

Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“

Auswahlprozess zur Detailuntersuchung eines klimawandelbezogenen Extremereignisses

Methodisches Konzept und Anwendung



Quelle: Adobe Stock – Jürgen Fälchle

Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“

Auswahlprozess zur Detailuntersuchung eines klimawandelbezogenen Extremereignisses

Methodisches Konzept und Anwendung

Von

Dr. Jan Trenczek, Prognos AG
Oliver Lühr, Prognos AG
Lukas Eiserbeck, Prognos AG
Myrna Sandhövel, Prognos AG
Dorothee Ibens, Prognos AG

Studie im Auftrag des

Bundesministerium für Wirtschaft
und Klimaschutz

Stand:

29. Juni 2022

Erstellt durch:

Prognos AG

Werdener Straße 4
D-40227 Düsseldorf

Ansprechpartner:

Dr. Jan Trenczek

Tel. +49 – 162 988 2483

E-Mail: jan.trenczek@prognos.com

prognos

Wir geben Orientierung.

In Kooperation mit:

**Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)
(Gesamtprojektleitung)**

Potsdamer Straße 105
D-10785 Berlin



| i | ö | w

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Ansprechpartnerin:

Dr. Alexandra Dehnhardt

Tel. +49 – 30 – 884 594 29

E-Mail: alexandra.dehnhardt@ioew.de

und

**Gesellschaft für Wirtschaftliche
Strukturforschung mbH (GWS)**

Heinrichstraße 30
D-49080 Osnabrück

GWS

SPECIALISTS IN
EMPIRICAL ECONOMIC
RESEARCH

Ansprechpartner:

Dr. Markus Flaute

Tel. +49 – 541 – 40933295

E-Mail: flaute@gws-os.com

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
2 Leitfragen zur Auswahl des Schadensereignisses	5
3 Einordnung der Extremwetterereignisse	9
3.1 Hagel	9
3.2 Überschwemmung (Hochwasser)	9
3.3 Sturm	10
3.4 Hitzewellen (Hitzeperioden)	11
3.5 Dürre (Trockenperiode)	12
3.6 Zwischenfazit	14
4 Die Hitze- und Dürreextreme 2018 / 2019 im Überblick	16
4.1 Hitze(-wellen) 2018/2019	16
4.2 Dürreextreme 2018/2019	17
4.3 Exkurs: Niedrigwasser des Rheins 2018	18
5 Ausblick und nächste Schritte	20
Quellenverzeichnis	21
Impressum	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorgehen zur Auswahl des zu untersuchenden klimawandelbedingten Schadensereignisses	5
Abbildung 2:	Die Dürren 2018/2019 im historischen Vergleich	13
Abbildung 3:	Entwicklung der Dürre im Jahr 2018	17

Abkürzungsverzeichnis

BfG	Bundesamt für Gewässerkunde
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CEDIM	Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DBV	Deutscher Bauernverband
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECI	Environmental Change Institute
FiW	Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
KWRA	Klimawirkungs- und Risikoanalyse
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
WWA	World Weather Attribution

1 Einleitung

Jedes Jahr erlebt Deutschland diverse Extremwetterereignisse, wie Hagel, Hitzewellen, Stürme oder Starkregen. Diese führen häufig zu hohen volkswirtschaftlichen Kosten bspw. in Form von Hagelschäden am Auto, vollgelaufenen Kellern oder auch sinkender Arbeitsproduktivität an heißen Tagen. Dabei wird oftmals der Klimawandel als Auslöser für die Extremwetterereignisse und als Verursacher großer gesamtwirtschaftlicher Schäden genannt. Jedoch liegt, nach derzeitigem Kenntnisstand, nicht für alle Extremwettertypen eine klare Evidenz dafür vor, dass der Klimawandel das Eintreten einzelner Ereignisse in Deutschland wahrscheinlicher und intensiver gemacht hat bzw. zukünftig machen wird. Denn: Extremwetterereignisse gab es schon immer und sie unterliegen natürlichen Schwankungen. Gleichwohl zeigen die Prognosen in eine eindeutige Richtung: zu einem Anstieg der klimabedingten Veränderungen in Deutschland mit zunehmenden und intensiveren Extremwetterereignissen bei einem starken Klimawandel. Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) für Deutschland zeigt systematisch auf, dass insbesondere bei einem starken Klimawandel hohe Klimarisiken drohen. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, was sind klimawandelbedingte Extremwetterereignisse und zu welchen Schäden haben diese in der Vergangenheit geführt?

Die vorliegende Studie ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in Auftrag gegebenen Vorhabens „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Neben einer systematischen Erfassung wesentlicher seit 2000 angefallenen Extremwitterschäden steht die Analyse verschiedener Einzelereignisse und ihrer angefallenen Schäden im Vordergrund. **Gegenstand dieses Projektberichts ist die Aufstellung und Anwendung ebendieses Analysepfades, der den Auswahlprozess zur Detailuntersuchung eines Extremereignisses darstellt.** Das auf Basis dieses Prozesses ausgewählte klimawandelbedingte Extremwetterereignis liefert den Ausgangspunkt für die weiteren Analyse zu Erfassung der Kosten durch die Klimawandelfolgen in Deutschland. Es zeigt sich, dass sowohl eine gemeinsame Untersuchung der Hitze- und Dürreextreme der Jahre 2018 und 2019, wie auch der Überschwemmungen aus dem Juli 2021 möglich ist. Die Ergebnisse der so entstandenen Detailstudien finden sich in Trenczek et al. (2022a, 2022b) wieder.

Bereits heute kann für manche vergangenen Wetterereignisse hinsichtlich ihrer Intensität und Häufigkeit ein klarer Zusammenhang mit dem Klimawandel hergestellt werden. Diese Evidenz für einen Zusammenhang zwischen Extremwetterereignissen und Klimawandel war bei der Auswahl richtungsweisend und bildet das wichtigste Selektionskriterium. Weitere Analyseschritte untersuchten die Informationslage zu aufgetretenen Schäden, die volkswirtschaftliche Relevanz der Schadensereignisse sowie eine mögliche Quantifizierbarkeit von Schadensindikatoren. Letzteres ist vor allem für die an diesen Schritt angeknüpfte Durchführung einer empirischen ex-post Untersuchung des ausgewählten klimawandelbedingten Schadensereignisses in Deutschland von zentraler Bedeutung. Zusammenfassend wird im folgenden Projektbericht auf die drei übergeordneten Fragen eingegangen:

- Welcher kausale Zusammenhang kann zwischen Klimawandel und Extremereignis hergestellt werden?
- Aus welchen Gründen wird das Extremereignis für die ex-post-Untersuchung ausgewählt?
- Wie hat sich das Extremereignis entwickelt und abgespielt?

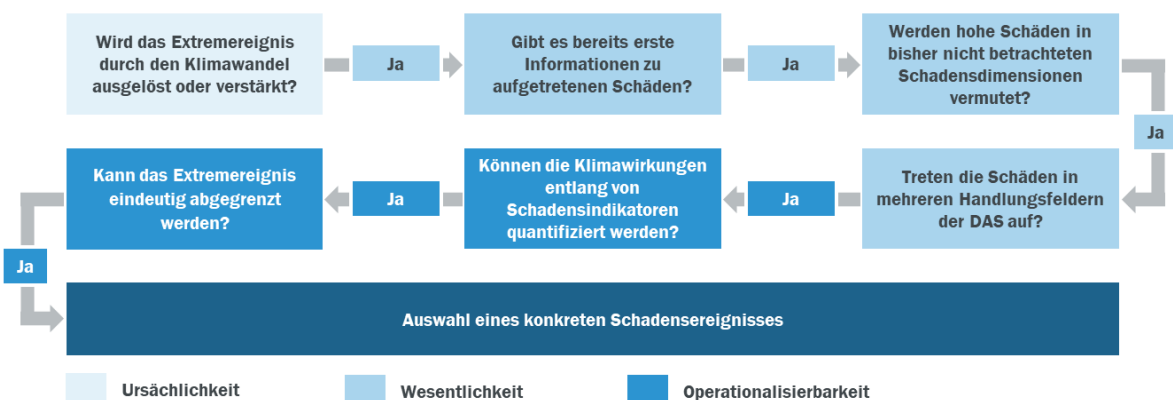
2 Leitfragen zur Auswahl des Schadensereignisses

Die Festlegung des im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung detailliert zu untersuchenden konkreten Extremwetter- bzw. Schadensereignisses erfolgt auf Basis eines mehrstufigen Analysepfades. Dieser findet für jedes Extremwetterereignis, das volkswirtschaftliche Kosten bzw. Schäden verursacht, Anwendung. Der Analysepfad (siehe Abbildung 1) besteht aus sechs Fragen, auf deren Basis die Extremwetterereignisse untersucht werden. Dies ermöglicht eine detaillierte Betrachtung und Einschätzung der klimawandelbedingten Schadens- und Kostendimensionen.

Die einzelnen Fragen lassen sich drei Prüfungskriterien zuordnen:

- **Ursächlichkeit** – Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten des Extremereignisses und dem fortschreitenden Klimawandel?
- **Wesentlichkeit** – Sind die durch das Extremereignis auftretenden Schäden einerseits volkswirtschaftlich relevant und andererseits noch nicht ausreichend erfasst worden?
- **Operationalisierbarkeit** – Lassen sich methodische Ansätze identifizieren, die eine belastbare Untersuchung des Extremereignisses und folglich eine umfassende Abschätzung der von ihm verursachten Schadenskosten ermöglichen?

