



Stephan Thober, Andreas Marx, Friedrich Boeing

---

# Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland

---

Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochoaufgelöste Klimaindikatoren  
bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

MITTELDEUTSCHES  
Klimabüro



HELMHOLTZ  
ZENTRUM FÜR  
UMWELTFORSCHUNG  
UFZ

## Kurz gesagt – zentrale Aussagen des Projektes HOKLIM für Deutschland

- *Mit zunehmender globaler Erwärmung verschärfen sich sowohl sommerliche Niedrigwassersituationen als auch landwirtschaftliche Dürren.*
- *Eine Erwärmung von 3 Grad im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000 würde für Teile Süddeutschlands eine Verdopplung der Dürredauer bedeuten.*
- *Im Gegensatz hierzu ergeben sich nur geringe Änderungen für Hochwasser unter allen untersuchten Erwärmungsgraden von 1.5, 2 und 3 Grad.*
- *Insgesamt nehmen die negativen Veränderungen zwischen 2 und 3 Grad signifikant zu, so dass auch für Deutschland und die betrachteten Extremereignisse eine Begrenzung der Erderwärmung auf 2 Grad vorteilhaft wäre.*
- *Unterschiede aller untersuchten Indizes zwischen einer globalen Erwärmung von 1.5 und 2 Grad sind in Deutschland relativ klein und lassen nur Aussagen mit geringer Sicherheit zu.*

## Impressum

Herausgeber: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ  
Permoserstraße 15 | 04318 Leipzig  
Telefon 0341/235-1269 | E-Mail: [info@ufz.de](mailto:info@ufz.de) | Internet: [www.ufz.de](http://www.ufz.de)

Autoren: Stephan Thober, Andreas Marx, Friedrich Boeing

Projektleitung HOKLIM: Stephan Thober

Beitragende: Robert Schweppe (UFZ), Rohini Kumar (UFZ), Niko Wanders (Utrecht University), Oldrich Rakovec (UFZ), Ming Pan (Princeton University), Matthias Zink (UFZ, ECMWF), Justin Sheffield (Climate Partnership LLC, University of Southampton), Eric Wood (Climate Partnership LLC), Luis Samaniego (UFZ)

Bildnachweise: Titel links/S. 7: Andreas Marx (UFZ), Titel mitte/S. 10: Mikael Lever (Fotolia), Titel rechts/S.13 André Künzelmann (UFZ)

Layout: Susanne Döhler (UFZ)

Mai 2018

## Inhalt

<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1 Projektübersicht und Zielsetzung	2
1.2 Methoden	3
Datenbasis – Erarbeitung eines Klima-Hydrologie-Modellensembles und das Projekt EDgE	3
Wann werden 1.5, 2, und 3 Grad globale Erwärmung erreicht?	3
Was sind Perzentile?	4
1.3 Ergebnisse der Studien für Europa zu hydrologischen und agrarischen Dürren sowie Hochwasser	5
1.4 Meteorologische Änderungen in Deutschland	6
<b>2. Landwirtschaftliche oder agrarische Dürre</b>	<b>7</b>
<b>3. Niedrigwasser</b>	<b>10</b>
<b>4. Hochwasser</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>17</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>HOKLIM</b>	Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad
<b>UNFCCC</b>	United Nations Framework Convention on Climate Change
<b>EC</b>	European Commission
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
<b>EDgE</b>	End-to-end Demonstrator for improved decision-making in the water sector in Europe, Copernicus Climate Change Service of the ECMWF
<b>TERENO</b>	Terrestrial Environmental Observatories
<b>LfU Bayern</b>	Bayerisches Landesamt für Umwelt
<b>HM</b>	hydrologisches Modell
<b>mHM</b>	mesoskaliges hydrologisches Modell
<b>Noah-MP</b>	Noah-Multiparameterization Land Surface Model
<b>PCRGLOB-WB</b>	PCRaster Global Water Balance Model
<b>VIC</b>	Variable Infiltration Capacity Macroscale Hydrologic Model
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathways
<b>GKM</b>	Globale Klimamodelle

# 1. Einleitung

## 1.1 Projektübersicht und Zielsetzung

Der Klimawandel verändert die Wasserverfügbarkeit in Deutschland und Europa zunehmend. Das hat Auswirkungen auf Flusswasserstände und auf das im Boden vorhandene, pflanzenverfügbare Wasser.

Im Jahr 2015 beschloss die Konferenz der Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten und die Bemühungen fortzusetzen, den Temperaturanstieg auf 1.5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen (Paris-Abkommen, UNFCCC 2015). Im Gegensatz zum 2012 ausgelaufenen Kyoto-Protokoll, das auf spezifische und langfristige nationale Treibhausgasreduktionsziele fokussierte, rückten damit im Paris-Abkommen die globalen Erwärmungslimits von 1.5 °C und 2 °C in den Vordergrund.

Die Forschung zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesellschaft und die Umwelt hat sich jedoch in den letzten Jahren vor allem auf Klimaprojektionen konzentriert, welche von einer Erwärmung von 2 °C bis 3 °C und darüber hinaus ausgehen. Vor diesem Hintergrund wurde der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) aufgefordert, einen Sonderbericht über die Auswirkungen des Klimawandels unter einer Erwärmung von 1.5°C (IPCC SR1.5) zu erstellen. Hier setzt das Projekt HOKLIM an.

Ziel des Projektes ist es, die wissenschaftliche Informationsbasis für den IPCC SR1.5 in Europa und Deutschland zu erweitern, sowie Diskussions- und Entscheidungsgrundlagen für regionale Entscheidungsträger in Deutschland bereitzustellen.

Für Europa wurden wissenschaftliche Studien zu den Themenkomplexen Bodenfeuchtedürren (Samaniego und Thober et al. 2018), Niedrigwasser (Marx et al. 2018) und Hochwasser (Thober et al. 2018) verfasst (s. Abschnitt 1.3). Auf Basis der in diesen Studien generierten Daten wurden die Ergebnisse für Deutschland und die Bundesländer aufbereitet. Sie werden in dieser Broschüre vorgestellt. Ob eine Begrenzung der globalen Erwärmung auf 2 °C oder 3 °C erreicht werden kann, bleibt angesichts der geschätzten weltweiten Emissionen der letzten Jahrzehnte (Peters et al. 2012) und der bisher gemachten Zusagen zu Treibhausgasemissionen unter dem Paris-Abkommen unklar. Vor diesem Hintergrund konzentrieren sich die hier durchgeführten Klimafolgenabschätzungen auf die globalen Erwärmungsgrade 1.5, 2 und 3 °C. In Deutschland wurden Anpassungsstrategien sowohl national als auch in den Bundesländern erarbeitet. Die in HOKLIM erarbeiteten Ergebnisse werden daher auch in den einzelnen Kapiteln in Tabellenform für die Bundesländer gezeigt, um die Informationsbasis auf dieser Ebene zu erweitern. Da eine räumliche Überinterpretation vermieden werden soll, wurden einige Stadtstaaten und Bundesländer zusammen betrachtet (z.B. Berlin gemeinsam mit Brandenburg).

Weitergehende Informationen zu Klimafolgen, aber auch zu gesellschaftlichen Auswirkungen – etwa von Extremereignissen, finden sich in den Assessments „Klimawandel in Deutschland“ (Brasseur et al. 2016) und „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ (adelphi/PRC/EURAC 2015). Diese sind jeweils kostenfrei und online verfügbar.

## 1.2 Methoden

### Datenbasis – Erarbeitung eines Klima-Hydrologie-Modellensembles und das Projekt EDgE

Die Auswertung innerhalb des HOKLIM-Projektes basiert auf hochaufgelösten hydrologischen Simulationen für ganz Europa. Hierfür wurden vier verschiedene hydrologische Modelle (HM: mHM, Noah-MP, PCRLOB-WB, und VIC) benutzt. Diese wurden mit meteorologischen Daten von fünf globalen Klimamodellen (GKM) für den Zeitraum 1950 bis 2099 angetrieben. Für Simulationsjahre nach 2005 wurden drei Zukunftsszenarien betrachtet (Representative Concentration Pathways: RCP2.6, RCP6.0, und RCP8.5). Diese bilden eine weite Spannweite von CO<sub>2</sub>-Reduktionen ab (RCP2.6, keine Emissionen ab 2080 / RCP8.5, weiter steigende Emis-

sionen bis 2100). Insgesamt ergibt sich damit ein Multimodellensemble mit 60 Simulationen (3 RCPs, 5 GKMs, 4 HMs). Ein Teil der Klima-Hydrologie-Simulationen wurden bereits im vom ECMWF geförderten Projekt EDgE erstellt. Diese wurden innerhalb des HOKLIM-Projektes um das RCP6.0 erweitert. In EDgE<sup>1</sup> wurde ein Demonstrator für ein sektorales, europaweites Wasserinformationssystem für die Copernicus Climate Change Services erstellt. Aus logistischen Gründen konnten für die Auswertung von Hoch- und Niedrigwassern nur drei hydrologische Modelle und damit 45 Simulationen genutzt werden.

