9 Perzentils des stündlichen Niederschlags im Alpenraum und Süddeutschland für eine konvektionserlaubende Simulation (Schwarz), eine konvektionsparametrisierende Simulation (Lila) und den Beobachtungsdatensatz (Grau) (Adinolfi, Raffa, Reder, & Mercogliano, 2020).

Konvektionserlaubende Simulationen können zudem auch die Intensität von kurzzeitigen Niederschlägen besser wiedergeben als konvektionsparametrisierende Simulationen. Abbildung 2 zeigt den Vergleich einer konvektionserlaubenden Simulation mit 3 km Gitterweite und einer konvektionsparametrisierenden Simulation mit 12 km Gitterweite gegenüber einem Beobachtungsdatensatz. Die Abbildung zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte des 99,9 Perzentils der einstündigen Niederschläge. Das Maximum der Verteilung und die somit höchste Wahrscheinlichkeit liegt bei der konvektionserlaubenden Simulation zwischen 5 und 10 mm/h. Die Lage des Maximums stimmt mit der Lage im Beobachtungsdatensatz überein, während das Maximum der konvektionsparametrisierenden Simulation bei unter 5 mm/h, also deutlich zu niedrig, liegt. Bei Niederschlägen oberhalb von etwa 10 mm/h und unterhalb von 5 mm/h überschätzt die konvektionserlaubende Projektion die Wahrscheinlichkeit eines Regenerignisses gegenüber der Beobachtung.

2 Daten und Methodik

2.1 Modelldaten

Die ausgewerteten Daten stammen aus fünf konvektionserlaubenden Projektionen (Tabelle 1) mit einer Gitterweite < 4 km und liegen in stündlicher Auflösung vor. Eine Bias-Adjustierung wurde nicht durchgeführt. Für den Projektionszeitraum 2071-2100 wurde das RCP8.5 Szenario, das hohe Treibhausgasemissionen vorgibt, betrachtet. Als Referenzzeitraum wurden die letzten 30 Jahre des 20. Jahrhunderts von 1971-2000 festgelegt (die Projektion der Goethe Universität Frankfurt (GUF) hat einen abweichenden Bezugszeitraum von 1972-2005). Angetrieben wurden die Regionalmodelle durch Globalmodelle der CMIP-5 Generation: EC-Earth, MIROC5, MPI-ESM und HadGEM2. Das EC-Earth Modell wurde dabei einmal von der Goethe Universität Frankfurt (GUF) genutzt (Purr, Brisson, & Ahrens, 2021) und einmal vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT), das auch die MPI-ESM und HadGEM2 getriebenen Simulationen durchgeführt hat (Hundhausen, Feldmann, Laube, & Pinto, 2023). Die mit MIROC5 angetriebene Simulation wurde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) durchgeführt (Rybka, et al., 2022). Alle Institutionen haben in einem dynamischen Downscaling COSMO-CLM als konvektionserlaubendes Modell genutzt, wobei sich in den verwendeten Versionen u.a. die mikrophysikalischen Parametrisierungen der konvektionserlaubenden Regionalmodelle unterscheiden.

Tabelle 1: Ensemble. Die Tabelle zeigt die Modellkette, das Szenario und die simulierten Zeiträume des konvektionserlaubenden Ensembles.

Institution	Globalmodell	Regionalmodell	Szenario	Historischer Zeitraum	Projektion Zeitraum
DWD	MIROC5	COSMO-CLM	RCP 8.5	1971-2000	2071-2100
GUF	EC-Earth	COSMO-CLM	RCP 8.5	1972-2005	2071-2100
KIT	EC-Earth	COSMO-CLM	RCP 8.5	1971-2000	2071-2100
KIT	MPI-ESM	COSMO-CLM	RCP 8.5	1971-2000	2071-2100
KIT	HadGEM2	COSMO-CLM	RCP 8.5	1971-2000	2071-2099

2.2 Beobachtungsdaten

Als Beobachtungsdaten wurde RADKLIM (Winterrath, et al., 2018), die an Bodenstationen angeeichte Radarklimatologie des DWDs, verwendet. Der Datensatz liegt in stündlicher Auflösung auf einem 1×1 km Raster von 2001-2020 vor.

2.3 Perzentile

Starkniederschläge können durch die Angabe von Perzentilen beschrieben werden. Perzentile von Niederschlagsstundenwerten geben an, welcher Stundenwert zu einem bestimmten Prozentsatz der Jahresstunden nicht überschritten wird. Wenn es in 90 Prozent der Jahresstunden überhaupt nicht regnet, so ist das 90. Perzentil (P90) der Stundensummen beispielsweise Null.

Das 99,99 Perzentil entspricht in etwa der Stunde mit dem intensivsten Niederschlag eines Jahres.

2.4 Wiederkehrzeiten

Eine weitere Möglichkeit Starkniederschläge zu beschreiben, kann durch eine Einteilung in Wiederkehrzeiten für unterschiedliche Dauerstufen (Regendauern) erfolgen, z.B. wie sie in dem KOSTRA-Produkt des DWD erfolgt. Wiederkehrzeiten beschreiben das Auftreten einer Niederschlagssumme für eine bestimmte Dauerstufe im statistischen Mittel und sind regional unterschiedlich. In den bayrischen Alpen ist die Niederschlagsintensität für ein jährlich auftretendes Ereignis beispielsweise höher als in der Rheinebene (KLIWA, 2019). Der Zusammenhang zwischen der Wiederkehrzeit und der Niederschlagsintensität basiert auf extremwertstatistischen Analysen von langjährigen Niederschlagszeitreihen (Rybka, et al., 2022). Für die einzelnen Analysen wird Stationarität, also keine Veränderung mit der Zeit innerhalb eines betrachteten Zeitraums, angenommen. Dadurch können die Änderungen zwischen zwei Zeiträumen (z.B. Vergangenheit und Zukunft) verglichen werden.