Abbildung 1: Vorgehen zur Auswahl des zu untersuchenden klimawandelbedingten Schadensereignisses



Darstellung des Analysepfades mit den sechs Leitfragen (Beginn oben links)
Eigene Darstellung, Prognos AG 2021

Das **erste Prüfungskriterium** umfasst die **Ursächlichkeit** des Schadensereignisses. In diesem Bereich wird überprüft, ob es bereits wissenschaftliche Untersuchungen zur Evidenz eines kausalen Zusammenhangs zwischen dem anthropogenen Klimawandel und dem häufigeren, intensiveren oder räumlich veränderten Auftreten der einzelnen Extremereignisse gab. Dieser erste Schritt selektiert die Auswahl der zu untersuchenden Ereignisse und stellt sicher, dass die im späteren Analyseverlauf identifizierten Schadenskosten im Sinne der Forschungsfrage auf Veränderungen im Klimasystem zurückgeführt werden können.

1. Wird das Extremereignis durch den Klimawandel ausgelöst oder verstärkt?

In den vergangenen Jahren hat sich mit der sogenannten Attributionsforschung eine neue Disziplin im Bereich der Klimawandelforschung gebildet. Kern der Attribution ist es zu untersuchen, inwiefern bestimmte Klimasignale und Extremwetterereignisse in ihrer Ausprägung und Häufigkeit mit dem Einfluss des anthropogenen Klimawandels erklärt werden können. Auf Basis komplexer Wetter- und Klimamodelle simuliert und analysiert die Attributionsforschung Hitzewellen, Dürren bzw. Trockenperioden, Starkregenereignisse, Hagelvorkommen sowie Stürme und weitere Klimasignale. In der Regel wird hierbei auf eine ex-post-Untersuchung einzelner Ereignisse zurückgegriffen: Dem zu betrachtenden konkreten Ereignis kann nach eingehender Untersuchung eine Eintrittswahrscheinlichkeit unter „natürlichen“ Bedingungen ohne den Klimawandel zugewiesen werden. Diese natürliche Eintrittswahrscheinlichkeit wird anschließend mit der tatsächlichen Häufigkeit bzw. Intensität des Ereignisses verglichen, um eine Abschätzung zum Einfluss des Klimawandels auf das jeweilige Ereignis abzugeben.

Um im weiteren Verlauf der Untersuchung zu einem belastbaren Ergebnis zu kommen, werden in diesem Schritt Extremereignisse identifiziert, für die eine **Evidenz des Einflusses des Klimawandels auf Intensität oder Eintrittshäufigkeit in Deutschland hinreichend herstellbar** ist. Für manche Extremereignisse gibt es für den deutschen bzw. europäischen Raum noch keine Attributionsuntersuchungen oder es konnte auf Grundlage der Untersuchung keine Evidenz (weder für noch gegen den Einfluss des Klimawandels) ermittelt werden. Ereignisse, die unter diese Kategorien fallen, können aufgrund der fehlenden Belastbarkeit der Ergebnisse nicht weiter analysiert werden.

Methodisch werden in diesem Schritt systematisch Publikationen zum Einfluss des Klimawandels auf die einzelnen zu untersuchenden Extremereignisse gesammelt und ausgewertet. Insbesondere Publikationen des World Weather Attribution (WWA)- Projekts des Environmental Change Institute (ECI) der Universität Oxford, aber auch weiterer, auf eine ex-post-Untersuchung von Klimaereignissen spezialisierter Einrichtungen, bspw. das Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM) des Karlsruhe Institute of Technology (KIT) finden Eingang in die Untersuchung.

Das **zweite Prüfungskriterium** umfasst die **Wesentlichkeit** des Schadensereignisses. Die Wesentlichkeit wird bestimmt durch erste bereits bestehende Einschätzungen zur Höhe des Gesamtschadensausmaßes. Dieses setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Zum einen die bereits erfassten (meist direkt auftretenden) Schäden und zum anderen die „Dunkelziffer“ der noch nicht quantifizierten (meist indirekt auftretenden) Schadensdimensionen. Maßgeblich für die Wesentlichkeit ist die Höhe des geschätzten, jedoch noch nicht bekannten Gesamtschadensausmaßes. Je höher dieses ausfällt, desto interessanter und relevanter ist eine Untersuchung des zugehörigen Extremereignisses.

2. Gibt es bereits erste, verstreute Informationen zu aufgetretenen Schäden?

Bereits bestehende, einschlägige Schadensdatenbanken (bspw. von verschiedenen (Rück-)Versicherungs- oder Forschungsinstituten) werden für einen Zeitraum ab dem Jahr 2000 und für den Untersuchungsraum Deutschland auf Einträge und hinterlegte Schäden gescreent. Darauf aufbauend wird geprüft, ob weitere Informationen zu Schäden und Schadenskosten aus anderen Quellenarten vorliegen und ggf. unberücksichtigt sind. Es wird sichtbar, ob bereits ein gut aufbereitetes Gesamtbild vorliegt oder sich ein hoher Informationsmehrwert aus einer Konsolidierung weiterer belastbarer Informationen ableiten lässt.

3. Werden hohe Schäden in bisher nicht erfassten Schadensdimensionen vermutet?

Für zahlreiche Extremereignisse bestehen (u.a. aufgrund umfassender Versicherungsdaten) Abschätzungen zu den direkt angefallenen Schäden (bspw. an Gebäuden oder

Infrastrukturen). Neben den direkten Schäden ergeben sich jedoch durch die Komplexität des Klimasystems, wie auch von Wertschöpfungsketten oder der Biosphäre, weitere teilweise langfristige, indirekte und zum Großteil noch nicht monetarisierte Effekte („**Schadensdimensionen**“). Einen Anhaltspunkt zur Ermittlung und Quantifizierung der indirekten Effekte bieten die Klimawirkungsketten des Umweltbundesamtes (UBA, 2016). Diese werden auf die möglichen Folgewirkungen der Extremereignisse hin untersucht, wobei eine erste qualitative Einschätzung der potenziellen Disruptionswirkung bzw. der erwarteten Schadenshöhe angeführt wird. Je höher die potenziellen, noch nicht betrachteten Kosten in den Schadensdimensionen sind, desto relevanter ist eine Untersuchung des genannten Ereignisses.

4. Treten die Schäden in mehreren Handlungsfeldern der DAS auf?

Auf Basis der Klimawirkungsketten wird in einem nächsten Schritt untersucht, ob die potenziell weiter zu erfassenden Schäden in mehreren Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) an den Klimawandel auftreten. Eine Verteilung auf mehrere der Handlungsfelder lässt auf eine breitere gesellschaftliche Relevanz des Ereignisses schließen. Die Ermittlung der Schadenskosten (in den einzelnen Handlungsfeldern) führt zudem zu einem erhöhten Bewusstsein für die Komplexität des Klimawandels und seinen Folgen in der Bevölkerung, Politik und Wirtschaft. Ein Schadensereignis mit breiten Auswirkungen zeigt die Zentralität des Umgangs mit den Klimawandelfolgen über die Handlungsfelder hinweg. Darüber hinaus wird sichtbar, welche potenziellen gesamtsystemischen Störungen zukünftig durch das Voranschreiten des Klimawandels zu erwarten sind. Aufgrund der Heterogenität der Handlungsfelder und ihrer gesamtwirtschaftlichen Bedeutung, wird diese Frage jedoch nicht als ein Ausschlusskriterium für einzelne Ereignisse herangezogen, sondern dient einer ersten überblicksartigen Informationsgenerierung für die nächsten Untersuchungsschritte.

Das **dritte Prüfungskriterium** umfasst die **Operationalisierbarkeit** des Schadensereignisses. Die Erfassung des Gesamtschadens über die bereits bestehenden Informationen hinaus bedarf ergänzender Berechnungen, die ggf. auch indirekte bzw. derzeit noch nicht monetarisierte Klimafolge-Dimensionen miteinbeziehen. Hierfür ist die Festlegung und Priorisierung von Schadensindikatoren Ausgangspunkt der anzustellenden Hochrechnungen. Ein **Schadensindikator** setzt sich dabei aus der Kombination des Extremereignisses und eines spezifischen Wirkungskanals zusammen (bspw. „Ernteeinbußen in der Landwirtschaft durch Dürreschäden“ oder „Minderung der Arbeitsproduktivität durch Übertemperaturen“).

5. Können die Klimawirkungen entlang von Schadensindikatoren belastbar quantifiziert werden?

Nachdem die Extremereignisse auf ihre potenzielle Wirkung hin untersucht wurden, wird in diesem Analyseschritt eingeschätzt, inwiefern eine Abdeckung bzw. Operationalisierung der Wirkungen auf Grundlage von zu bildenden Indikatoren möglich ist. Es wird analysiert, inwiefern konkrete Methoden und Vorgehen existieren, über die die entsprechende Schadenshöhe in Form einer Hochrechnung bzw. Abschätzung ermittelt werden kann. Sofern ein entsprechendes mögliches und belastbares Vorgehen für die Operationalisierung identifiziert (auch mit Blick auf die zur Verfügung stehenden Datengrundlagen) werden kann, ist eine Quantifizierung prinzipiell möglich und zielführend. Grundlagen für die Auswahl möglicher Schadensindikatoren bzw. ihrer weiteren Operationalisierung sind unter anderem die Klimawirkungs- und Risikoanalyse des Bundes (KWRA) (Kahlenborn et al., 2021) sowie die Vulnerabilitätsanalyse Deutschlands (Buth et al., 2015). Diese wurden in den weiteren Schritten des Gesamtvorhabens (hierzu u.a. die Veröffentlichungen von Hirschfeld et al. 2021 und Trenczek et al. 2022d) bereits priorisiert.