### Wann werden 1.5, 2 und 3 Grad globale Erwärmung erreicht?

Die meisten Klimawirkstudien untersuchen Änderungen für spezifische zukünftige Zeiträume (z.B. 2051-2080) unter verschiedenen Emissionsszenarien oder Konzentrationspfaden (RCPs). Ein gravierender Nachteil dieser Analyse ist, dass innerhalb spezifischer Zeiträume der globale Temperaturanstieg eine große Spannweite aufweist. Unter RCP8.5 beträgt dieser z.B. 2.6 bis 4.8 °C bis 2100<sup>2</sup>. Diese Spannweite erzeugt eine große Unsicherheit in Klimafolgenstudien und erschwert es, Anpassungsmaßnahmen abzuleiten.

Die Arbeiten innerhalb des HOKLIM-Projektes werten stattdessen Änderungen für bestimmte Erderwärmungsgrade aus. Diese reichen von 1 bis 3 °C. Dieses Vorgehen eliminiert die oben beschriebenen Unsicherheiten und erlaubt es, Klimafolgen bei einem Anstieg der Globaltemperatur um einen bestimmten Betrag dezidiert abzuschätzen.

Eine Beurteilung verschiedener Anstiege der Globaltemperatur hat seit dem Pariser Klimaabkommen an Bedeutung gewonnen, da sich politische Ziele seitdem verstärkt am Anstieg der Globaltemperatur orientieren.

Eine Besonderheit dieser Auswertung ist, dass eine bestimmte Globaltemperatur (z.B. 2 °C im Vergleich zu vorindustriellen Bedingungen) zu verschiedenen Zeitpunkten erreicht wird. Diese Zeitpunkte hängen vom betrachteten Globalen Klimamodell (GKM) und den Konzentrationspfaden (RCP) ab. Die Definition von vorindustriellen Bedingungen und die damit einhergehende Bestimmung der Erwärmung bis zum Referenzzeitraum 1971-2000 ist mit einer zu vernachlässigenden Unsicherheit verbunden. Weitergehende Informationen finden sich im Anhang zu dieser Broschüre unter [www.ufz.de/hoklim](http://www.ufz.de/hoklim).

<sup>1</sup> <http://edge.climate.copernicus.eu/Tools/>

<sup>2</sup> Temperaturunterscheide werden in Kelvin [K] angegeben. Umgangssprachlich wird jedoch zumeist ‚Grad‘ oder in Texten auch °C genutzt.

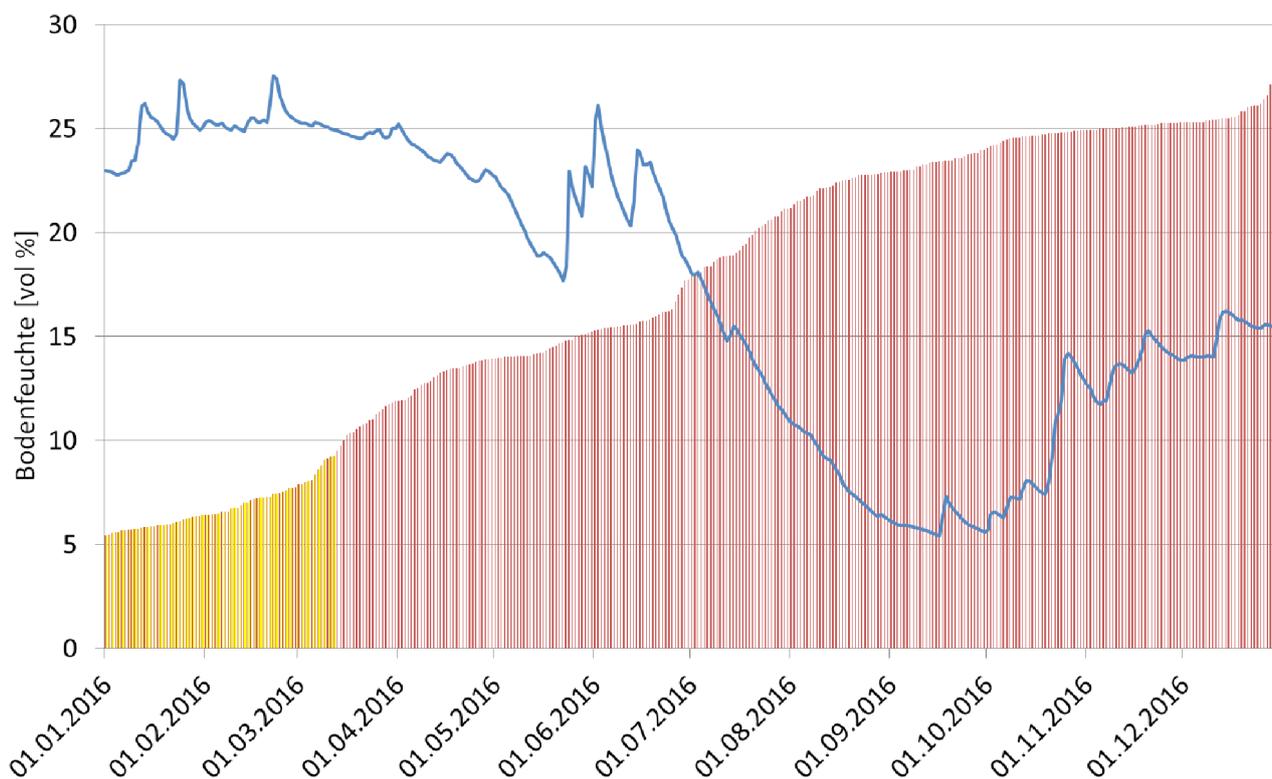


Abb. 1 Gemessene Bodenfeuchte im Hohen Holz 2016 (blaue Linie) und daraus abgeleitete kumulative Verteilungsfunktion (rote Balken). Die niedrigsten 20 Prozent der Werte unterhalb des 20-Perzentils sind gelb markiert.

## Was sind Perzentile?

„Zu viel“ (Hochwasser) oder „zu wenig“ Wasser (hydrologische und agrarische Dürren) bezeichnet eine Abweichung vom Normalzustand. Diese Extremsituationen werden in der Regel statistisch mit Perzentilen beschrieben. Die Berechnung soll hier im Folgenden anhand der gemessenen Bodenfeuchte am TERENO-Standort Hohes Holz exemplarisch verdeutlicht werden. Die gemessene tägliche Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe im Jahr 2016 ist in **Abb. 1** als blaue Linie zu sehen. Aus diesen Daten wurde eine kumulative Häufigkeitsverteilung erstellt (rote Balken), indem die Tagesdaten der Größe nach aufsteigend geordnet wurden. In Gelb sind die kleinsten 20 % der Werte markiert. Das 20-Perzentil bezeichnet den Grenzwert der von diesen 20 % der Werte unterschritten wird. Das entspricht dem Bodenfeuchtwert, der an 73 Tagen im Jahr unterschritten wird, in diesem Fall 9.25 vol %. Das 20-Per-

zentil der Bodenfeuchte wird also in diesem Beispiel an 293 Tagen des Jahres überschritten und nur an 73 Tagen unterschritten – es wird oft als Indikator für agrarische Dürre verwendet.

In HOKLIM wurden die Perzentile nicht aus den Bodenfeuchtedaten für ein Jahr, sondern für jede Ensemble-Simulation über die Monatswerte für einen bestimmten Kalendermonat über 30 Jahre (z. B. alle Mai-Werte von 1971 bis 2000 und für einen Erwärmungsgrad, z.B. 1.5 °C) berechnet und miteinander verglichen. Alle hier zusammengefassten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf den Median des gesamten Modellensembles. Genauere Informationen zu den Unsicherheiten innerhalb des Modellensembles befinden sich in den Publikationen Thober et al. 2018, Marx et al. 2018 und Samaniego und Thober et al. 2018.

### 1.3 Ergebnisse der Studien für Europa zu hydrologischen und agrarischen Dürren sowie Hochwasser

Den in dieser Broschüre gezeigten Ergebnissen für Deutschland liegen europaweite Studien zugrunde, deren Ergebnisse hier kurz skizziert werden. Die globale Erwärmung wird das Problem der agrarischen Dürren in Europa verschärfen – Dürren werden länger dauern, mehr Flächen und damit mehr Menschen betreffen. Erwärmt sich die Erde um 3 °C, werden Extremereignisse wie die Dürre im Jahr 2003 künftig in weiten Teilen Europas nicht mehr als Dürre klassifiziert, sondern dem Normalzustand zugeschrieben.