3 Ergebnisse

3.1 Temperatur und Niederschlagsintensität steigen

Der ganzjährige Temperaturanstieg zum Ende des Jahrhunderts im KLIWA Gebiet (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz) liegt je nach Projektion zwischen 3 und 6 °C im Vergleich der Zeiträume 2071-2100 zu 1971-2000 bzw. 1972-2005 (GUF) (siehe Abbildung 3). Damit einher geht ein Anstieg des 99,99 Perzentils des Niederschlags von 10 bis 30 %. Die KIT-HadGEM2 Projektion zeigt den stärksten absoluten Anstieg der Temperatur. Die Simulationen DWD-MIROC, KIT-HadGEM2 und KIT-EC-EARTH zeigen die stärksten relativen Anstiege der Niederschlagsintensität. Die EC-EARTH getriebene Simulation der GUF zeigt ein geringes Temperaturänderungssignal von knapp über 3 °C und den geringsten relativen Intensitätsanstieg.

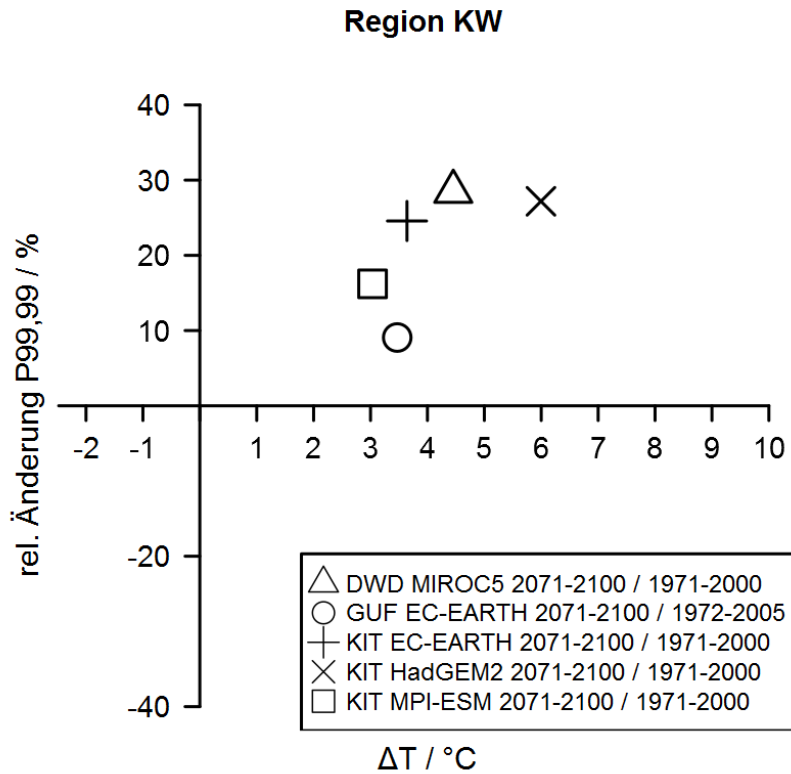


Abbildung 3: Absolute Änderung der Temperatur und relative Änderung des 99,99 Perzentils des einstündigen Niederschlags im KLIWA Gebiet (KW) im Vergleich des Projektionszeitraums mit dem historischen Zeitraum.

3.2 Trockenere Sommer mit mehr Starkniederschlag

Die Summe der sommerlichen Niederschläge (Juni-August) nimmt in vier der fünf Projektionen ab (Abbildung 4). Dabei liegt die relative Änderung zwischen 15 % und 25 %. Lediglich die MIROC5 angetriebene Projektion des DWD sieht eine nahezu gleichbleibende sommerliche Niederschlagsmenge.