6. Kann das Extremereignis räumlich, zeitlich oder auf Basis von Klimaparametern eindeutig abgegrenzt werden?

Als letzter Schritt der Analyse wird vor dem Hintergrund der Komplexität und auch Trägheit des Klimasystems untersucht, inwieweit sich das Ereignis auf einen Zeitraum sowie geografischen Raum festlegen lässt. Eine eng gefasste Betrachtung einzelner Extremereignisse berücksichtigt mögliche Interdependenzen im Klimasystem nicht. Beispielsweise stellen zwei aufeinanderfolgende Hitzewellen, die von nur zwei Tagen mit Höchsttemperaturen von 27 °C getrennt werden, meteorologisch zwei verschiedene Ereignisse dar. Im Sinne der Betrachtung der Schäden können sie aber auch gemeinsam analysiert werden. Dies ist insbesondere relevant, da mit der ansteigenden Dauer von Extremereignissen manche Schäden überproportional zunehmen. Beispiele hierfür sind Disruptionen in der Lieferkette oder der Schadenswert von Stürmen in der Forstwirtschaft, wenn entsprechende Baumbestände vorher einem langfristigen Trocken- bzw. Hitzestress ausgesetzt waren (BMEL, 2017).

Das sechste und letzte Analysekriterium stellt daher weniger einen Ausschlussgrund zur Betrachtung der Ereignisse dar, sondern bestimmt, inwiefern das Zusammenwirken mehrerer Extremereignisse über einen bestimmten Zeitraum auch gemeinsam unter Berücksichtigung der Betrachtung der Schadenskosten analysiert werden sollte.

Der pfadbezogene Aufbau erlaubt eine effektive Analyse der einzelnen Extremereignisse. Nur wenn die vorhergehende Frage bejaht werden kann, wird eine Untersuchung des nächsten Analyseschrittes vorgenommen. Nach und nach erfolgt somit eine Fokussierung der Ereignisse, bis entweder nur noch ein Ereignis übrig ist oder mehrere Ereignisse am Ende des Pfades angekommen sind (und somit eine Entscheidung nicht mehr aus Sicht des zu erwartenden Mehrwerts, sondern aus der persönlichen Präferenz getroffen werden muss). Je mehr der Analysefragen entlang des Pfades mit einem „ja“ beantwortet werden können, desto zielführender gestaltet sich eine Detailuntersuchung des jeweiligen Ereignisses.

Im Idealfall ist das zu untersuchende Schadensereignis im Ergebnis ein:

- klimawandelbedingtes Extremereignis mit
- hohen, teilweise noch unbekanntem Schäden und Schadenskosten,
- entlang mehrerer Handlungsfelder der DAS,
- die anhand verstreuter Informationen
- belastbar erfasst
- und eindeutig abgegrenzt bzw. zugeordnet werden können.

In diesem Fall liefert die Untersuchung ein stimmiges Gesamtbild mit hohem Informationsmehrwert für Politik, Gesellschaft und Wirtschaft.

3 Einordnung der Extremwetterereignisse

Für die Auswahl eines geeigneten und untersuchbaren ex-post klimawandelbedingten Schadensereignisses in Deutschland werden Extremereignistypen anhand des im vorangegangenen Kapitel vorgestellten **Analysepfades** untersucht. In diesem Kapitel werden die klimatischen Wetter- oder Klimaextreme zunächst knapp definiert. Anschließend wird die Evidenz für einen Einfluss des Klimawandels als zentrales Bewertungskriterium beleuchtet. Bei einer hinreichenden Evidenz für eine Ursächlichkeit wird das Extremereignis auf die Kriterien Wesentlichkeit und Operationalisierbarkeit untersucht.

3.1 Hagel

Hagel ist ein Niederschlag aus Eiskugeln oder Eisklumpen, welcher meist in warmen Jahreszeiten auftritt. Der Durchmesser von Hagel umfasst von 0,5 bis 5,5 cm und kann in Ausnahmefällen mehr als 10 cm betragen (DWD, 2021b). Hagel ist ein sehr schwierig zu erfassendes, durch das Zusammenspiel vielfältiger klimaphysikalischer Prozesse, kleinräumig auftretendes meteorologisches Ereignis. Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Klimawandels sind mit hohen Unsicherheiten behaftet (Raupach et al., 2021). Für Deutschland liefert die Attributionsforschung bislang keine Antwort auf die Frage, ob vergangene Hagelereignisse klimawandelbedingt in der Häufigkeit oder Intensität zugenommen haben.

Die Untersuchung der Ursächlichkeit ergibt, dass sich das Extremereignis als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses nicht eignet.

3.2 Überschwemmung (Hochwasser)

Grundsätzlich kann zwischen verschiedenen Überschwemmungstypen unterschieden werden:

- Flusshochwasser, als Folge von großräumigen, ausgiebigen und anhaltenden Niederschlägen (meist über einen längeren Zeitraum nicht abschwellende Hochwassersituation größerer Flüsse, bspw. an der Elbe 2002 oder 2013, wo das Hochwasser über mehrere Wochen nicht abfloss)
- Überschwemmungen durch Starkregen und Sturzfluten, als Folge kurzer, aber heftiger lokaler Niederschläge, bei dem der Boden die Niederschlagsmenge nicht mehr aufnehmen kann (meist nur mit kurzfristigem, dafür aber massivem Anschwellen der Pegelstände, insb. kleinerer Flüsse und Bäche verbunden, bspw. im Ahrtal 2021)

Laut dem Weltklimarat (IPCC) werden aus der ex-ante-Perspektive extreme Niederschlagsereignisse in Europa sehr wahrscheinlich bis zum Ende des Jahrhunderts an Häufigkeit und Intensität zunehmen (IPCC, 2018). Inwiefern der Klimawandel vergangene Hochwasserereignisse wahrscheinlicher machte oder intensiverte, ist aufgrund der vielfältigen meteorologischen und nicht-meteorologischen Einflussfaktoren fallspezifisch zu erörtern.

Starkregen bezeichnet eine große Niederschlagsmenge im Rahmen einer Zeitspanne, welche meist im Verhältnis zur Regenmenge recht kurz ist (DWD, 2021b). Wenngleich ein Zusammenhang zwischen der Häufung und Intensität von Starkregenereignissen insgesamt mit dem Anstieg

der globalen Mitteltemperatur nachgewiesen wurde (Zeder und Fischer, 2020), so gibt es in der Attribution einzelner Ereignisse zum Klimawandel noch unterschiedliche Erkenntnisse:

Die Attributionsforschung bestätigt bspw. einen klimawandelbedingten Einfluss für ein Starkregenereignis im Mai 2016 in Frankreich (van Oldenborgh et al., 2016). Weitere Studien bestätigen einen kausalen Zusammenhang zum Klimawandel für Großbritannien und Texas (Schaller et al., 2016; van Oldenborgh et al., 2015; WWA, 2019c). Für vergangene Starkregenereignisse in Deutschland, wie in Dortmund 2008, Osnabrück 2010, Münster 2014, Braunsbach 2016, Duisburg 2016 oder Berlin 2017, liegt derzeit jedoch keine klare Evidenz für eine treibhausgasbedingte Steigerung der Intensität oder Häufigkeit vor. Jedoch konnte eine Schnell-Attributionsstudie aus dem August 2021 zu der verheerenden Sturzflut im Ahrtal und dem südlichen Nordrhein-Westfalen erstmals einen Zusammenhang zwischen dem anthropogenen Klimawandel und der Auftretswahrscheinlichkeit eines Überschwemmungsereignisses für Deutschland feststellen (Kreienkamp et al., 2021). Die Untersuchung des Extremereignisses im Ahrtal ist somit hinsichtlich des Prinzips der Ursächlichkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses **geeignet**, wenngleich die genannte Studie derzeit aufgrund ihrer getroffenen Annahmen in der Fachwelt derzeit noch kritisch diskutiert wird.

Hinsichtlich vergangener Flusshochwasserereignisse gibt es Indizien für klimatische Einflüsse als Ursache aufwärtsgerichteter Trends von Flusspegeln in Deutschland (Petrow und Merz, 2009). Jedoch **ist noch offen**, inwiefern vergangene europäische Flusshochwasserereignisse, wie das der Elbe 2002 oder Donau 2013, auf den Klimawandel zurückzuführen sind (DWD, 2003; Muldsee et al., 2003; Barredo, 2009; Merz, 2014; Sauer et al., 2021).

Eine weitere Ursache für Überschwemmungen sind Sturmfluten (DWD, 2021b). Diese treten wiederkehrend an den deutschen Küsten (im Besonderen Nordsee und unter spezifischen Bedingungen auch Ostsee) auf. Zwar gibt es im Vergleich zu den 1950er Jahren heute etwa drei bis vier zusätzliche Sturmtage in Norddeutschland, diese lassen sich jedoch **nicht** auf die Folgen menschengemachter Treibhausgasemissionen zurückführen, sondern sind natürlichen Schwankungen zuzuordnen (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2013).

Die Untersuchung der Ursächlichkeit ergibt, dass das Extremereignis (und hier insbesondere die Fallstudie des Ereignisses aus dem Juli 2021) als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet ist. Die in der Folge entsprechend durchgeführte Untersuchung und ihre Schadenssumme findet sich in Trenczek et al. (2022b).