Negative Folgen sind vor allem für die Region rund um das Mittelmeer zu erwarten, wo sich Dürregebiete im extremsten Fall von 28 Prozent der Fläche im Referenzzeitraum auf 49 Prozent der Fläche bei einer Erderwärmung von 3 °C ausbreiten könnten (Samaniego und Thober et al. 2018).

Genau wie bei den agrarischen Dürren verstärkt sich mit zunehmender Erwärmung auch die relative Änderung der Niedrigwasserabflüsse (Marx et al. 2018). Zunehmende Abflüsse bei Niedrigwassersituation finden sich vor allem in Skandinavien bei steigenden Temperaturen. In dieser Region entspannen

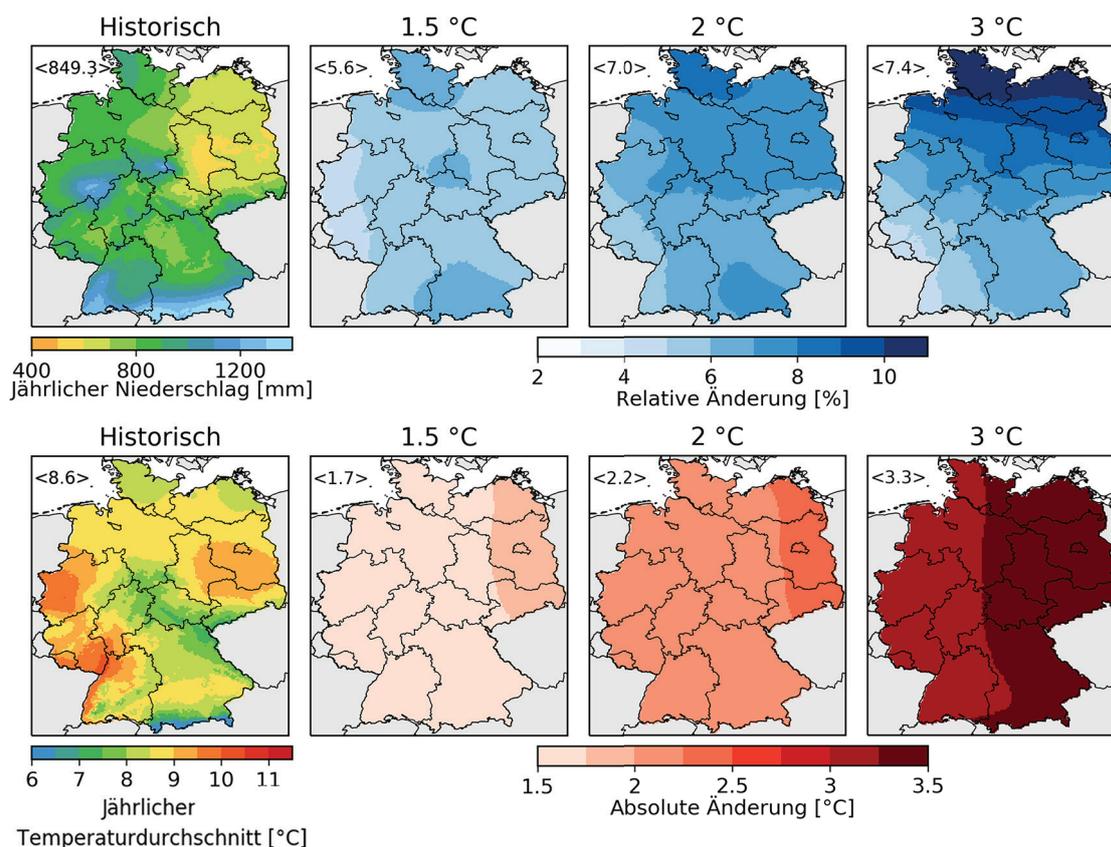
sich Niedrigwassersituationen durch höhere Jahresniederschläge. Umgekehrt ist wiederum der Mittelmeerraum – hier ist die Wassersituation schon heute angespannt – mit abnehmender Wasserverfügbarkeit im Jahresdurchschnitt und in Niedrigwassersituationen (teilweise Abnahmen der Durchflüsse um mehr als 50 %) zu rechnen. Damit wird sich der sektorale Kampf um die Ressource Wasser verstärken.

Die Entwicklung von Hochwasserereignissen entspannt sich dagegen im Mittelmeerraum. Mit zunehmender Erwärmung reduziert sich Hochwasser um durchschnittlich 5 % beim 1.5 °C-Szenario bis zu 17 % bei 3 °C globaler Erwärmung. Das ist hauptsächlich auf geringere Jahresniederschläge zurückzuführen. Kleine Abnahmen (um weniger als 10 %) werden für Flussgebiete in Mitteleuropa und auf den Britischen Inseln bei unterschiedlicher Erwärmung beobachtet. Die prognostizierten höheren Jahresniederschläge erhöhen zwar die hohen Abflüsse in Skandinavien, aber die reduzierte Schneeakkumulation und -schmelze führt zu einer leichten Verringerung der Hochwasserereignisse in dieser Region (Thober et al. 2018).

## 1.4 Meteorologische Änderungen in Deutschland

Zur besseren Einordnung der Änderungen in den hydrologischen Variablen werden hier zunächst die projizierten Änderungen in Niederschlag und Temperatur vorgestellt. Wie bereits in Abschnitt 1.3 beschrieben, gibt es in Nordeuropa (z.B. Skandinavien) Zunahmen im Jahresniederschlag und in Südeuropa (z.B. Mittelmeerraum) Abnahmen. Deutschland befindet sich in einem Übergangsbereich zwischen diesen beiden Regionen: Der Jahresniederschlag nimmt mit bis zu 10 % leicht zu (**Abb. 2**). Während bei einer Erderwärmung von 1.5 °C die Zunahmen in Süddeutschland noch höher sind als in Norddeutschland, kehrt sich dieses Muster bei einer Erderwärmung von 3 °C um. Im Gegensatz zu diesem

Nord-Süd-Gefälle zeigt sich für die erwarteten Temperaturerhöhungen ein Ost-West-Gefälle. Die Temperaturanstiege sind dabei in Ostdeutschland höher als in Westdeutschland. Der Grund hierfür ist, dass weiter westlich ein maritimeres Klima vorherrscht. Ozeane nehmen unter anderem mehr Energie auf und erwärmen sich weniger stark als Landmassen. Dies wird auch in **Abb. 2** ersichtlich, da der mittlere Temperaturanstieg für 1.5, 2 und 3 °C jeweils leicht über diesen Werten liegt. Die Erwärmung ist also schwächer, je näher die Ozeane zu einem Gebiet liegen. Sie ist somit im Westen etwas schwächer als im Osten Deutschlands.



**Abb. 2** Erwartete mittlere Änderungen im Jahresniederschlag (obere Zeile) und Temperatur (untere Zeile) von allen fünf in HOKLIM genutzten Klimamodellen. Für beide Variablen ist in der linken Abbildung das langjährige Mittel für den Referenzzeitraum von 1971-2000 gezeigt (ebenfalls aus Klimamodelldaten berechnet). Die jeweils drei rechten Abbildungen zeigen die relativen Änderungen bei einer Erderwärmung von 1.5, 2 und 3 °C.