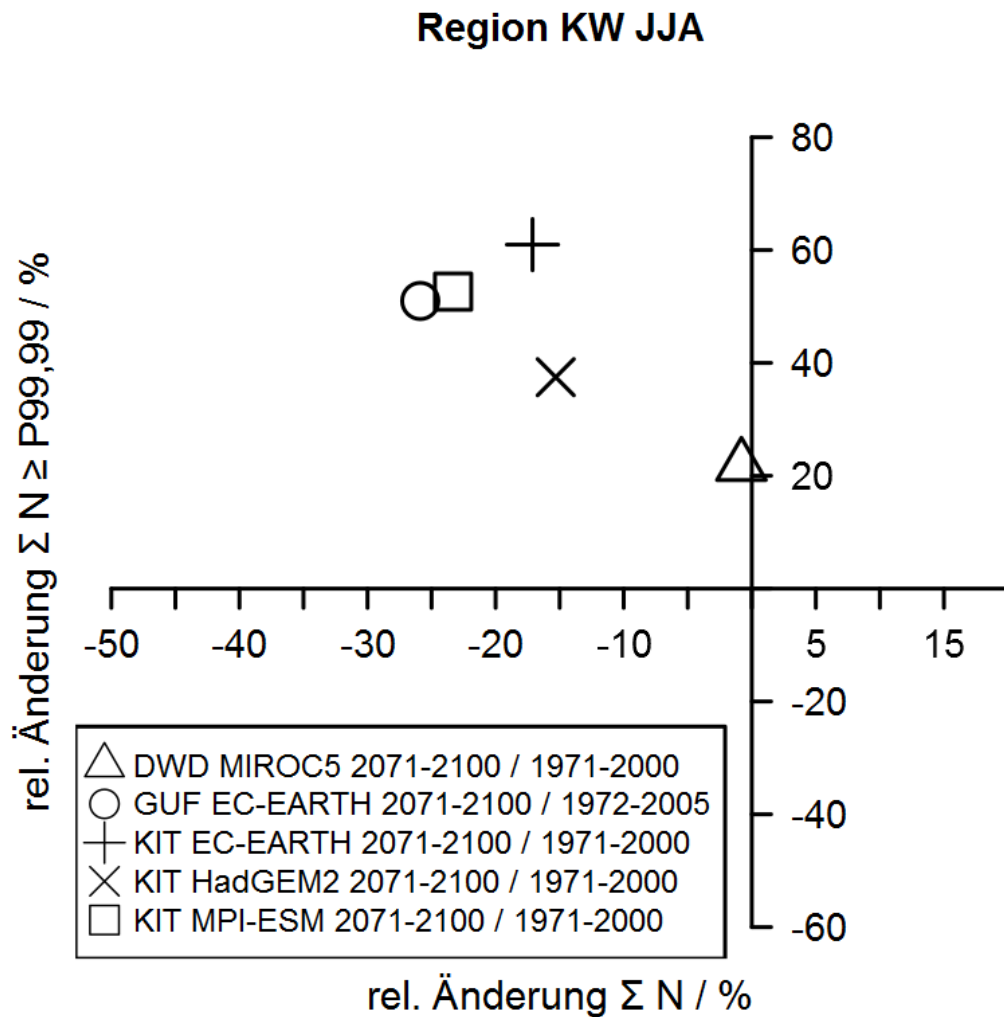


Abbildung 4: Entwicklung der sommerlichen Niederschläge (Juni-August) im KLIWA Gebiet. Auf der waagrecht-
 rechten Achse ist die relative Änderung der sommerlichen Niederschläge aufgetragen. Auf der senkrech-
 ten Achse ist die relative Änderung der Niederschlagssumme oberhalb des 99,99 Perzentils aufgetragen,
 also der Anteil des Niederschlags der als Starkregen fällt.

Der Anteil des sommerlichen Niederschlags, der als Starkregen oberhalb des 99,99 Perzentils fällt, steigt in allen Projektionen an. Die relative Änderung des Anteils liegt dabei zwischen 20 % in der MIROC5 angetriebenen DWD Projektion und 60 % in der MPI-ESM angetriebe-
 nen Projektion des KIT. Das bedeutet, dass die Sommer tendenziell trockener werden und der sommerliche Niederschlag vermehrt als Starkregen in wenigen, intensiven Ereignissen fällt.

3.3 Absoluter Anstieg der Intensität bei seltenen Ereignissen höher

Abbildung 5 zeigt die Intensität verschiedener Perzentile des Niederschlags in Beobachtung und Simulation für das KLIWA Gebiet. Das 99. Perzentil der Niederschläge ist bei stündlichen Daten unter Berücksichtigung niederschlagsfreier Tage noch nicht als Starkniederschlag zu werten. Das 99,9 Perzentil des Niederschlags, wird in einigen Publikationen (Adinolfi, Raffa, Reder, & Mercogliano, 2020) schon als Starkniederschlag bezeichnet. Nach Definition der DWD-Warnschwellen wird Niederschlag erst ab Werten von 15 mm/h als Starkniederschlag bezeichnet. Das 99,99 Perzentil liegt in diesem Bereich. Es gibt in etwa die im Mittel höchste einstündige Niederschlagssumme eines Jahres an.

Die schwarzen Dreiecke in Abbildung 5 symbolisieren den Beobachtungsdatensatz RAD-KLIM, der lediglich 20 Jahre Daten beinhaltet, während die anderen Symbole für Zeiträume von 30 Jahren, im Falle der historischen GUF Simulation sogar 34 Jahren, stehen. Die Simulationen für den Zeitraum Ende des 20. Jahrhunderts sind blau und die Projektionen (RCP8.5) für Ende des 21. Jahrhunderts rot gekennzeichnet. Die Simulationen zeigen für das 99,99 und 99,999 Perzentil in allen Projektionen einen Anstieg gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts. Das absolute Niveau der Perzentile ist je nach Projektion unterschiedlich. Der absolute Anstieg fällt zudem umso größer aus, je größer das Ausgangsniveau. Das DWD Modell bildet immer den oberen Rand der Intensitäten und das GUF Modell den unteren Rand, während die drei KIT Projektionen dazwischenliegen.