3.3 Sturm

Starker Wind im Rahmen der Beaufort-Skala, von 74 bis 117 km/h, wird als Sturm bezeichnet (DWD, 2021b). Im Kontext der Extremwetterereignisse sind vor allem orkanartige Stürme (103 bis 117 km/h) sowie Orkane (über 117 km/h) relevant. Diese treten insbesondere in Küstennähe auf, da sich Stürme aufgrund der geringen Bodenreibung auf dem Meer besser aufbauen können, und die großflächige Verdunstung von Wasser die kühlen Luftschichten verwirbelt. Wetterkarten und Stationsmeldungen geben Windgeschwindigkeiten als Mittelwert der jeweils letzten zehn Minuten an. Schäden resultieren insbesondere aus punktuellen Böen und Windstößen.

Da orkanartige Stürme nur sehr selten auftreten und mit zahlreichen lokalen Faktoren zusammenhängen, sind die Vorhersagen und Attributionsuntersuchungen sehr komplex (WWA, 2018a). Insgesamt ist der Untersuchungsstand vergangener Ereignisse noch sehr dünn. Eine klimawandelbedingte Evidenz konnte für den Tropensturm Imelda in Texas gefunden werden (WWA, 2019c). Ob in Deutschland durch den Klimawandel Stürme häufiger oder auch intensiver auftreten

konnte bislang nicht bestätigt werden. Erste Untersuchungen zu den Stürmen Frederike und Eleonore im Jahr 2018 bestätigten keinen Zusammenhang mit dem Klimawandel (WWA, 2018b).

Die Untersuchung der Ursächlichkeit ergibt, dass sich das Extremereignis als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses nicht uneingeschränkt eignet.

3.4 Hitzewellen (Hitzeperioden)

Aufgrund der global unterschiedlichen klimatischen Bedingungen gibt es keine einheitliche Definition von Hitzewellen anhand von Klimaparametern. Für Deutschland spricht der Deutsche Wetterdienst von einer Hitzewelle, sofern an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen eine Höchsttemperatur von mehr als 28 °C vorliegt (DWD, 2021b). Neben der meteorologischen Einordnung der Hitzewelle spielen für ihre Gesamtbewertung noch weitere Faktoren wie Strahlungsintensität, Windaufkommen und -geschwindigkeiten sowie Luftfeuchtigkeit eine wichtige Rolle, die Einfluss auf den thermischen Komfort des Menschen haben. Ab einer „gefühlten Temperatur“ (die diese Parameter mit einberechnet) von 32 °C liegt eine starke Wärmebelastung, ab 38 °C eine extreme Wärmebelastung vor.

Die Untersuchung der **Ursächlichkeit** zeigt, dass in der Attributionsforschung eine deutliche Evidenz für die klimawandelbedingte Steigerung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Hitzewellen vorliegt (Büntgen et al., 2021; WWA, 2019a; WWA, 2019b). Sichtbar wurde die Häufigkeit von Hitzewellen insbesondere in den vergangenen Jahren 2018, 2019 sowie 2020. Untersuchungen der World Weather Attribution (WWA) zeigen, dass die Wiederkehrperiode von Hitzewellen, wie sie Juli 2019 u.a. in Frankreich auftraten, ohne den Klimawandel ca. 50 bis 150 Jahre beträgt, wobei diese durch den Klimawandel derzeit statistisch alle zehn Jahre auftreten. Klimamodellen zufolge wird sich dieser Rhythmus in Zukunft voraussichtlich noch verschleunern und statistisch zu einem Auftreten alle drei Jahre werden. Ähnliche Analysen zeigen den gleichen statistischen Zusammenhang auch für Deutschland (WWA, 2019a). Jüngste Untersuchungen haben gezeigt, dass global gesehen seit 1991 37% aller hitzebedingten Todesfälle auf den Klimawandel zurückführbar sind (Vicedo-Cabrera et al., 2021). Es liegt also eine hinreichende Evidenz vor, dass Hitzewellen durch den Klimawandel intensiviert werden. **Das Extremereignis ist somit hinsichtlich des Aspekts der Ursächlichkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet.**

Die Untersuchung der **Wesentlichkeit** zeigt, dass die Informationslage zu Schäden, die während vergangener Hitzewellen angefallen sind, derzeit noch sehr gering ist, wenngleich erste vielversprechende Ansätze einer Quantifizierung bereits vorliegen. Schäden durch Hitzewellen sind dabei bisher insbesondere in zwei Bereichen untersucht worden: Schäden, die sich aufgrund einer hitzebedingten Übersterblichkeit in der Bevölkerung ergeben (so haben bspw. Untersuchungen gezeigt, dass zwischen 1992 und 2017 in Deutschland fast 64.000 Menschen an den Folgen von Hitze verstorben sind (an der Heiden et. al., 2020) und Schäden, die durch hitzebedingte Einbußen von Produktivität in der Industrie und dem Gewerbe entstehen (UBA, 2020). Weitere Schadensdimensionen, die sich aus einer erhöhten Temperatur ergeben, sind Schäden an Gebäuden und (Verkehrs-) Infrastrukturen, bspw. Verformungen von Materialien und Bausubstanzen unter hoher Temperatureinwirkung bzw. Sonneneinstrahlung. Für diese Schäden gibt es jedoch noch keine oder nur sehr punktuelle Abschätzungen der Schadenshöhen. Auch im Handlungsfeld Biodiversität ergeben sich durch veränderte Temperaturen Gefahren für einzelne Ökosysteme, so kann bspw. übermäßiges Algenwachstum zum „Umkippen“ von Seen oder anderen aquatischen Ökosystemen führen, diese Auswirkungen sind dann ggf. auch im Bereich der Fischerei sichtbar. Es zeigt sich, dass so gut wie alle Handlungsfelder der DAS von den Auswirkungen vermehrter

und intensiverer Hitzewellen betroffen sind.

Auf Grundlage der bisher geringen Informationslage, verbunden mit der hohen gesellschaftlichen Relevanz der Ergebnisse, ist das Extremereignis hinsichtlich des Aspekts der Wesentlichkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet.

Die Untersuchung der **Operationalisierbarkeit** zeigt, dass eine Untersuchung der Schäden entlang einzelner Schadensindikatoren belastbar möglich ist. Die vorliegenden Analysewege (Ermittlung der Todesfälle durch Hitze, sowie Produktivitätseinbußen durch Hitze) decken bereits einen Großteil der angefallenen Schäden ab. Diese gilt es einerseits methodisch zu festigen (z.B. eine eventuelle Schadensquantifizierung eines Menschenlebens) und andererseits durch die punktuelle Einbeziehung weiterer quantifizierbarer Dimensionen (bspw. Folgeschäden durch hitzebedingte Infrastrukturausfälle) zu ergänzen.

Eine methodische Schwierigkeit in der Untersuchung liegt in der nicht immer eindeutigen Abgrenzbarkeit zu weiteren Extremereignissen. So werden auch die im Folgenden zu untersuchenden Dürren durch hohe Temperaturen (in Kombination mit fehlendem Niederschlag) ausgelöst, die wiederum weitere Folgeschäden mit sich bringen. Auch die zeitliche Abgrenzung einer Hitzewelle gestaltet sich nicht immer eindeutig: Aus meteorologischer Sicht ist diese zwar eindeutig definiert (s.o.), eine sehr eng gefasste Betrachtung einzelner Extremereignisse lässt jedoch die Interdependenzen im Klimasystem außer Acht.

In der Gesamtbetrachtung ist das Extremereignis hinsichtlich des Aspekts der Operationalisierbarkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet. Es bietet sich jedoch an, aufgrund der benannten Zusammenhänge, Abhängigkeiten und der sich z.T. verstärkenden Wirkungen aufeinanderfolgender Hitzewellen (bspw. auf die Wahrnehmung der Hitzebelastung und daraus resultierende Effekte in der Verringerung der Arbeitsproduktivität) im Klimasystem alle in einem festgelegten Zeitraum auftretenden Hitzewellen unter dem Begriff „sommerliche Hitzewellen im Jahr X“ zusammengefasst zu betrachten.