## 2. Landwirtschaftliche oder agrarische Dürre

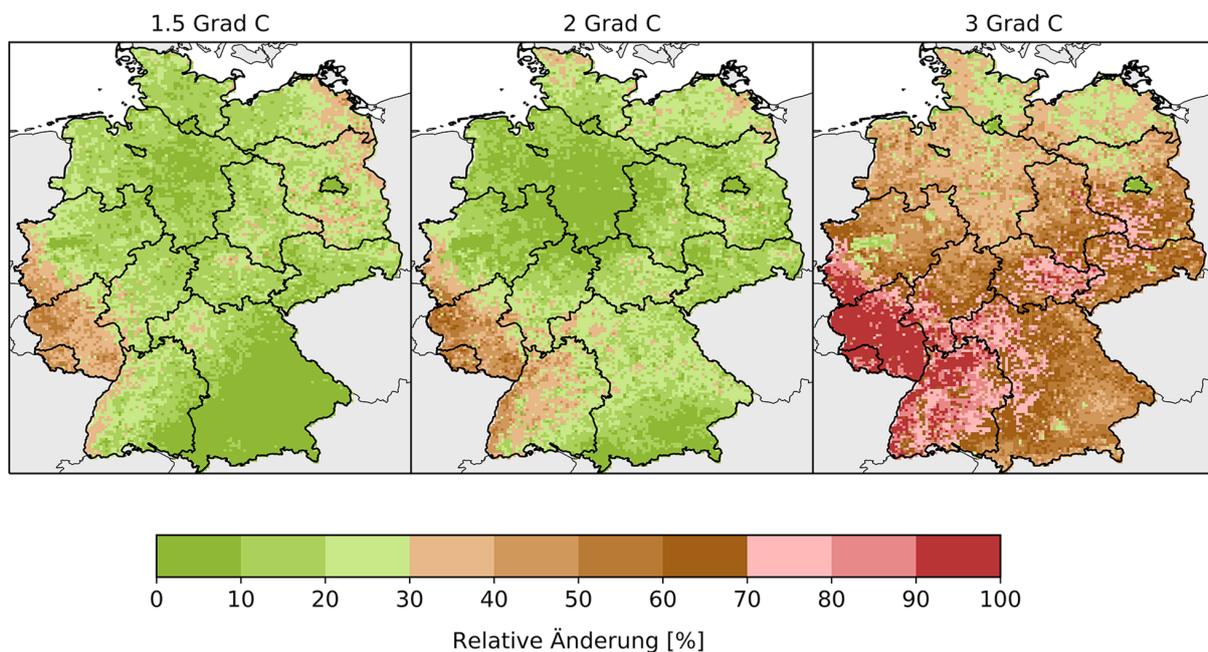
Landwirtschaftliche Dürren bezeichnen Ereignisse, bei denen weniger Wasser als im langjährigen Mittel im Boden enthalten ist. Diese Ereignisse reduzieren zumeist die Pflanzenproduktivität oder erhöhen das Waldbrandrisiko. Im Jahr 2015 hat die Trockenheit des Bodens in weiten Teilen Süd- und Ostdeutschlands zu Ertragsrückgängen z.B. beim Winterweizen geführt. Gegenüber dem Rekordjahr 2014 lag der Rückgang im bundesweiten Durchschnitt bei etwa 12 %, wobei regional Ertragsverluste von bis zu 40 % auftraten. Aktuelle Informationen zum Zustand von Bodenfeuchtedürren sind im deutschen Dürremonitor unter [www.ufz.de/duerremonitor](http://www.ufz.de/duerremonitor) verfügbar.

Der globale Temperaturanstieg führt zu einer Verstärkung von Bodenfeuchtedürren in Deutschland. Im historischen Zeitraum 1971-2000 liegt die durchschnittliche Anzahl der Dürremonate bei ungefähr zwei Monaten pro Jahr. Bei einer globalen Erwärmung von 3 °C steigt diese Zahl bundesweit um über 50 % (**Abb. 3**, rechts). Die am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen sind Rheinland-Pfalz, das Saarland und Baden-Württemberg

(**Tab. 1**). Im Norden Deutschlands (z.B. Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, nördliches Niedersachsen) nimmt die Zeit unter Trockenheit bei einer Erderwärmung von 3 °C ungefähr um ein Viertel zu. Eine Eindämmung der Erderwärmung auf 2 °C bzw. 1.5 °C würde den Anstieg der Dürredauer im deutschlandweiten Mittel auf ungefähr 18 % reduzieren (**Tab. 1**). Bei einer Erderwärmung von 3 °C muss für landwirtschaftliche Flächen in Süddeutschland (z.B. Rheinland-Pfalz und Saarland, Baden-Württemberg und Bayern) mit einer deutlichen Verringerung der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen von bis zu 20 mm (entspricht 20 Liter pro Quadratmeter) gerechnet werden (**Abb. 4**). Diese starken negativen Änderungen treten vor allem im Herbst (September bis November) auf. In den Wintermonaten (Dezember bis Februar) kommt es hingegen zu leichten Zunahmen bei der Wasserverfügbarkeit in Süddeutschland. In den anderen Bundesländern sind die Winter ebenfalls feuchter als die Sommer. Auf die gesamte Bundesrepublik nimmt die Wasserverfügbarkeit innerhalb der Vegetationsperiode ab, so dass sich eine Notwendigkeit zur Anpassung in der Landwirtschaft ergibt. Die absoluten Änderun-

gen sind jedoch schwächer in Norddeutschland im Vergleich zu Süddeutschland. In Mecklenburg-Vorpommern beträgt bei einer Erderwärmung von 3 °C die maximale Abnahme der Wasserverfügbarkeit im Boden beispielsweise 10 mm. Sollte die Erderwärmung weniger als 2 °C betragen, sind die Änderungen wesentlich geringer. In Norddeutschland betragen die Änderungen in diesem Fall weniger als 5 mm und in Süddeutschland weniger als 10 mm.

Die Reduktion der Wasserverfügbarkeit ist vor allem durch Änderungen in der Temperatur getrieben, da sich die projizierten Jahresniederschläge kaum ändern (s. Abschnitt 1.3). Eine höhere Lufttemperatur führt dazu, dass die Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen kann. Damit steigt mit der Erderwärmung die Verdunstung von der Landoberfläche. Die Produktivität der Landwirtschaft wird standardmäßig hauptsächlich durch Änderungen in der Tempe-



**Abb. 3** Relative Änderungen in der durchschnittlichen Dürredauer in Deutschland bei einer Erderwärmung von 1.5, 2 und 3 °C. Grün eingefärbte Flächen entsprechen einer durchschnittlichen Dauer von weniger als drei Monaten pro Jahr, während braun und rot eingefärbte Flächen einer Änderung von mehr als drei Monaten entsprechen.

	Bundesländer											
	SH, HH	MV	NI, HB	BB, BE	NRW	ST	SN	HE	TH	RP, SL	BW	BY
1.5 °C	13	20	13	21	21	17	17	21	16	41	15	2
2 °C	17	20	6	14	15	12	14	18	18	42	25	12
3 °C	27	31	39	45	52	52	59	63	66	97	75	53

**Tab. 1** Relative Zunahmen der Zeit unter Dürre unter unterschiedlichen Erwärmungsgraden, verglichen mit der Periode 1971-2000 in den Bundesländern: SH Schleswig-Holstein, HH Hamburg, MV Mecklenburg-Vorpommern, NI Niedersachsen, HB Bremen, BB Brandenburg, BE Berlin, NRW Nordrhein-Westfalen, ST Sachsen-Anhalt, SN Sachsen, HE Hessen, TH Thüringen, RP Rheinland-Pfalz, SL Saarland, BW Baden-Württemberg, BY Bayern.

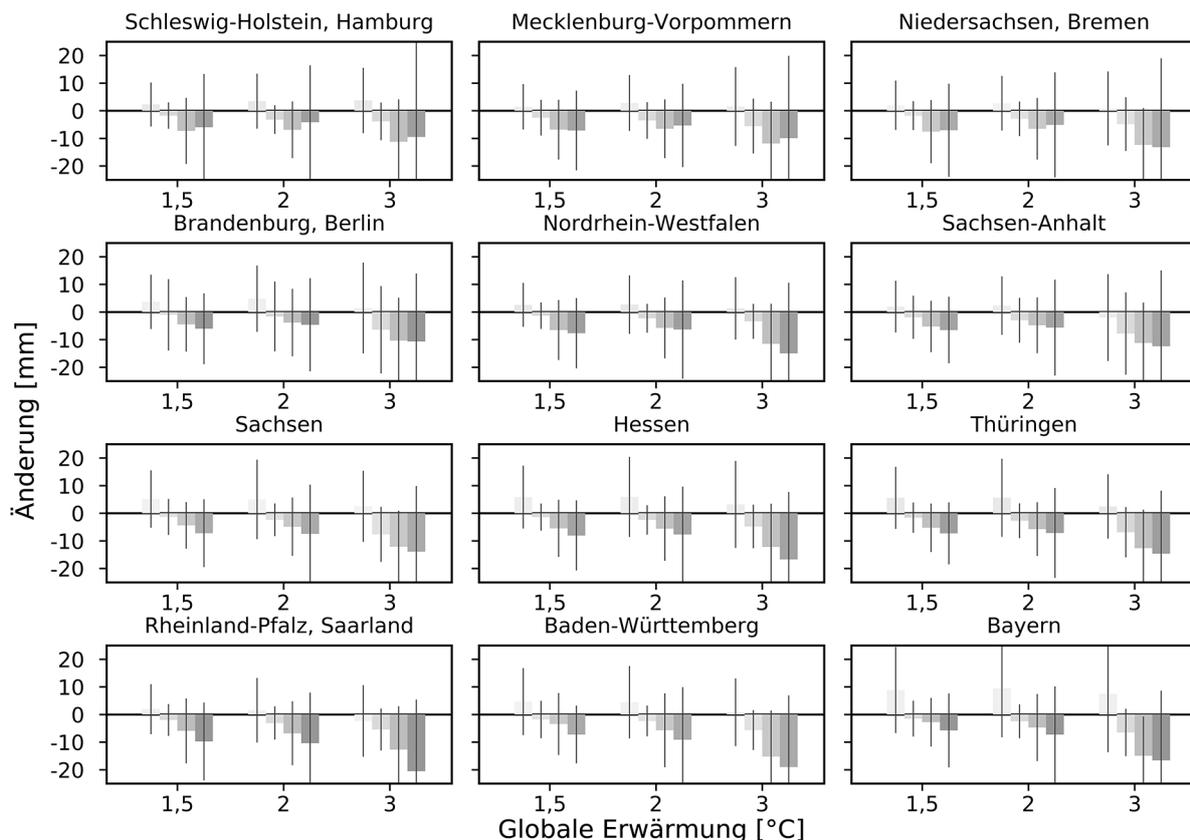
ratur und Hitzestress erklärt (Brasseur et al. 2015, Kap. 18). Aktuelle Studien zeigen jedoch, dass auch die modell-gestützte Bodenfeuchte die Abschätzung von Ernteerträgen in Deutschland verbessert (Peichl et al. 2018). Getreide reagiert vor allem während der Blüte, Kornfüllung und Bestäubung sensitiv auf Wassermangel.