Perzentile ab 0mm/h für Maske KW

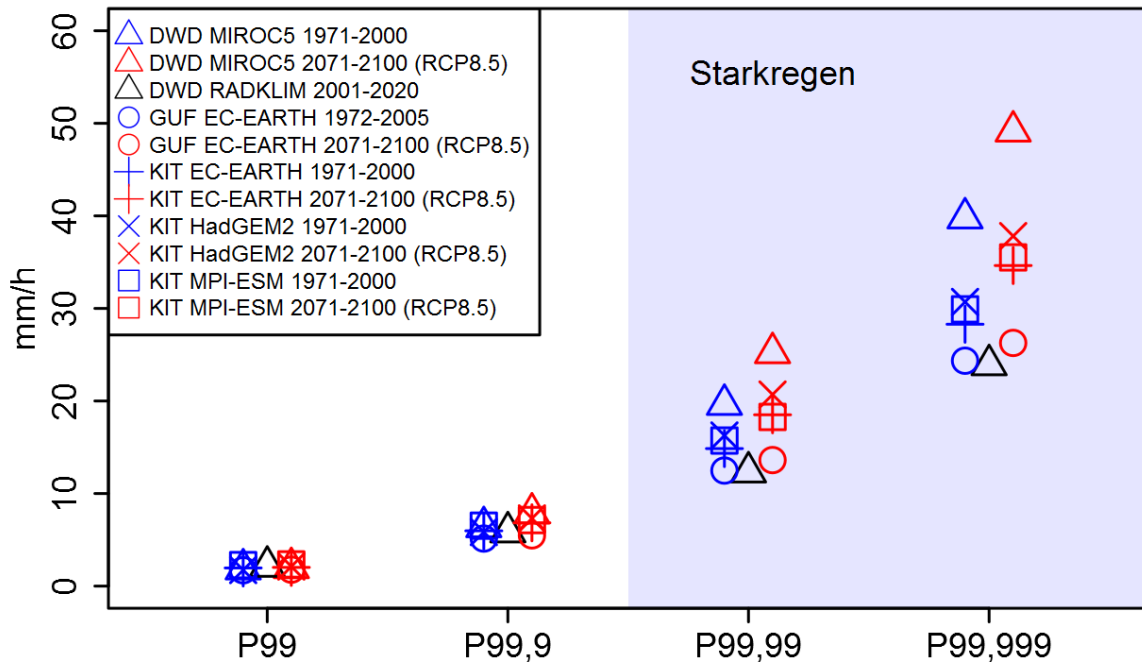


Abbildung 5: Perzentile der einstündigen Niederschlagsintensität im KLIWA Gebiet. Blau dargestellt sind Simulationen im Bezugszeitraum Ende des 20. Jahrhunderts. Rot dargestellt sind Simulationen im Projektionszeitraum Ende des 21. Jahrhunderts. Die schwarzen Dreiecke zeigen die Lage der Perzentile im RADKLIM Datensatz 2001-2020.

3.4 Deutlicher Anstieg der Regenintensität in den Nachtstunden

Der Tagesgang des 99,99 Perzentils der sommerlichen Niederschläge im KLIWA Gebiet zeigt in den RADKLIM Daten nachmittags gegen 17:00 Uhr (MESZ) ein ausgeprägtes Maximum (Abbildung 6 in Schwarz). Dieses Maximum in der zweiten Tageshälfte zeigen auch alle Projektionen im Referenzzeitraum (nicht gezeigt). Der Anstieg der Intensität am Ende des 21. Jahrhunderts erfolgt in starker Abhängigkeit von der Tageszeit. Der relativ stärkste Anstieg der Niederschlagsintensität gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts tritt in allen Projektionen in den Nacht- und Morgenstunden auf (Abbildung 6 in Rot). Am frühen Nachmittag ist der Anstieg am schwächsten ausgeprägt. In der relativen Stärke des Anstiegs unterscheiden sich die Projektionen deutlich untereinander. Während die DWD Projektion einen nächtlichen Anstieg um bis zu 50 % erwartet, ist der Anstieg in der GUF Projektion nachts nur etwa 20 % und tagsüber nahe Null.

Relative Änderung des Tagesganges 99,99 Perzentil ab 0mm/h für Maske KW JJA

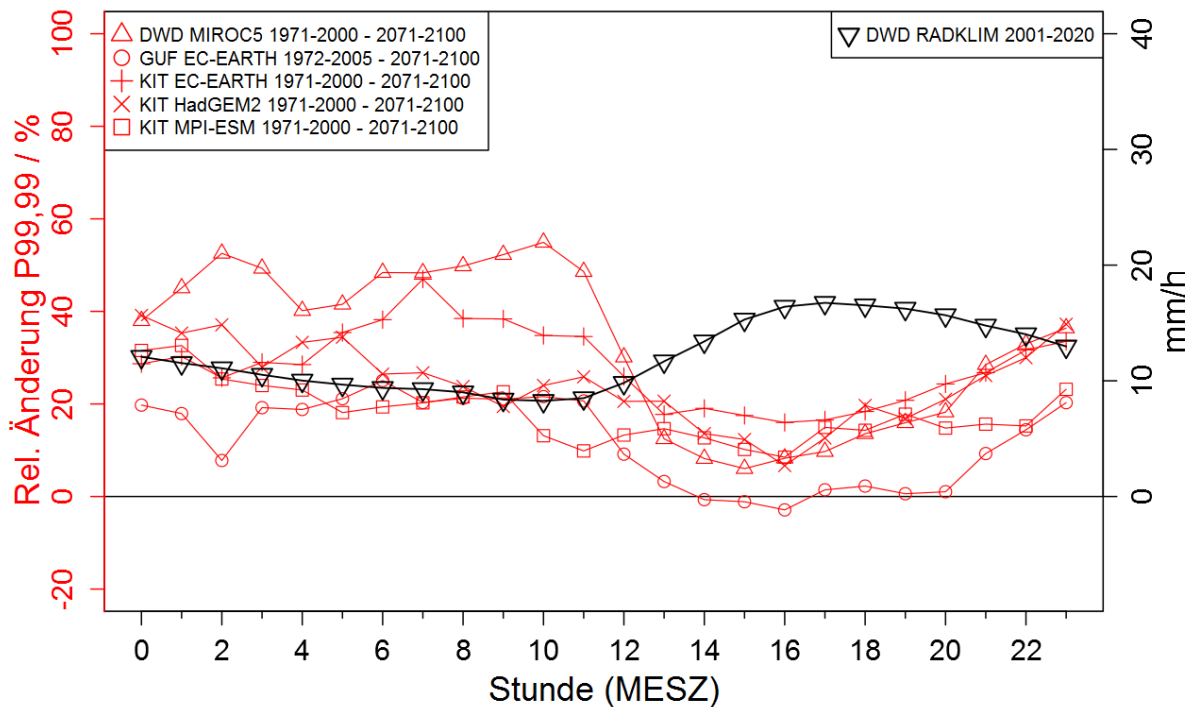


Abbildung 6: Tagesgang des 99,99 Perzentils der beobachteten sommerlichen RADKLIM Niederschläge im KLIWA Gebiet in Schwarz auf der rechten Achse. Relative Änderung des 99,99 Perzentils der sommerlichen Niederschläge in den Projektionen Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem Ende des 20. Jahrhunderts aufgetragen gegen die Tageszeit auf der linken Achse.