3.5 Dürre (Trockenperiode)

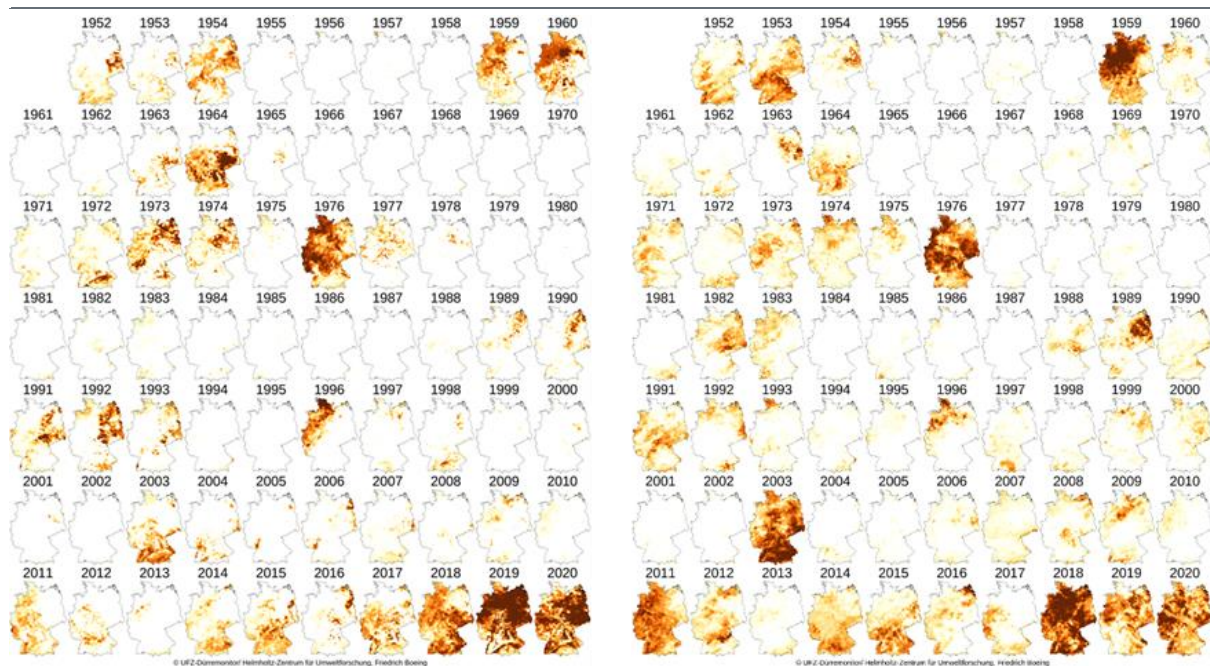
Unter Dürre wird eine hydrologische, landwirtschaftliche und ökologische Wasserknappheit über einen langanhaltenden Zeitraum verstanden (Tate & Gustard, 2000). Dabei wird Dürre als Abweichung vom langjährigen Erwartungswert in einem sogenannten Perzentilansatz geschätzt und bezieht sich stets auf die regionalen Niederschlagsverhältnisse (UFZ, 2021a; IPCC, 2012). Der Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) spricht von einer Dürre, wenn die aktuelle Bodenfeuchte unter das langjährige zwanzigste Perzentil fällt. Bei der Bodenfeuchte unterscheidet das UFZ zwischen Dürren im Gesamtboden (diese wird auf Basis eines Bodenfeuchteindex für eine Tiefe von ca. 1,80 Meter ermittelt) und im Oberboden (diese wird auf Basis eines Bodenfeuchteindex bis zu einer Tiefe von ca. 25 cm ermittelt).

Im historischen Vergleich ist sowohl für Europa als auch konkret für Deutschland eine steigende Intensität und Häufigkeit von Dürren zu beobachten (siehe Abbildung 2). Die Attributionsforschung zeigt eine **starke Evidenz** dafür, dass der Klimawandel Dürren wahrscheinlicher werden lässt. Konsultierte Studien bestätigen eine treibhausgasbedingte europäische Dürre in den vergangenen Jahren (Garcia-Herrera et al., 2019; Acosta-Navarro et al., 2019). Auch das WWA bestätigt eine klimawandelbedingte Dürre in Kombination mit Hitzewellen für den Sommer 2019 in Deutschland und Europa (WWA, 2019a). Dies lässt darauf schließen, dass Dürren ein zunehmendes Extremwetterereignis in den kommenden Jahren darstellen werden. Modellierungen von Klimaszenarien zufolge dürfte sich die Zahl zweifacher sommerlicher Dürreperioden, wie die der

Jahre 2018 und 2019, in Mitteleuropa in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts versiebenfachen (Hari et al., 2020). Im Vergleich: Seit 1766 gab es in Mitteleuropa keine zwei aufeinanderfolgenden Sommer dieser Art.

Die Untersuchung der Ursächlichkeit ergibt, dass sich das Extremereignis als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses eignet.

Abbildung 2: Die Dürren 2018/2019 im historischen Vergleich



Normierte Dürremagnituden im Gesamtboden (bis 1,8 m Tiefe, links) und im Oberboden (bis 25 cm Tiefe, rechts) im Zeitraum April bis Oktober

Quelle: UFZ-Dürremonitor/ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) (2021b)

Die Untersuchung der **Wesentlichkeit** zeigt, dass hinsichtlich der Schäden und Schadenskosten durch Dürre zwar einzelne Informationen vorliegen, jedoch noch kein umfassendes Gesamtbild gegeben werden kann. Besonders intensiv wird die durch Trockenheit begünstigte Mortalität von Bäumen und Pflanzen durch die Langzeitfolgen der Dürren 2018 und 2019 diskutiert. So beziffert der Deutsche Bauernverband (DBV) die durch die Dürre 2018 entstandenen Schäden an der gesamtdeutschen Ernte auf insgesamt 3 Milliarden. Euro. Darüber hinaus deuten wissenschaftliche Untersuchungen auf erhebliche indirekte Kosten durch Multiplikatoreffekte hin. Neben dem DAS Handlungsfeld Landwirtschaft ist auch die Wald- und Forstwirtschaft von Dürren stark betroffen. So begünstigte die Trockenheit den Befall von Bäumen durch Schädlinge wie dem Borkenkäfer. Laut dem Bundeslandwirtschaftsministerium summiert sich das Schadholz der beiden Jahre 2018 und 2019 auf mindestens 70 Millionen Kubikmeter, mit einem Gesamtschaden von 2,5 Milliarden Euro (Stuttgarter Nachrichten, 2019). Schwierigkeiten bei der Bewertung von Waldschäden durch den Verlust von Ökosystemdienstleistungen deuten allerdings auf eine hohe Dunkelziffer hin. So schätzt das Thünen-Institut die ökonomischen Gesamtschäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft auf fast 13 Milliarden Euro (Möhring et al., 2021).

Die Folgen anhaltender Trockenheit umfassen ebenfalls sinkende Flusswasserstände, die zu Kosten durch Lieferkettenunterbrechungen und Produktionsausfälle führen können. Beispielsweise

gibt der Chemiekonzern BASF an, im Zuge des extremen Rheinniedrigwassers von September bis Dezember 2018 Kosten i.H.v. von 250 Millionen Euro durch Produktionsverluste und Zusatzkosten in der Logistik allein am Standort Ludwigshafen verzeichnet zu haben (BfG, 2019). Insgesamt deuten vorliegende Informationen auf hohe gesellschaftliche Schadenskosten durch die Dürren 2018 und 2019 in mehreren Handlungsfeldern, die noch nicht in einem Gesamtbild erfasst wurden.

Das Extremereignis ist damit hinsichtlich des Aspekts der Wesentlichkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet.

Die Untersuchung der **Operationalisierbarkeit** zeigt, dass eine Untersuchung der Schäden entlang einzelner Schadensindikatoren nur eingeschränkt durchführbar ist. Die vorliegenden Analysewege (Ertragsverluste in der Landwirtschaft, Waldschäden und Kosten durch Niedrigwasser) sind theoretisch fundiert. Allerdings sind Quantifizierung sowie Monetarisierung teils unsicher und unklar. Zwar lassen sich vorliegende Informationen zu Ertragsverlusten bspw. über Produktionswerte der Landwirtschaftlichen Gesamtrechnung 2018 sowie belastbarer Annahmen und Studien validieren (Wollesen et al., 2021). Bei der Erfassung und Monetarisierung von Waldschäden existieren jedoch erhebliche methodische Schwierigkeiten. Verstärkt werden diese durch Probleme hinsichtlich einer eindeutigen Abgrenzbarkeit des Schadensereignisses. Zum einen bauen sich Dürren über einen langanhaltenden Zeitraum auf und lassen sich zeitlich schwer abgrenzen. So wurde beispielsweise die Basis für die Dürre Ende 2018 bereits durch eine Hitzeperiode im Frühling gelegt und wirkte in das Jahr 2019 hinein (Bastos et al., 2020). Zum anderen ist eine genaue zeitliche Zuordnung von Dürreschäden nicht möglich. So beeinflussen die Folgen der Dürre 2018 bspw. Waldschäden in den Folgejahren massiv. **In der Gesamtbetrachtung ist der Extremereignistyp hinsichtlich des Aspekts der Operationalisierbarkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet.** Allerdings empfiehlt sich aufgrund der beschriebenen Interdependenzen eine weiter gesteckte Abgrenzung des Schadensereignisses auf mehrere Perioden bzw. Aufttrittsjahre. Die in der Folge entsprechend durchgeführte Untersuchung und ihre Schadenssumme findet sich in Trenczek et al. (2022a).

3.6 Zwischenfazit

Basierend auf den Ergebnissen der Analyse der einzelnen Extremereignistypen für eine detaillierte Betrachtung der angefallenen Schäden, schlagen wir daher eine kombinierte Betrachtung der Ereignistypen Hitzewellen und Dürren/ Trockenheit in einem festgelegten Zeitraum vor.

Diese gemeinsame Betrachtung bietet sich aufgrund der engen Interdependenzen beider Ereignisse untereinander an und bietet konsolidiert belastbarere Ergebnisse. Studien (u.a. Seneviratne et al., 2010) zeigen bspw., dass trockene Böden zusätzlich den Temperaturanstieg auf regionaler Ebene verstärken können, aufgrund von Rückkopplungen zwischen Land und Atmosphäre (Vautard et al., 2020). Es bietet sich darüber hinaus an, den Zeitraum, insbesondere bei der Betrachtung von Dürren, auch über eine Jahresgrenze hinaus zu definieren, da Trockenheit in den tieferen Bodenschichten durchaus lange Zeiten überdauert und folgende Trockenperioden somit verstärkt werden. Diese übergreifende Sicht vertreten auch führende Forscherinnen und Forscher, die sich mit dem Monitoring von Dürren, u.a. am UFZ befassen: „Es ist wichtig, dass wir die Bedeutung von Dürren in aufeinander folgenden Jahren erkennen und einen ganzheitlichen Rahmen zur Modellierung des Risikos entwickeln.“ (Rohini, K. in: Hufe, S. 2020, Hari et al., 2020).