Innerhalb des HOKLIM-Projektes konnte gezeigt werden, dass die durch den Klimawandel reduzierte Wasserverfügbarkeit im Boden saisonal unterschiedlich ausgeprägt ist. Die stärksten Reduktionen treten im Sommer und Herbst auf (**Abb. 4**).

Die zunehmende Sommertrockenheit verkürzt vor allem bei einjährigen Kulturpflanzen die effektive Entwicklungsdauer. Ein entscheidender Faktor für die zukünftige Ertragsentwicklung ist die Auswirkung des CO<sub>2</sub>-Düngeeffekts. Dieser erhöht die Was-

sernutzungseffizienz von Pflanzen und macht sie somit weniger anfällig für Trockenheit. Es ist jedoch unklar, ob dieser Effekt den negativen Effekt durch erhöhte Bodenfeuchtedürren in Deutschland ausgleichen kann. Eine Analyse zur Ertragsentwicklung von Winterweizen ergab, dass diese regional unterschiedlich ausfallen kann: von bis zu 20 % weniger Ertrag bis zu 24 % Ertragssteigerung (Brasseur et al. 2015).

Die Landwirtschaft ist aber nicht nur durch Klimawandel beeinflusst, sie ist auch stark von wirtschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen abhängig. Die Vulnerabilität ist innerhalb Deutschlands räumlich unterschiedlich verteilt. So sind Standorte mit sandigen Böden stärker von Trockenheit und deren Änderung betroffen als Standorte mit Böden, die Wasser gut speichern können (adelphi/PRC/EURAC 2015).



**Abb. 4** Absolute Änderungen in der Wasserverfügbarkeit im Boden bei einer Erderwärmung von 1,5, 2, und 3 °C in den verschiedenen Bundesländern. Die Balken in jedem Bundesland stellen von links nach rechts die Änderungen im Winter (Dezember – Februar), Frühling (März – Mai), Sommer (Juni – August), und Herbst (September – November) dar.



### 3. Niedrigwasser

Niedrigwasser sind, genau wie landwirtschaftliche Dürren, langsam entstehende und langanhaltende Extremereignisse, die mehrere Monate bis Jahre andauern können. Zudem fehlt ihnen die Bildgewalt und Medienpräsenz von Hochwasserereignissen, bei denen Schäden in sehr kurzer Zeit entstehen. Nichtsdestotrotz entstehen durch Niedrigwasser hohe Schäden.

Die hydrologische Dürre im Jahr 2003 verursachte in Europa wirtschaftliche Schäden von ungefähr 8,7 Milliarden €. Darüber hinaus haben sich die Schäden zwischen den Zeiträumen 1976–1990 und 1991–2006 ungefähr verdoppelt – im Durchschnitt treten pro Jahr Verluste von 6,2 Milliarden € auf (EC 2007). Niedrigwasser verursachen Schäden unter anderem in der Binnenschifffahrt, Energiewirtschaft, Trinkwasserversorgung, Industrie und Landwirtschaft. Hinzu kommt, dass neben der mengenmäßigen Nutzung auch die Wasserqualität leidet. Bei abnehmenden Wasserdurchflüssen und gleichbleibenden Schadstoffeinträgen erhöhen sich die Schadstoffkonzentrationen. Dies wirkt sich z.B. wiederum negativ auf die Gewässerökologie aus.

Die Untersuchung der Sommerniedrigwasser (als 10-Perzentil der Wasserstände des Sommerhalbjahres) unter dem 3 °C-Erwärmungsszenario hat insgesamt für Deutschland eine Abnahme der Wasserstände mit zunehmender Temperaturerhöhung gezeigt (**Abb. 5**). Während bei einer Erderwärmung von 1.5 °C flächendeckend noch eine leichte Zunahme (also im Niedrigwasserfall mehr Wasser in Fluss verglichen mit den Niedrigwassern der Vergangenheit) gegenüber dem Zeitraum 1971–2000 zu beobachten ist, verschärfen sich die Niedrigwassersituationen unter dem 2 °C-Erwärmungsszenario bereits in Teilen des Rhein-, Elbe- oder Donaeinzugsgebietes. Eine Übersicht zu den Änderungen in den Bundesländern zeigt **Tab. 2**. Die Robustheit bezeichnet den prozentualen Anteil der Modellsimulationen, die eine verlässliche Änderung gegenüber dem Referenzzeitraum aufweisen. Diese ist bei einer Erderwärmung von 1.5 °C vor allem im Süden Deutschlands gering (**Abb. 5**, untere Zeile). Bei einem globalen Temperaturanstieg von 2 °C treten an den meisten Flussabschnitten wahrscheinliche Änderungen auf (Robustheit > 66 %).

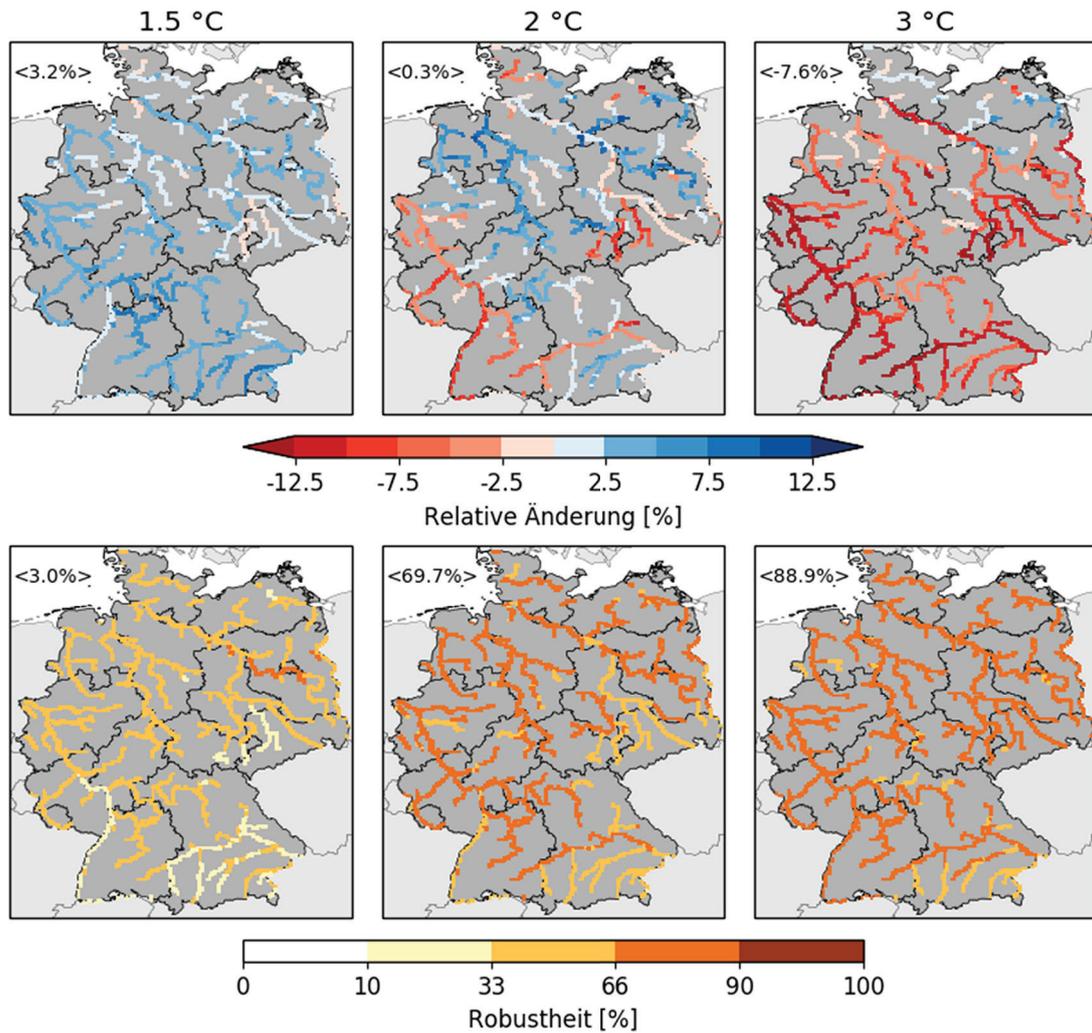


Abb. 5 Relative Änderung des Niedrigwassers (10-Perzentil des Abflusses) für die Monate Mai bis Oktober (Sommerhalbjahr) bei einem globalen Temperaturanstieg von 1.5, 2 und 3 °C (obere Zeile). Unten: Prozentualer Anteil der insgesamt 45 Modellsimulationen, die eine verlässliche Änderung aufzeigen (Robustheit). Die Sicherheit der Aussagen steigt mit zunehmender Erwärmung.