3.5 Geringe regionale Unterschiede in der Starkregenänderung bei großer Bandbreite der Modelle

Als Beispiel für die regionale Veränderung von Starkregenereignissen ist in Abbildung 7 die Veränderung der Intensität des 99,99 Perzentils des Niederschlags nach Bundesländern dargestellt. In allen untersuchten Bundesländern und in jedem Modell ist ein Anstieg zu verzeichnen. Die Stärke des Anstiegs fällt je nach Bundesland und Modell unterschiedlich aus.

Für das gesamte KLIWA Gebiet beträgt der Anstieg zwischen 10 % im GUF Lauf und 30 % im DWD Lauf. Die KIT Läufe ordnen sich dazwischen ein. Diese Reihung ist in allen Bundesländern vorhanden, wobei die Abstände zwischen den Modellen von Bundesland zu Bundesland variieren. In Hessen ist die Spanne zwischen dem stärksten und niedrigsten Anstieg am größten, während in Baden-Württemberg alle Modelle bis auf das GUF Modell in einem Bereich um 20 % relativ nahe beieinander liegen. Insgesamt sind die Unterschiede

zwischen den Modellen größer als zwischen den Regionen, so dass Aussagen über regionale Unterschiede im Änderungssignal nur eingeschränkt getroffen werden können.

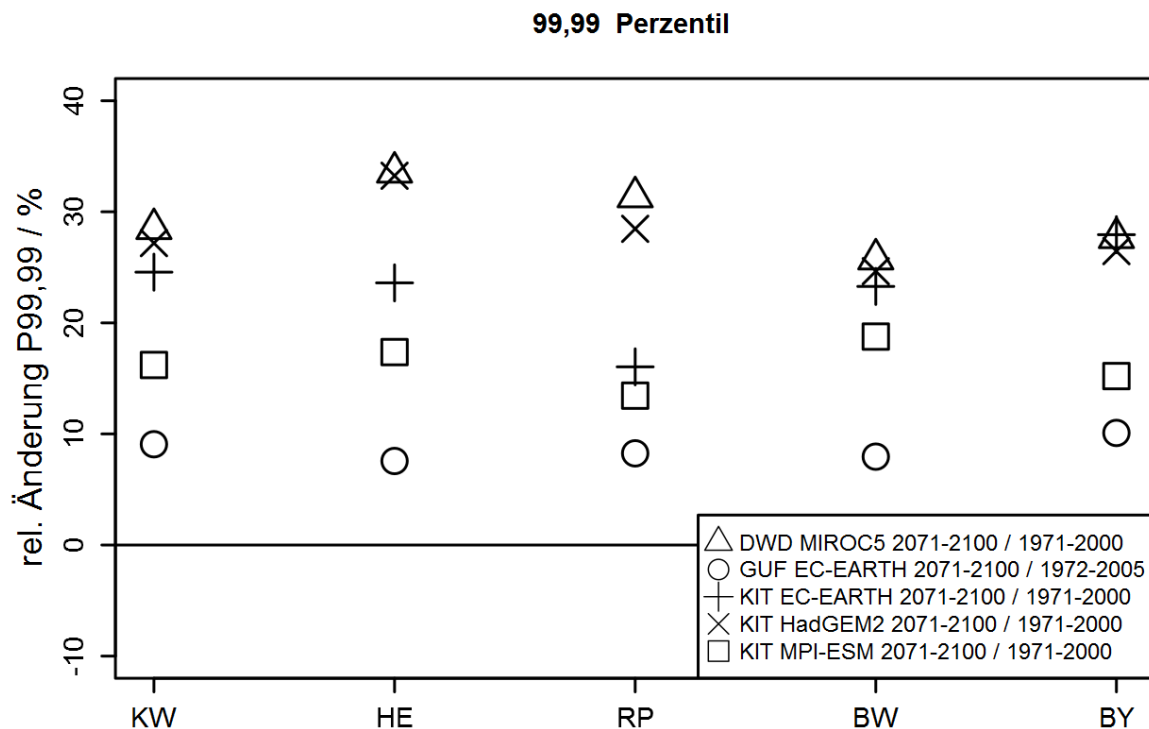


Abbildung 7: Relative Änderung der Intensität des 99,99 Perzentils des Niederschlags im gesamten KLIWA Gebiet (KW) und in den einzelnen Bundesländern Hessen (HE), Rheinland-Pfalz (RP), Baden-Württemberg (BW) und Bayern (BY).

3.6 Wiederkehrzeiten verkürzen sich

Die Analyse der Veränderung der Wiederkehrzeiten in Abhängigkeit der Dauerstufe erfolgt anhand der Definitionen der DWA-Richtlinie 531 (DWA, 2012). Die ursprünglich zur Auswertung von Stationsdaten entwickelte Methodik (Junghänel, Ertel, & Deutschländer, 2017) wurde auf die Modelldaten der konvektionserlaubenden Projektionen übertragen. Die Ergebnisse zeigen, im Einklang mit der Intensivierung der stündlichen Starkniederschläge (Abbildung 5), eine Verringerung der Wiederkehrzeit zum Ende des 21. Jahrhunderts. Aus Abbildung 8 wird ersichtlich, dass ein Starkniederschlag, welcher im historischen Zeitraum im statistischen Mittel alle 10 Jahre stattgefunden hat, je nach Modell und Region am Ende des 21. Jahrhunderts alle 3 bis 8 Jahre auftreten kann. Die Unterschiede zwischen den Bundesländern sind dabei kleiner als die Unterschiede zwischen den Modellen. Die moderateste Veränderung der Wiederkehrzeiten zeigt das GUF Modell, mit einer Verkürzung von 10 Jahren auf 6 bis 8 Jahre. In den anderen Modellen fällt diese Verkürzung stärker aus und die zukünftige Wiederkehrzeit liegt zum Teil zwischen 3 und 4 Jahren, was eine Verdreifachung der Auftrittshäufigkeit bedeuten würde.