Ein Rückkopplungseffekt zwischen Hitzewellen und Dürren war auch in den Jahren 2018 und 2019 zu beobachten: Durch erste Hitzewellen im Juni und die darauffolgende Austrocknung der Böden wurde die jeweils zweite Hitzewelle im Juli verstärkt und es traten sogenannte

„Zwillingshitzewellen“ auf. Eine Betrachtung der Hitze- und Dürreextreme 2018 und 2019 ist zudem sinnvoll, da sie durch ihre jeweils besonders hohe Intensität einen hohen Anteil zur Bewusstseinsbildung über die Relevanz des Klimawandels in der Gesamtgesellschaft hatten. Aufgrund des vergleichsweise kurz zurückliegenden Ereigniszeitraums sind die Ereignisse in der heutigen Gesellschaft präsent. Gleichzeitig gibt es bisher noch wenig umfassende Untersuchungen zu den langfristigen Folgen. Weitere Hitzejahre, die betrachtet werden könnten, wären die Jahre 1994 sowie 2003. Diese liegen jedoch bereits zu lange zurück und insbesondere das Jahr 2003 ist im deutschen und europäischen Kontext bereits intensiv untersucht worden.

Als Ergebnis der Einschätzung der Extremereignisse entlang des Analysepfades schlagen wir eine Betrachtung der Sommerextreme Dürre und Hitzewelle in den Jahren 2018/2019 vor. Für diese Ereignisse ist die Rolle des Klimawandels wissenschaftlich untermauert. Darüber hinaus weisen beide Ereignisse ein vermeintlich hohes, jedoch noch nicht umfassend bilanziertes Gesamtschadensausmaß auf. Im Gegensatz zu Sturmschäden sind die Kosten von Dürre und Hitze selten versichert. Darüber hinaus erstrecken sich die Schäden über viele DAS-Handlungsfelder und liegen nur stark fragmentiert vor.

Weiterhin bietet es sich an, die jüngst aufgetretenen Überflutungen des Juli 2021 in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz ebenfalls genauer zu untersuchen. Hier bietet sich jedoch ein leicht unterschiedliches Bild im Vergleich zu den Hitze- und Dürreereignissen: So ist die ungefähre Gesamtschadenshöhe des Ereignisses bekannt (bzw. wird laufend kommuniziert und aktualisiert), es fehlt jedoch noch ein genaueres Bild der Schadensverteilung entlang der DAS Handlungsfelder sowie d eine Schätzung der indirekt angefallenen Schäden.

4 Die Hitze- und Dürreextreme 2018 / 2019 im Überblick

Die Sommer 2018 und 2019 waren für Deutschland meteorologisch extrem. In diesem Kapitel wird ein knapper Überblick über die Entwicklung der Sommerextreme Hitze, Dürre und Niedrigwasser in den beiden Jahren geben. Dabei wird insbesondere im Fall der Dürren deutlich, wie stark die Sommerextreme beider Jahre zusammenhängen. Daher werden sie gemeinsam als Gegenstand einer vertieften Untersuchung vorgeschlagen.

4.1 Hitze(-wellen) 2018/2019

Der Mensch verträgt eine übermäßige Hitze nicht. Insbesondere ab einer Temperatur von 30 °C (entspricht der Definition eines **Hitzetags**) steigt die Herzfrequenz, Arbeit wird als erheblich belastender wahrgenommen und eine abnehmende Konzentration führt zu erhöhter Fehler- und Unfallanfälligkeit. Darüber hinaus steigen mit hohen Temperaturen die Krankheitsanfälligkeit sowie Sterblichkeit, insbesondere bei älteren und geschwächten Menschen.

Deutschland erlebte 2018 bundesweit und über einen langen Zeitraum eine deutlich überdurchschnittliche Anzahl an Hitzetagen. Die ersten Tage mit Temperaturen von über 30 °C wurden bereits im April (z. B. in Ohlsbach 30,4 °C am 22. April) gemessen. Zwischen Mai und Juni kam es in ganz Deutschland zu Temperaturen von bis zu 34 °C (DWD, 2018b). Die 35 °C Marke wurde in Deutschland zum ersten Mal am 24. Juli überschritten (35,9 °C in Lingen) (CEDIM, FDA, 2018). Dabei waren Hitzetage keine Einzelphänomene. Subtropisch heiße und feuchte Luftmassen brachten im letzten Julidrittel eine weitere intensive Hitzewelle mit sich. Zwischen dem 23. Juli und 9. August gab es flächendeckend in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen täglich Temperaturen über 30 °C. Eine besonders lange Hitzewelle gab es in Unterfranken, im Rhein-Main Gebiet und Teilen Baden-Württembergs mit 18 heißen Tagen in Folge (DWD, 2018b). **Insgesamt verzeichnete das Jahr 2018 im Gebietsmittel über 20 Hitzetage und damit fast doppelt so viele wie im Durchschnitt der Dekade 2010-2020 (11 Tage)** (DWD, 2020a). Das Jahr 2018 war somit, insbesondere auch ausgelöst durch die beschriebene Hitzewelle, das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in Deutschland 1881.

Auch der Sommer 2019 war bundesweit außergewöhnlich heiß. Zwar war der Frühling etwas kühler als im Vorjahr, dafür gab es den wärmsten Juni seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (DWD, 2019d). Bundesweit registrierten im Juni 437 Stationen einen heißen Tag mit über 30 °C, 223 Stationen verzeichneten mind. 35 °C (DWD, 2019b). Im Juli wurde es noch heißer. Während der extremen Hitzewelle vom 24. bis zum 26. Juli wurden in Deutschland jeden Tag Temperaturen von über 40 °C gemessen (DWD, 2019a; DWD, 2019b). Eine Hitzewelle solchen Ausmaßes ist in Deutschland zum ersten Mal seit Beginn der Aufzeichnungen aufgetreten (Bissolli et al, 2019). An 14 Stationen wurde der Spitzenwert von 40,3 °C in Kitzingen aus dem Jahr 2015 überschritten. In Duisburg und Tönisvorst in Nordrhein-Westfalen wurde ein neuer nationaler Hitzerekord mit 41,2 °C aufgestellt (DWD, 2020b). **Insgesamt gab es im Jahr 2019 im Gebietsmittel fast 17 Hitzetage.** Das Jahr 2019 galt sowohl in Deutschland als auch global als das zweitwärmste Jahr (DWD, 2020a), wurde aber vom Jahr 2020 von Platz zwei auf Platz drei verdrängt.

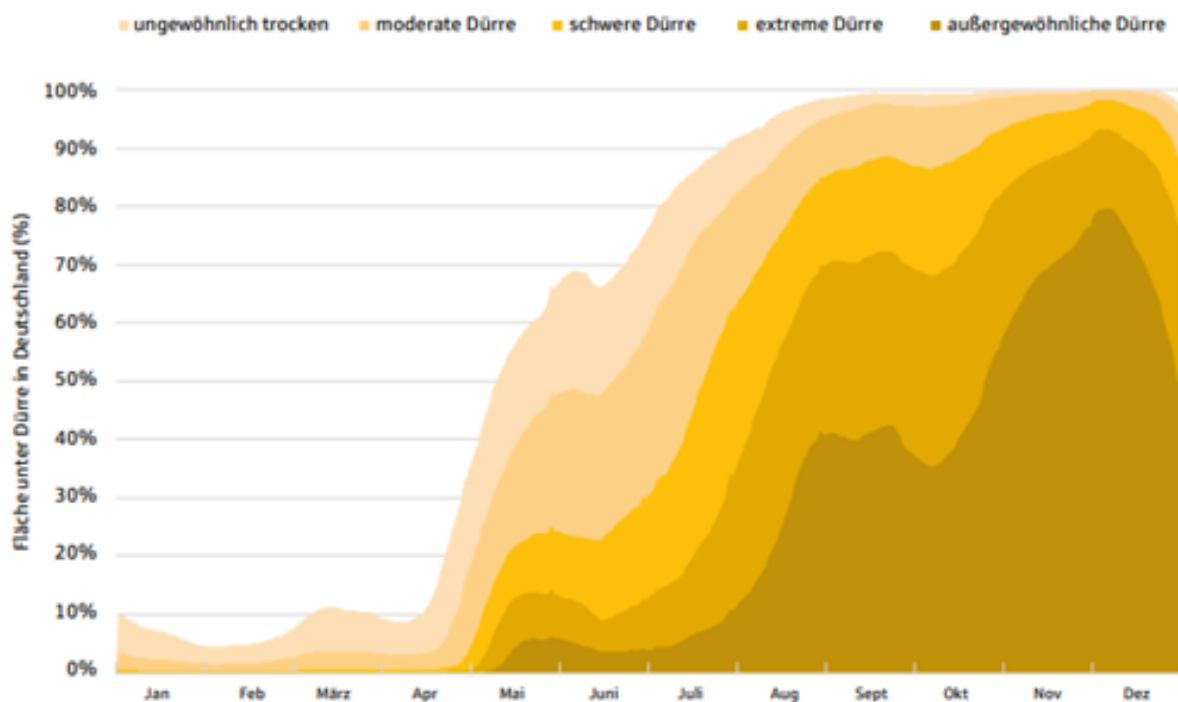
In der Zusammenschau ist der temperaturbedingte Klimaimpuls der Jahre 2018 / 2019 in der langjährigen Beobachtung als außergewöhnlich einzuschätzen. Neben den direkten Folgen der Hitzebelastungen entstanden weitergehende Folgewirkungen in Form einer extremen Dürre.