		Bundesländer												
		SH, HH	MV	NI, HB	BB, BE	NRW	ST	SN	HE	TH	RP, SL	BW	BY	
Sommer	1.5 °C	0.1	0.6	-0.3	0.7	3.3	0.5	-0.1	4.1	1.7	4.3	4.9	4.7	
	2.0 °C	-4.5	-0.9	-1	3.2	-1.5	3.8	-3.6	-0.2	1.3	-5.2	-4.7	-0.9	
	3.0 °C	-4.9	-2.7	-6.6	-5.5	-11.6	-6	-11.7	-8.4	-8.3	-13.1	-13.1	-8.6	
Winter	1.5 °C	4.6	5.6	4.6	2.7	4.2	1.8	3.3	4.9	4.1	3.2	6.5	9.7	
	2.0 °C	8.4	14.6	9.3	11.6	4.6	10.3	10.9	6.6	10.4	0.6	9.1	16.7	
	3.0 °C	10.2	16.1	7.8	8.5	5.5	4.7	13.1	5.2	8.1	-1.8	4.7	11.7	

Tab. 2 Relative Änderungen des Niedrigwassers (10-Perzentil) unter unterschiedlichen Erwärmungsgraden für das Sommer- und Winterhalbjahr, verglichen mit der Periode 1971-2000, in den Bundesländern: SH Schleswig-Holstein, HH Hamburg, MV Mecklenburg-Vorpommern, NI Niedersachsen, HB Bremen, BB Brandenburg, BE Berlin, NRW Nordrhein-Westfalen, ST Sachsen-Anhalt, SN Sachsen, HE Hessen, TH Thüringen, RP Rheinland-Pfalz, SL Saarland, BW Baden-Württemberg, BY Bayern.

Auch beim Niedrigwasser zeigt sich – wie bei den agrarischen Dürren – die stärkste negative Veränderung und die größte Sicherheit der Änderung unter einer Erwärmung von 3 °C. Flächendeckend zeigt sich eine Abnahme der Wasserstände im Niedrigwasserfall, die am Rhein mit mehr als 10 % am stärksten ausfällt. Ein wesentlicher Faktor für die Verschärfung von Niedrigwassersituationen ist die steigende Verdunstung bei höheren Temperaturen (s. Abschnitt 1.4).

Die Kombination aus zunehmenden Bodenfeuchtedürren und Abnahmen von Niedrigwassern bei einem globalen Temperaturanstieg von 3 °C erfordert in einigen Sektoren, sich an den Klimawandel anzupassen. In der Landwirtschaft wäre z.B. eine Form der Anpassung an Bodenfeuchtedürren, verstärkt Bewässerungssysteme zu nutzen, da die Jahresniederschlagssummen in Deutschland konstant bleiben bzw. sogar leicht zunehmen (s. Abschnitt 1.4).

Wird jedoch mehr Wasser für die Landwirtschaft genutzt, könnte die eingeschränkte Wasserverfügbarkeit in den Flüssen in Niedrigwassersituationen weiter verstärkt werden. Das wiederum könnte zu neuen Nutzungskonflikten führen.

In Abb. 6 wird die Veränderung des Niedrigwassers im Winter gezeigt. Die Zunahme der Jahresniederschläge in Kombination mit der Abnahme der Schneespeicher unter wärmeren Temperaturen führt im Winter zu einer Entspannung der Niedrigwassersituationen.

Niedrigwasserveränderungen unter Klimawandel sind bisher nicht im gleichen Umfang und für 1.5, 2 und 3 °C Erwärmungsszenarien in Deutschland untersucht worden. Soweit vorhanden, decken sich die hier vorgestellten Ergebnisse in den Kernaussagen mit bereits durchgeführten Studien, z.B. mit den Abschätzungen für Bayern (LfU Bayern 2016).

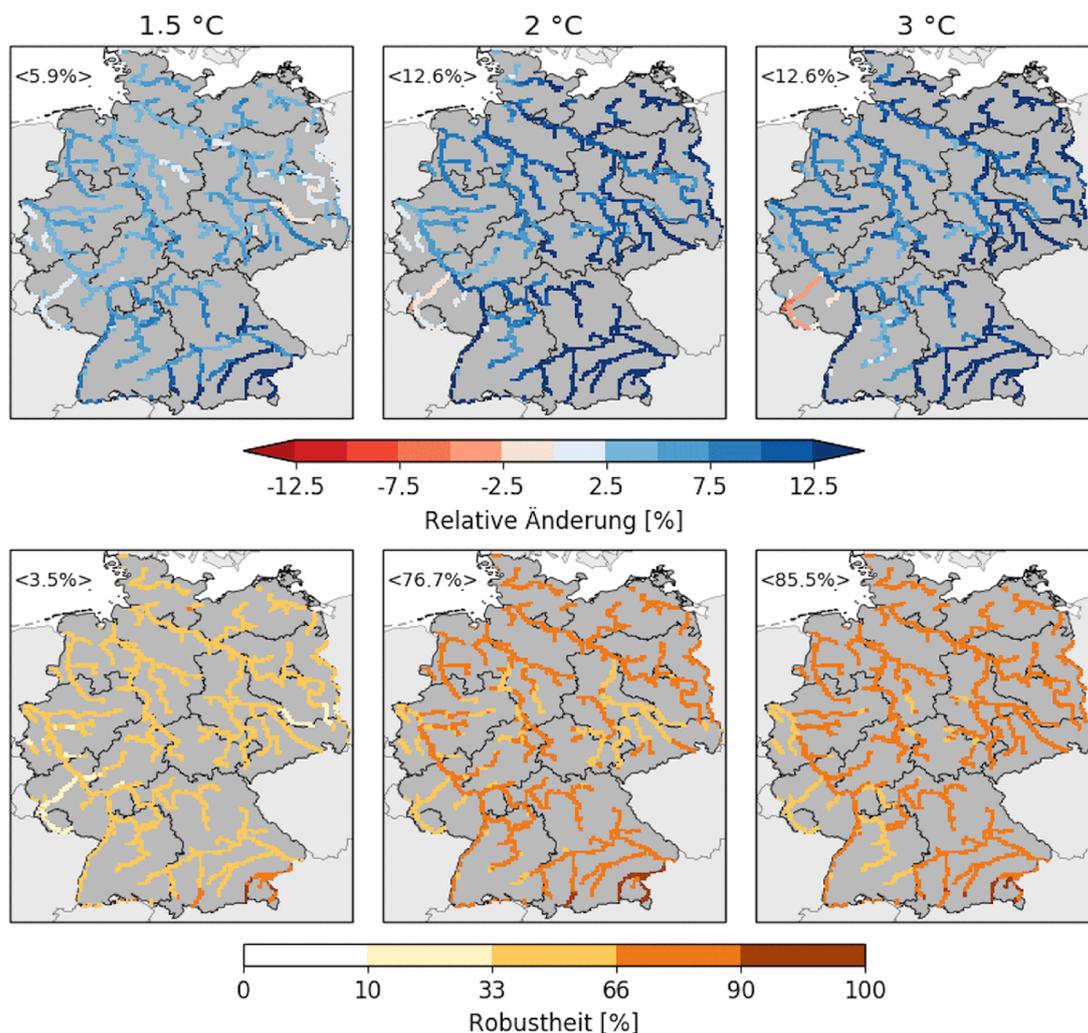


Abb. 6 Relative Änderung des Niedrigwassers (10-Perzentil des Abflusses) und Robustheit für die Monate November bis April (Winterhalbjahr) bei einem globalen Temperaturanstieg von 1.5, 2 und 3 °C.