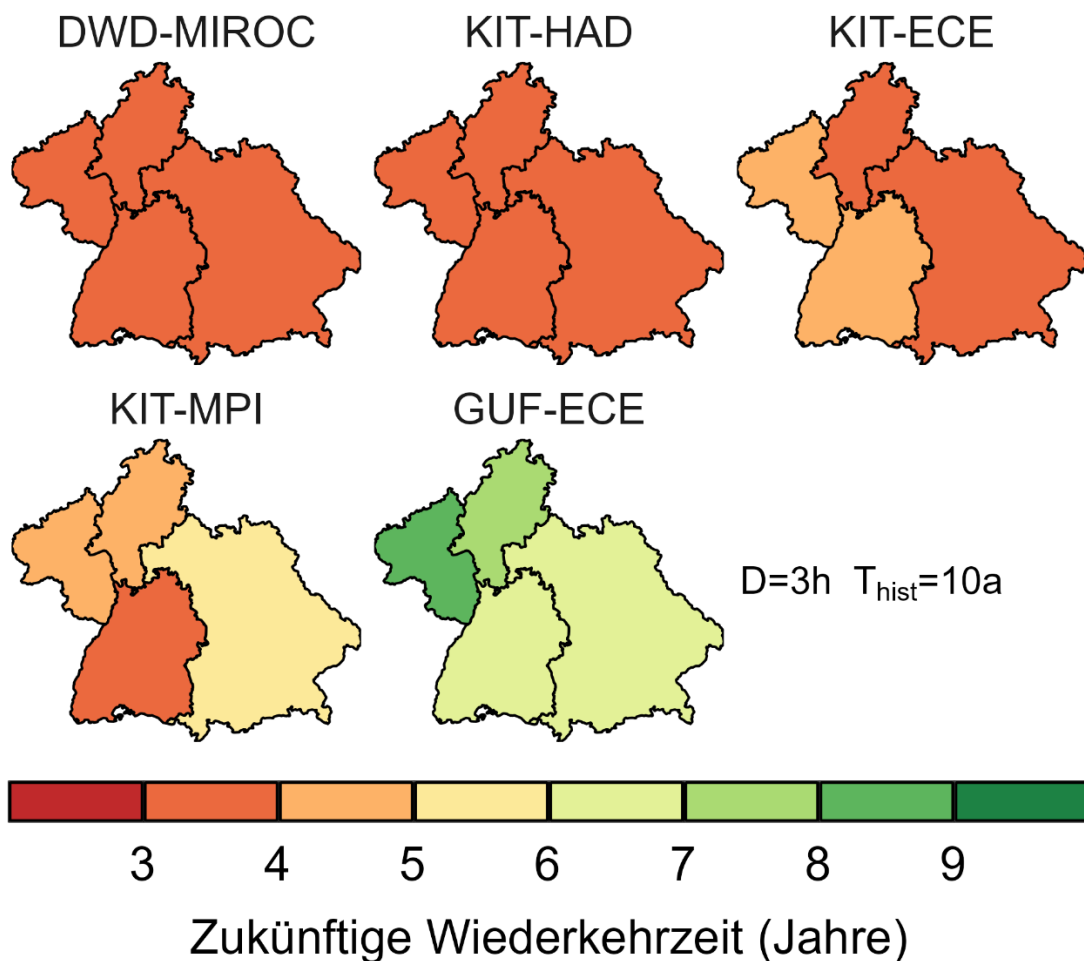


Abbildung 8: Wiederkehrzeiten nach Bundesländern für ein dreistündiges Ereignis Ende des 21. Jahrhunderts, das Ende des 20. Jahrhunderts alle 10 Jahre stattgefunden hat.

3.7 Die Intensitäten steigen vom Starkregen- bis in den Dauerregenbereich

In Ergänzung zur Perzentilbetrachtung für die Niederschlagsdauer von einer Stunde (Abschnitt 3.3), kann eine Änderung der Intensität für Ereignisse verschiedener Dauerstufen vom Starkregenbereich, mit sechs oder weniger Stunden Dauer, bis in den Dauerregenbereich, mit über sechs Stunden Dauer, angegeben werden. Abbildung 9 zeigt diese Intensitätsänderung für Niederschlagssummen mit einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren für verschiedene Dauerstufen. Das Änderungssignal im konvektionserlaubenden Ensemble weist eine Bandbreite zwischen gut 10 % für die GUF Simulation und knapp 30 % für die DWD Simulation auf. Bei diesen beiden Simulationen ist der projizierte Anstieg unabhängig von der Dauerstufe, während er in den KIT MPI-ESM und KIT EC-Earth Simulationen hin zu kürzeren Dauerstufen zunimmt. Neben dem konvektionserlaubenden Ensemble zeigt Abbildung 9 auch die Ergebnisse aus einem konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensemble mit 12 km Gitterweite, welches aus insgesamt neun Modellkombinationen besteht, die im DWD Referenzensemble¹ enthalten sind. Die konvektionserlaubenden Modelle liegen immer innerhalb der Bandbreite des EURO-CORDEX Ensembles. Für Dauerstufen größer 24 Stunden weisen die konvektionserlaubenden

¹ https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html

Läufe und das EURO-CORDEX Ensemble eine vergleichbare Bandbreite auf. Hin zu kürzeren Dauerstufen liegen die konvektionserlaubenden Modelle zunehmend in der unteren Hälfte der Bandbreite des EURO-CORDEX Ensembles.