4.2 Dürreextreme 2018/2019

Hohe Temperaturen führen zu hohen Verdunstungsraten der Bodenfeuchte. In Kombination mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen führt dies dazu, dass die klimatische Wasserbilanz großräumig negativ ist. In der Folge trocknen Böden aus und es kommt zu Dürren. Mit anhaltender Dauer der Dürreperiode sind vor allem die Land-, Wald- und Forstwirtschaft betroffen, aber auch wasserintensive bzw. die auf dieses angewiesenen Wirtschaftszweige, wie der Gütertransport auf den Wasserstraßen, können nur stark eingeschränkt agieren.

Entscheidend für die volkswirtschaftlichen Folgen von Dürren sind die betroffene Fläche und Vegetation, der absolute Trockenheitsgrad sowie die zeitliche Dauer. Neben den hohen Temperaturen war das Jahr 2018 auch von geringen Niederschlägen geprägt (DWD, 2018a). Vor allem der Norden Europas wurde mehrere Monate lang von einem beständigen Hochdruckgebiet dominiert. Dadurch gelangten atlantische Tiefdruckgebiete, die Niederschlag und kühlere Luft mit sich bringen, nur selten nach Mitteleuropa (CEDIM FDA, 2018; DWD, 2018b).

Abbildung 3: Entwicklung der Dürre im Jahr 2018



Fläche unter Dürre in Deutschland in %

Quelle: Deutsche Rück (2019) in Anlehnung an Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) (2019)

Die Basis für die Dürre 2018 wurde bereits früh im Jahr gelegt (Bastos et al., 2020). Das Jahr zeichnete sich durch eine ausgeprägte Frühjahrs- und Sommertrockenheit aus. Bereits im Februar setzte eine Trockenheitsperiode in Mitteleuropa ein und auch in den darauffolgenden Monaten lag ein anhaltendes Niederschlagsdefizit vor. Im Mittel kam es zwischen Februar und August 2018 zu nur etwa 60 % der üblichen Regenmengen in Deutschland (CEDIM, 2018; DWD, 2018b). Nur das Jahr 1911 war im Zeitraum April bis August noch trockener (DWD, 2018b). Für das gesamte Jahr 2018 weisen Untersuchungen des DWD eine Niederschlagsmenge von weniger als 75% gegenüber dem Bezugszeitraum 1961-1990 aus (DWD, 2019d). Das Jahr 2018 war damit eines der niederschlagärmsten Jahre seit 1881 (DWD, 2018a).

Aus der Trockenheit resultierte in der zweiten Jahreshälfte ein zunehmender Dürrestress. Die Dürre im Jahr 2018 war dabei ein besonders großflächiges Ereignis. Ab dem August war nahezu ganz Deutschland ungewöhnlich trocken und im November von einer Dürre betroffen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Zum Vergleich: Im Hitzesommer 2003 lag der Wert bei max. 74%. Zuletzt gab es 1976 ein ähnlich großflächiges Ereignis (CEDIM, 2018). Deutschlandweit waren die Böden im Sommer und Herbst 2018 trockener als in allen vorherigen verfügbaren Jahren im Dürremonitor seit 1951.

Die Folgen des Dürresommers 2018 wirkten auch in das Jahr 2019 hinein. So starteten Ackerflächen in ganz Deutschland mit schwerem bis außergewöhnlichem Dürrestress im Gesamtboden. Zwar brachten überdurchschnittliche Niederschläge im Januar und März 2019 vor allem im Oberboden eine Entspannung, das vorherrschende Niederschlagsdefizit konnte jedoch nur leicht reduziert werden (DWD, 2019d). Im April fielen nur 60 % der üblichen Niederschlagssumme. Im Sommer führten Gewitter an vereinzelten Tagen gebietsweise zu hohen Niederschlagssummen. Insgesamt wurde das jährliche Niederschlagssoll jedoch deutlich verfehlt (-27%) (DWD, 2019a). Die hohen Temperaturen im Juni strapazierten die Bodenfeuchte Anfang Juli im Großteil Deutschlands zunehmend. Zum Teil unterschritt die Bodenfeuchte sogar die geringen Werte aus dem Vorjahr 2018. Besonders stark betroffen waren Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen, wo die niedrigsten Bodenfeuchten seit Beginn der Messungen 1961 verzeichnet wurden (DWD, 2019d; DWD, 2019a).

Wir schlagen vor, im Rahmen der Sommerextreme 2018 / 2019 auch die Schäden und Schadenskosten durch Dürre zu untersuchen. Zur Operationalisierung bietet sich beispielsweise der Schadensindikator „Ertragsverluste in der Landwirtschaft“ an. Inwieweit Schäden und Schadenskosten im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft erfasst werden können, ist zu klären.

4.3 Exkurs: Niedrigwasser des Rheins 2018

Eine Folge anhaltender Trockenheit und hoher Hitze sind sinkende Flusspegel. Im Jahr 2018 waren zuerst die Pegelstände der Fließgewässer im Osten und Norden Deutschlands von den geringen Niederschlägen beeinträchtigt. Später folgten auch Fließgewässer im Westen und Süden. Ab dem Spätsommer kam es zu neuen historischen Tiefständen. So verzeichnete bspw. der Rhein im Herbst 2018 einen Niedrigwasserrekord (BfG, 2019).

Von den großen Bundeswasserstraßen waren vor allem Weser und Elbe betroffen. An 80% aller Tage zwischen Juni und Dezember wurde der schiffahrtsrelevante Niedrigwasserstand in der Weser unterschritten. In der Elbe waren es sogar 90% (BfG, 2019). Allerdings führte vor allem der geringe Rheinwasserstand zu ökonomischen Konsequenzen in Form von niedrigen Lademengen und Lieferengpässen. Erst Anfang Dezember kam es dort wieder zu steigenden Pegelständen (BfG, 2019).

Die genauen Kosten der Niedrigwasserperiode am Rhein sind durch die komplexe Verkettung von Liefer- und Vorleistungsbeziehungen vor allem in der Industrie und dem produzierenden Gewerbe für Deutschland kaum ermittelbar. Derzeit beschäftigt sich ein mehrjähriges Forschungsprojekt mit der Frage nach den Folgekosten für den Logistikstandort Duisburg – auf Basis regionalisierter Input-Output-Tabellen, die die Verflechtung von Branchen untereinander beschreiben, sollen die Folgekosten des Niedrigwassers sichtbar gemacht werden (Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e. V., 2021). Für Gesamtdeutschland ist derzeit kein solch umfangreiches Vorhaben bekannt, weshalb nur eine exemplarische Betrachtung, bspw. anhand der Jahresberichte und Bilanzen relevanter und vom Schiffsverkehr abhängiger Unternehmen entlang des Rheins, erfolgen kann.

So entstand bspw. allein am Ludwigshafener Werk des Chemiekonzerns BASF ein niedrigwasserbezogener Verlust von 250 Mio. € (BfG, 2019). Der Leverkusener Chemiekonzern Covestro verzeichnete im vierten Quartal 2018 ebenfalls einen um 250 Mio. € geringeren Umsatzerlös als im Vorjahreszeitraum, der sich auf die fehlenden Transportmöglichkeiten durch das Niedrigwasser zurückführen lässt. Im Vergleich zum dritten Quartal 2018 liegt der Wert sogar um 430 Mio. € niedriger (Covestro AG, 2019). Auch aufgrund fehlender Einleitungs- und Entnahmekapazitäten durch den niedrigen Wasserstand kam es im produzierenden Gewerbe und im Bergbau zu Produktionsunterbrechungen: Bedingt durch den niedrigen Wasserstand der Werra musste der Mineralienförderer und -hersteller K+S drei seiner Produktionsstandorte für bis zu 38 Tage schließen, was für eine Bilanzeinbuße von 110 Mio. € sorgte (K+S Aktiengesellschaft, 2019).

Die von den Unternehmen gemeldeten Schadenszahlen beziehen dabei die potenziellen indirekten Kosten im weiteren Verlauf der Liefer- und Wertschöpfungskette der betroffenen Produkte noch nicht mit ein, sodass die tatsächlichen Schäden auch in diesem Bereich noch deutlich höher liegen dürften.

5 Ausblick und nächste Schritte

In den nachfolgenden Arbeitsschritten wird für das zu untersuchende Ereignis eine detaillierte empirische ex-post-Untersuchung durchgeführt, welche eine Übersicht und Quantifizierung der Schäden und Schadenskosten des klimawandelbedingten Ereignisses schafft. Diese beinhaltet unter Berücksichtigung der DAS-Handlungsfelder und einzelner Sektoren die Erstellung, Priorisierung und Quantifizierung entscheidender Wirkungskanäle bzw. Schadensindikatoren zur Ermittlung des Schadensausmaßes. Zu diesem Zweck werden weitere Detailuntersuchungen durchgeführt. Ziel ist die Entwicklung eines fundierten Ansatzes, mit dem sich

- aus den bestehenden Informationen zu Schäden entlang der Wirkungskanäle ein Gesamtschadensausmaß aggregieren lässt
- das Gesamtschadensausmaß auf die einzelnen Handlungsfelder der DAS bzw. weitere Wirkungskanäle verteilen ließe.

Die quantifizierten Ergebnisse werden einerseits wissenschaftlich aufbereitet publiziert. Darüber hinaus werden sie im Rahmen des Gesamtprojektes aufbereitet, sodass sie für eine breite Öffentlichkeit verständlich und prägnant sind, um über die realen und bereits aufgetretenen Folgen des Klimawandels aufklären zu können.