## 4. Hochwasser

Hochwasser gehören in Deutschland zu den Naturkatastrophen mit den höchsten wirtschaftlichen Schäden. Sie sind gegenüber Niedrigwassern und landwirtschaftlichen Dürren von geringerer räumlicher Ausdehnung und zeitlicher Dauer. Innerhalb des HOKLIM-Projektes wurden Flüsse mit einem Einzugsgebiet von mehr als 1000 km<sup>2</sup> untersucht. Für Einzugsgebiete dieser Größe sind verschiedene Prozesse entscheidend für die Entstehung von Hochwassern. Das sind vor allem großflächiger, ergiebiger Niederschlag, die Vorfeuchte im Boden und der Schneespeicher.

Innerhalb des HOKLIM-Projektes wurden verschiedene Perzentile der täglichen Abflusswerte betrachtet. Im Folgenden wird auf die Änderungen im jährlichen Maximum genauer eingegangen. Diese wurden für Sommer (**Abb. 7**) und Winter (**Abb. 8**) getrennt betrachtet. Die Abbildungen zu weiteren Perzentilen wie z.B. dem Perzentil 90, 95 und 98 sind im Anhang online unter [www.ufz.de/hoklim](http://www.ufz.de/hoklim) verfügbar. Da für jedes Perzentil die Veränderung im Median über 30 Jahre bestimmt wird, entspricht die

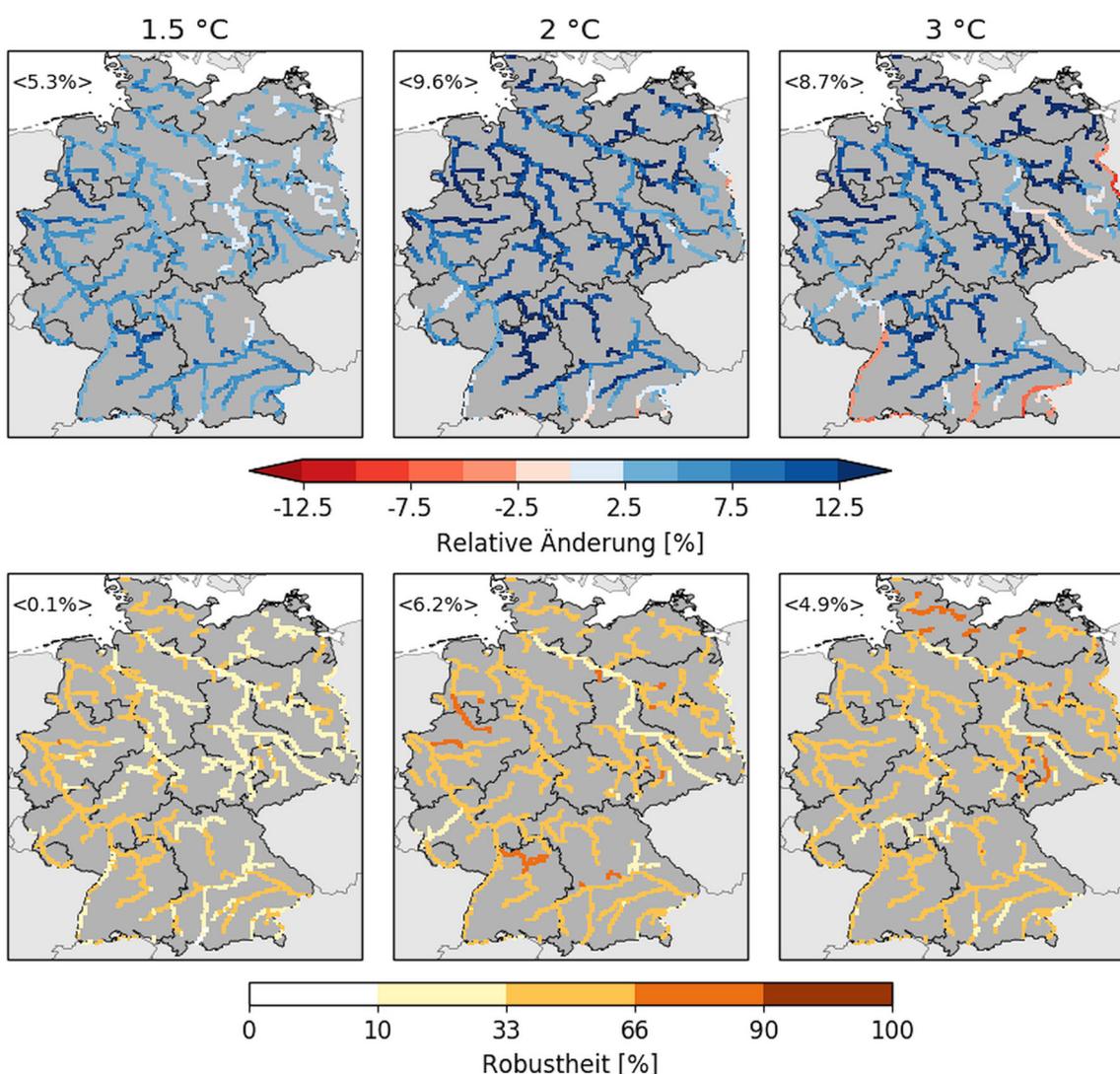
Betrachtung des maximalen Abflusswertes einem Hochwasser mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von zwei Jahren (Zweijährlichkeit).

In den Sommermonaten (Mai – Oktober) wird generell eine Zunahme der jährlichen Maxima erwartet (**Abb. 7**). In den Wintermonaten zeigt sich ein räumlich differenziertes Muster mit Abnahmen vor allem im Norden Bayerns und in Mitteldeutschland sowie Zunahmen in weiten Teilen des Rheins (**Abb. 8**). In Flüssen mit nival (d.h. durch den Schneespeicher beeinflusst) geprägtem Abflussverhalten (z.B. Oberlauf des Rheins und Zuflüsse der Donau aus den Alpen) wird eine entgegengesetzte Änderung in den beiden Jahreszeiten deutlich (Vgl. **Abb. 7** und **8**): Höhere (Winter-)Temperaturen führen zu einer Verringerung der Schneeakkumulation und höheren Abflusswerten im Winter. Daraus resultiert eine Reduktion der Schneeschmelze mit niedrigeren Abflusswerten bis in den Sommer hinein. Insgesamt hängt die relative Änderung stark von der Stärke der Erderwärmung ab. Sollte die Erderwärmung 1.5 °C nicht übersteigen, dann liegen

die relativen Änderungen in den meisten Gebieten unterhalb von 10 %. Die Verwendung von 45 Realisationen innerhalb des Multimodellensembles erlaubte eine umfassende Betrachtung der Modellsicherheiten. Dabei zeigte sich, dass die Robustheit über das gesamte Ensemble zwischen 33 und 66 % liegt. Nur etwa die Hälfte aller Modellsimulationen zeigen demnach statistisch verlässliche Änderungen.

Die Auswertung für einzelne Bundesländer ist in Tab. 3 aufgeschlüsselt. Die größten Zunahmen von Hochwassern treten hierbei unter 3 °C Erwärmung im Sommer in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern mit jeweils über 15 % auf, die größten Reduktionen des Hochwassers treten im Winter bei einer Erderwärmung von 3 °C auf.

Die Ergebnisse des HOKLIM-Projektes bestätigen Ergebnisse früherer Studien zur Auswirkung des Klimawandels in Deutschland (Brasseur et al. 2015). Darin wurden z.B. für den Oberlauf des Rheins ebenfalls Änderungen von weniger als 10 % berechnet (mit der Ausnahme des Neckars bei Rockenau). Dabei wurde jedoch nur zwischen Projektionen in der



**Abb. 7** Relative Änderung des Hochwassers (jährliches Maximum des Abflusses) für die Monate Mai bis Oktober (Sommerhalbjahr) bei einem globalen Temperaturanstieg von 1.5, 2 und 3 °C (obere Zeile). Prozentualer Anteil der Modellsimulationen, die eine verlässliche Änderung aufzeigen (Robustheit, untere Zeile). Die relative Änderung ist selbst bei der betrachteten Zweijährlichkeit gering bei gleichzeitig geringer Vertrauenswürdigkeit der Aussagen.

		Bundesländer											
		SH, HH	MV	NI, HB	BB, BE	NRW	ST	SN	HE	TH	RP, SL	BW	BY
Sommer	1.5 °C	6.1	2.8	4.4	3.6	7.3	2.2	3.9	6.3	3	7	7	6.6
	2.0 °C	14	11	11	11	11	12	9.4	11	11	7.3	11	10
	3.0 °C	19	16	9.2	10	11	9.4	9.1	7.8	10	5.4	7.9	8
Winter	1.5 °C	1.2	1.2	1.8	2.1	2.5	1	-1.2	-0.1	-2.3	2.3	0.3	-1.5
	2.0 °C	1.3	0.3	3.6	2.7	4.4	0.4	-3.1	-1.8	-5	2.7	-4.4	-6.7
	3.0 °C	2.8	0.5	2	-1.5	4	-4.4	-8.4	-5.4	-9.5	-1.3	-8.1	-12

Tab. 3 Relative Änderungen des Hochwassers (Zweijährlichkeit) unter unterschiedlichen Erwärmungsgraden für das Sommer- und Winterhalbjahr, verglichen mit der Periode 1971-2000 in den Bundesländern: SH Schleswig-Holstein, HH Hamburg, MV Mecklenburg-Vorpommern, NI Niedersachsen, HB Bremen, BB Brandenburg, BE Berlin, NRW Nordrhein-Westfalen, ST Sachsen-Anhalt, SN Sachsen, HE Hessen, TH Thüringen, RP Rheinland-Pfalz, SL Saarland, BW Baden-Württemberg, BY Bayern.