Unterhalb von 3 Stunden sind aus den EURO-CORDEX Läufen keine Daten verfügbar. Hier erweitert das konvektionserlaubende Ensemble den Bereich über den Aussagen getroffen werden können. Danach setzt sich der Anstieg der Intensität auch zu kürzeren Dauerstufen hin fort, steigt aber nicht über 30 %.

Für eine Wiederkehrzeit von 10 Jahren (Abbildung 10) sind die Ergebnisse sehr ähnlich wie für 30 Jahre. Für häufigere Ereignisse mit einer Wiederkehrzeit von nur einem Jahr verändert sich das Muster (Abbildung 11). Nun sind die Ergebnisse der konvektionserlaubenden Projektionen auch bei den Dauerstufen im Starkregenbereich (6 Stunden oder kürzer) auf beiden Seiten des Medians der konvektionsparametrisierenden Simulationen zu finden. Außerdem nimmt die Intensitätsänderung neben den beiden KIT Simulationen jetzt auch in der DWD-MIROC5 Simulation hin zu kürzeren Dauerstufen zu und überschreitet sogar leicht die 30%.

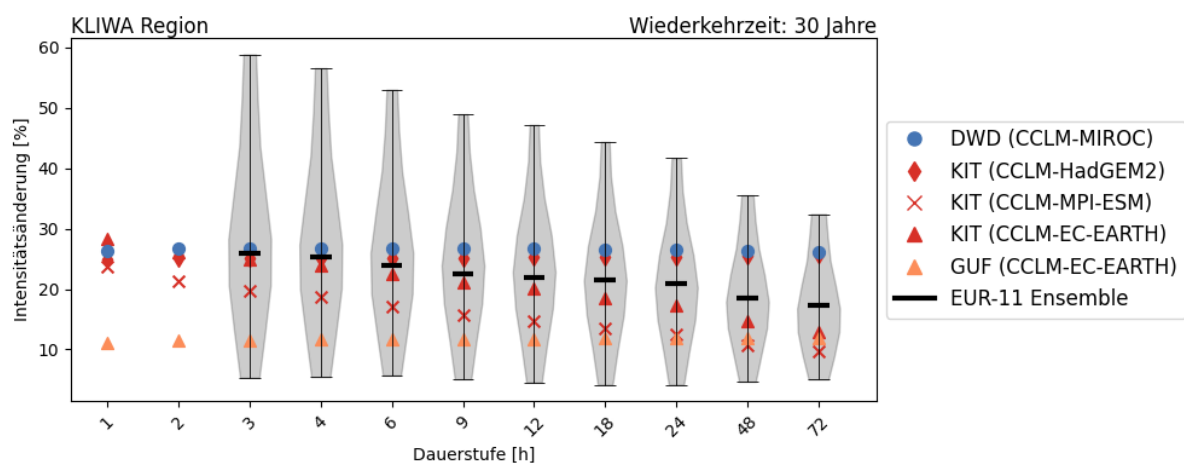


Abbildung 9: Änderung der Intensität von Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren im Projektionszeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum für verschiedene Dauerstufen. Die Violinplots in Grau zeigen die Bandbreite eines konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensembles mit dem Median als schwarzem Balken.

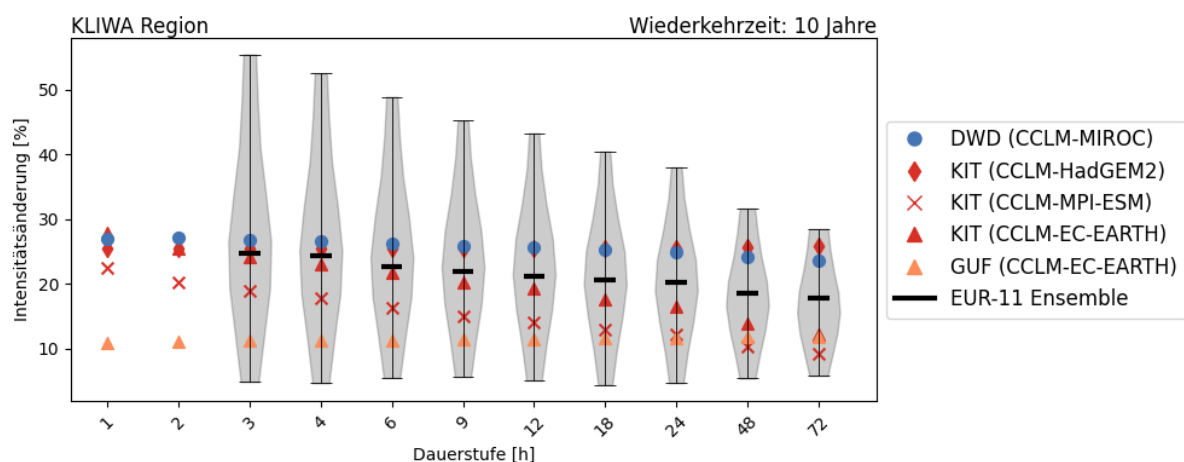


Abbildung 10: Änderung der Intensität von Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 10 Jahren im Projektionszeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum für verschiedene Dauerstufen. Die Violinplots in Grau

zeigen die Bandbreite eines konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensembles mit dem Median als schwarzem Balken.

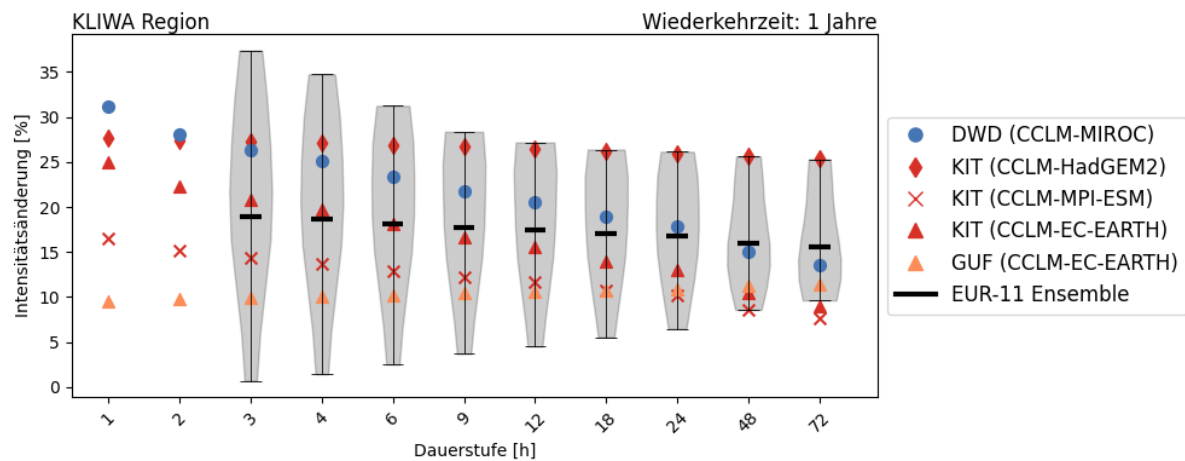


Abbildung 11: Änderung der Intensität von Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 1 Jahr im Projektionszeitraum gegenüber dem historischen Zeitraum für verschiedene Dauerstufen. Die Violinplots in Grau zeigen die Bandbreite eines konvektionsparametrisierenden EURO-CORDEX Ensembles mit dem Median als schwarzem Balken.

3.8 Kernbotschaften

- Konvektionserlaubende regionale Klimaprojektionen bilden den Tagesgang und die Intensität von Niederschlägen besser ab als konvektionsparametrisierende regionale Klimaprojektion.
- Starkniederschläge werden im Klima der Zukunft über alle Dauerstufen häufiger auftreten bzw. intensiver werden.
- Der absolute Anstieg der einstündigen Niederschlagsintensität ist bei selteneren Ereignissen am größten.
- Die Sommer der Zukunft werden dabei trockener und der Anteil der Starkniederschläge am sommerlichen Niederschlag steigt.
- Der relative Anstieg in der Intensität der sommerlichen Starkniederschläge ist in den Nachtstunden am größten.
- Die Bandbreite der Änderungssignale ist groß und ermöglicht keine Identifikation von regionalen Unterschieden.

4 Literaturverzeichnis

- Adinolfi, M., Raffa, M., Reder, A., & Mercogliano, P. (December 2020). Evaluation and Expected Changes of Summer Precipitation at Convection Permitting Scale with COSMO-CLM over Alpine Space. *Atmosphere*, 12, 54. doi:10.3390/atmos12010054
- DWA. (2012). *Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer*. Tech. rep., Hennef, Germany: DWA: German Association for Water, Wastewater and Waste (in German). Von <https://webshop.dwa.de/de/dwa-a-531-starkregen-9-2012.html> abgerufen
- Hundhausen, M., Feldmann, H., Laube, N., & Pinto, J. G. (August 2023). Future heat extremes and impacts in a convection-permitting climate ensemble over Germany. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 2873–2893. doi:10.5194/nhess-23-2873-2023
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., . . . Yiou, P. (July 2013). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2
- Junghänel, T., Ertel, H., & Deutschländer, T. (2017). *KOSTRA-DWD2010R: Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010*. Tech. Rep., Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., Germany. Von https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/ abgerufen
- KLIWA. (2019). *Starkniederschläge - Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft*. Tech. rep., Kooperation KLIWA „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“. Von https://www.kliwa.de/_download/KLIWA-Kurzbericht_Starkregen.pdf abgerufen
- Meredith, E. P., Ulbrich, U., Rust, H. W., & Truhetz, H. (May 2021). Present and future diurnal hourly precipitation in 0.11° EURO-CORDEX models and at convection-permitting resolution. *Environmental Research Communications*, 3, 055002. doi:10.1088/2515-7620/abf15e
- Purr, C., Brisson, E., & Ahrens, B. (January 2021). Convective rain cell characteristics and scaling in climate projections for Germany. *International Journal of Climatology*, 41, 3174–3185. doi:10.1002/joc.7012
- Rybka, H., Haller, M., Brienens, S., Brauch, J., Früh, B., Junghänel, T., . . . Winterrath, T. (January 2022). Convection-permitting climate simulations with COSMO-CLM for Germany: Analysis of present and future daily and sub-daily extreme precipitation. *Meteorologische Zeitschrift*. doi:10.1127/metz/2022/1147
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (September 2003). The Changing Character of Precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 1205–1218. doi:10.1175/bams-84-9-1205
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Lengfeld, K., . . . Becker, A. (2018). Radar climatology (RADKLIM) version 2017.002; gridded precipitation data for Germany. *Radar climatology (RADKLIM) version 2017.002; gridded precipitation data for Germany*. Deutscher Wetterdienst (DWD). doi:10.5676/DWD/RADKLIM_RW_V2017.002