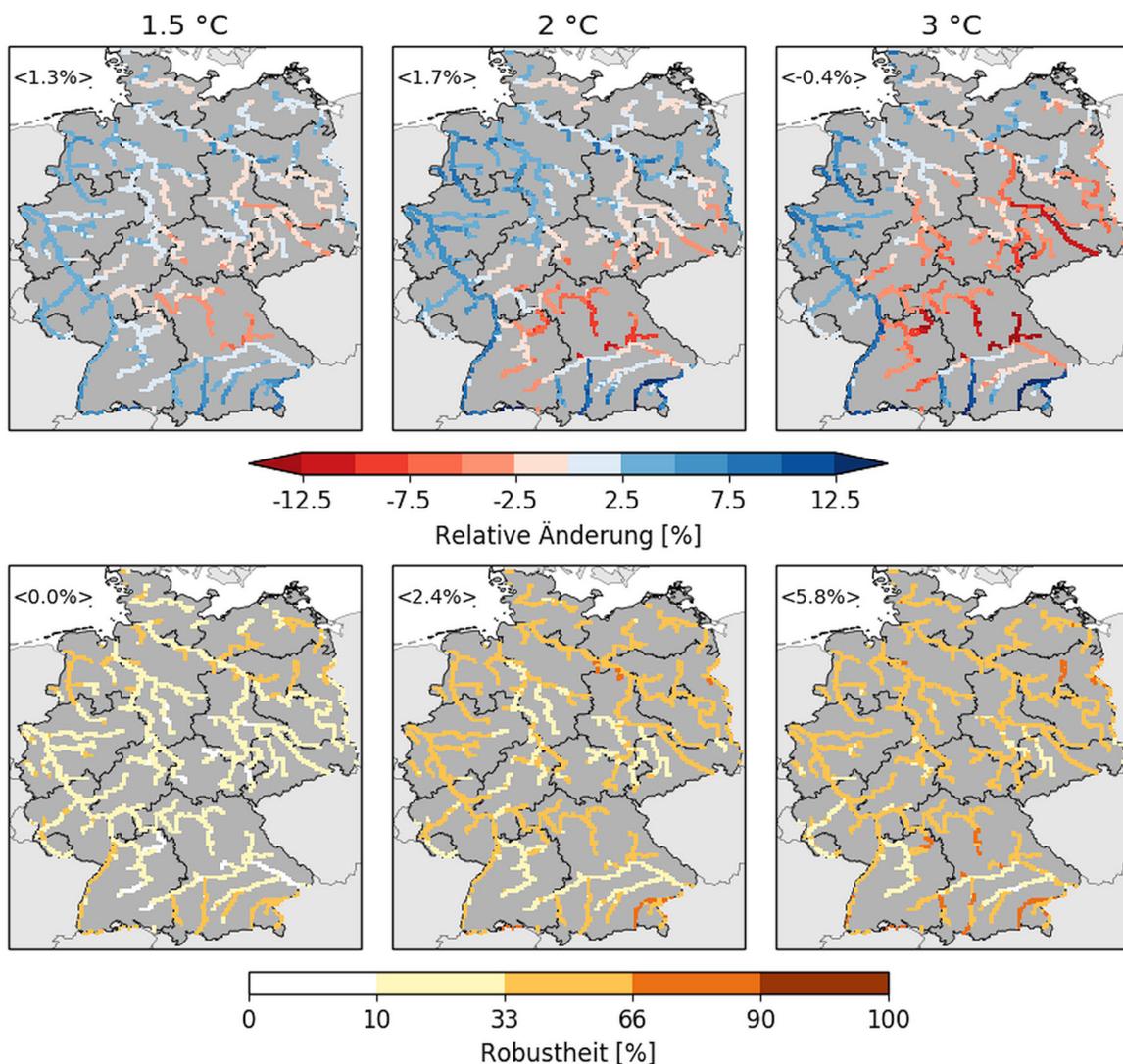


Abb. 8 Relative Änderung des Hochwassers (jährliches Maximum des Abflusses) für die Monate November bis April (Winterhalbjahr) bei einem globalen Temperaturanstieg von 1.5, 2 und 3 °C (obere Zeile). Prozentualer Anteil der Modellsimulationen, die eine verlässliche Änderung aufzeigen (Robustheit, untere Zeile). Die relative Änderung ist selbst bei der betrachteten Zweijährlichkeit gering bei gleichzeitig geringer Vertrauenswürdigkeit der Aussagen.

nahen und fernen Zukunft unterschieden, während bei der Analyse innerhalb des HOKLIM-Projektes verschieden starke Globaltemperaturanstiege betrachtet wurden. Wie bereits in vorangegangenen Studien zeigen auch die hier vorgestellten Hochwasserergebnisse eine niedrige Vertrauenswürdigkeit und eine damit einhergehende niedrige Signifikanz von projizierten Änderungen.

Über das gesamte Modellensemble kann daher geschlussfolgert werden, dass die klimabedingten Änderungen der untersuchten Hochwasser mit Zweijährlichkeit relativ klein sind.

## Literatur

- adelphi / PRC / EURAC** (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>.
- Brasseur, G. , Jacob, D., Schuck-Zöller, S.** (Hrsg., 2016): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Online ISBN 978-3-662-50397-3, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3>.
- EC** (2007): Water Scarcity and Droughts, Second Interim report, DG Environment, European Commission, [http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/comm\\_droughts/2nd\\_int\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/comm_droughts/2nd_int_report.pdf).
- LfU Bayern** (2016): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen. <https://www.nid.bayern.de/files/docs/niedrigwasserbericht.pdf>.
- Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Zink, M., Rakovec, O., Wanders, N., Zink, M., Wood, E.F., Pan, M., Sheffield, J., and Samaniego, L.** (2018): Climate change alters low flows in Europe under a global warming of 1.5, 2, and 3 degrees, Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 1017-1032, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-485>.
- Samaniego\*, L., Thober\*, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., Zink, M., Sheffield, J., Wood, E.F., and Marx, A.** (2018): Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. Nature Climate Change. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>. (\* - gleichberechtigt beigetragen)
- Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Marx, A., Pan, M., Rakovec, O., Samaniego, L., Sheffield, J., Wood, E.F., and Zink M.** (2018): Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degree global warming, Environmental Research Letters, 13(1), pp. 1-22, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e35>.
- Peichl, M., Thober, S., Meyer, V., Samaniego, L.** (2018): The effect of soil moisture anomalies on maize yield in Germany, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 889-906, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-889-2018>.
- Peters, G. P., Andrew R. M., Boden T., Canadell J. G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M. R., and Wilson C.** (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C, Nature Climate Change, 3, 4-6, <https://doi.org/10.1038/nclimate1783>.

## Danksagung

Die Studie wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) über das HOKLIM-Projekt ([www.ufz.de/hoklim](http://www.ufz.de/hoklim), Förderkennzeichen 01LS1611A) im Rahmen der Bekanntmachung "Förderung erweiterter und verbesserter wissenschaftlicher Grundlagen für den IPCC-Sonderbericht zu 1.5 °C globale Erwärmung (SR1.5)" gefördert. Das Projekt HOKLIM baut unter anderem auf Vorarbeiten im Projekt EDgE im Rahmen des Copernicus Climate Change Service (<http://edge.climate.copernicus.eu/>) auf, das vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) im Auftrag der Europäischen Kommission koordiniert wird. Wir danken allen Beitragenden aus dem Projekt EDgE, insbesondere Niko Wanders (Universität Utrecht) und Ming Pan (Princeton University) für die freiwillige Erweiterung des Klima-Hydrologie Ensembles um die hydrologischen Modelle PCRGLOB-WB und VIC unter RCP6.0. Teile der Arbeiten wurden im Rahmen der Helmholtz-Klimainitiative REKLIM durchgeführt.

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ  
Permoserstr. 15 | 04318 Leipzig  
Telefon (0341) 235-0 | E-Mail [info@ufz.de](mailto:info@ufz.de)  
[www.ufz.de](http://www.ufz.de)