Im Rahmen der weiterführenden Untersuchungen der Sommerextreme 2018 und 2019 (Trenczek et al., 2022a) wird anhand ausgewählter Beispiele auch darauf eingegangen, inwiefern sich die ermittelten Schäden durch Anpassungsmaßnahmen hätten verringern lassen. Die Ergebnisse der Detailbetrachtung des Ereignisses werden anschließend Eingang in die Modellierung zukünftiger Schadenskosten des Klimawandels für Deutschland finden.

Zusätzlich wird eine Untersuchung der Sturzfluten und Überschwemmungen des Juli 2021 durchgeführt (Trenczek et al., 2022b), die die bekannten bzw. laufend aktualisierten Schadenshöhen auf einzelne Schadensindikatoren bzw. -dimensionen herunterbricht (im Sinne eines top-down-Ansatzes statt einer bottom-up-Untersuchung wie bei den Hitze- und Dürreextremen). Somit können auch hier detailliertere Aussagen über die indirekten Effekte des Ereignisses getroffen werden, die bisher noch in keiner weiteren Analyse der Sturzflut Gegenstand der Untersuchungen war. In der Folge soll dann aufgrund des gewonnenen Kenntnisstands über die zwei durchaus komplementär agierenden Extremereignistypen ein Vergleich von Schadenshöhen sowie -aufkommen und Vulnerabilitäten durchgeführt werden (Trenczek et al., 2022c).

Quellenverzeichnis

Acosta Navarro, J. C.; Ortega, P.; Garcia-Serrano, J.; Guemas, V.; Tourigny, E.; Cruz-Garcia, R.; Massonnet, F.; Doblas-Reyes, F. J. (2019): December 2016: Linking the lowest arctic sea-ice extent on record with the lowest European precipitation event on record. In: Explaining extreme events of 2017 - From a climate perspective. In: Bulletin of the American Meteorological Society 100.1. S.43-48.

an der Heiden, M., Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2020): Heat-Related Mortality – An analysis of the Impact of Heatwaves in Germany Between 1992 and 2017. In: Deutsches Ärzteblatt International. 117.37. S.603-609.

Barredo, J. I. (2009): Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. In: Natural Hazards and Earth Systems Sciences. 9.1., S.97-104.

Bastos, A.; Ciais, P.; Friedlingstein, P.; Sitch, S.; J. Pongratz, J.; Fan, L.; Wigneron, J.P.; Weber, U.; Reichstein, M.; Fu, Z.; Anthoni, P.; Arneeth, A.; Haverd, V.; Jain, A.K.; Joetzjer, E.; Knauer, J.; Lienert, S.; Loughran, T.; McGuire, P.C.; Tian, H.; Viovy, N.; Zaehle, S (2020): Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity. In: Sci Adv 6 (24).

BfG (2019): Das Niedrigwasser 2018. Niedrigwasserbroschüre. Verfügbar unter: https://www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/04_Buecher/niedrigwasser_2018_dokument.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 22.10.2021).

Bissolli, P. ; Deutschländer, T.; Imbery, F.; Haeseler, S.; Lefebvre, C.; Blahak, S.; Fleckenstein, R.; Breyer, J.; Rocek, M.; Kreienkamp, F.; Rösner, S.; Schreiber, K.-J. (2019): Hitzewelle Juli 2019 in Westeuropa – neuer nationaler Rekord in Deutschland. Bericht des Deutschen Wetterdiensts. Verfügbar unter: www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190801_hitzerekord_juli2019.pdf.

BMEL (2017): Extremwetterlagen in der Land- und Forstwirtschaft. Maßnahmen zur Prävention und Schadensregulierung.

Büntgen, U.; Urban, O.; Krusic, P. J.; Rybníček, M.; Kolář, T.; Kyncl, T.; Ač, A.; Koňasová, E.; Čáslavský, J.; Esper, J.; Wagner, S.; Saurer, M.; Tegel, W.; Dobrovolný, P.; Cherubini, P.; Reinig, F.; Trnka, M. (2021): Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. In: Nature Geoscience. 14. S.190-196.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S.; Kind, C.; Tempel, A.; Tucci, F.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H.; Hurth, F.; Othmer, F.; Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C.; (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau.

CEDIM (2018): Dürre & Hitzewelle Sommer 2018 (Deutschland). Report No. 1. Verfügbar unter: https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_Duerre_Hitzewelle_Deutschland_report.pdf (abgerufen am: 01.12.2021).

Covestro AG (2019): Geschäftsbericht 2018. Verfügbar unter: <https://bericht.covestro.com/geschaeftsbericht-2018/servicesseiten/downloads.html> (abgerufen am: 20.10.2021).

DWD (2003): Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. Abdruck aus Klimastatusbericht 2002, DWD Offenbach 2003.

DWD (2018a): Erste Bilanz des Deutschen Wetterdienstes zum Jahr 2018 in Deutschland. Pressemitteilung vom 20.12.2018. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181220_jahr2018_rekord_news.html (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2018b): 2018 wärmster Sommer im Norden und Osten Deutschlands. Deutscher Wetterdienst. Forschungsbericht der Abteilungen für Klimaüberwachung, Hydrometeorologie und Agrarmeteorologie, Deutscher Wetterdienst. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180906_waermstersommer_nordenosten2018.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2019a): Deutschlandwetter im Sommer 2019. Sonnenscheinreich und niederschlagsarm – neue Temperaturrekorde. Pressemitteilung vom 30.08.2019. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190830_deutschlandwetter_sommer2019_news.html (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2019b): Neuer Rekord der mittleren Junitemperatur für Deutschland und intensive Hitzewelle in Europa. Forschungsbericht der Abteilung Klimaüberwachung, Deutscher Wetterdienst. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190703_bericht_juni2019.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2019c): Rückblick auf das Jahr 2018 – das bisher wärmste Jahr in Deutschland. Forschungsbericht der Abteilung Klimaüberwachung, Deutscher Wetterdienst. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190102_waermstes_jahr_in_deutschland_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2019d): Ursachen und Folgen der Trockenheit in Deutschland und Europa ab Juni 2019. Forschungsbericht der Abteilungen Klimaüberwachung, Agrar- und Hydrometeorologie, Deutscher Wetterdienst. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/duerre/20190712_trockenheit_juni_juli_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2020a): 2019 global zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung in Deutschland im globalen Kontext. Forschungsbericht der Abteilung Klimaüberwachung, Deutscher Wetterdienst. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (abgerufen am: 10.06.2021).

DWD (2020b): DWD-Stationen Duisburg-Baerl und Tönisvorst jetzt Spitzenreiter mit 41,2 Grad Celsius. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20201217_annulierung_lingen_news.html (abgerufen am: 16.11.2021).

DWD (2021a): Unwetterklimatologie: Starkregen. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/unwetterklima/starkregen/starkregen.html> (abgerufen am: 11.06.2021).

DWD (2021b): Wetter- und Klimalexikon. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101094&lv3=624852> (abgerufen am: 11.06.2021).

FiW (2021): R2K-Klim+. Strategisches Entscheidungsunterstützungstool zur Anpassung an den Klimawandel auf regionaler und kommunaler Ebene im Rheineinzugsgebiet. <https://r2k-klim.net/> (abgerufen am: 20.10.2021).

García-Herrera, R.; Garrido-Perez, J. M.; Barriopedro, D.; Ordóñez, C.; Vicente-Serrano, S. M.; Nieto, R.; Gimeno, L.; Sori, R.; You, P. (2019): The European 2016/17 Drought. In: *Journal of Climate*. 32.11. S.3169-3187.

Hari, V.; Rakovec, O.; Markonis, Y.; Hanel, M.; Kumar, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 central european drought under global warming. In: *Scientific Reports* (2020) 10:12207.

Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2013): Orkantief ‚Xaver‘ - eine Folge des Klimawandels?. Verfügbar unter: https://www.hereon.de/innovation_transfer/communication_media/news/099294/index.php.de (abgerufen am 13.06.2021).

Hirschfeld, J.; Schulze, N.; Hock, A. (2021b): Priorisierung einzelner Schadens- und Kostendimensionen der Folgen des Klimawandels. Kurzstudie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland (noch unveröffentlicht).

Hufe, S. (2020): Klimawandel: Extreme Dürreperioden in Mitteleuropa werden voraussichtlich zunehmen. Verfügbar unter: <https://idw-online.de/de/news?&id=752300> (abgerufen am: 17.06.2021).

IPCC (2012). Summary for Policymakers. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland., 32 pp.

Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schauer, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. UBA Climate Change 26/2021. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf (abgerufen am 20.10.2021).

Kreienkamp, F.; Sjoukje Y. P.; Tradowsky, J. S.; Kew, S. F.; Lorenz, P.; Arrighi, J.; Belleflamme, A.; Bettmann, T.; Caluwaerts, S.; Chan, S. T.; Ciavarella, A.; De Cruz, L.; de Vries, H.; Demuth, N.; Ferrone, A.; Fischer, E. M.; Fowler, H. J.; Goergen, K.; Heinrich, D.; Henrichs, Y.; Lenderink, G.; Kaspar, F.; Nilson; Otto, F. E. L.; Ragone, F.; Seneviratne, S. I.; Singh, R. K.; Skålevåg, A.; Termonia, P.;

Thalheimer, L.; van Aalst, M.; Van den Bergh, J.; Van de Vyver, H.; Vannitsem, S.; van Oldenborgh, G. J.; Van Schaeybroeck, B.; Vautard, R.; Vonk, D.; Wanders, N.; (2021): Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf> (abgerufen am: 19.10.2021).

K+S Aktiengesellschaft (2019): Geschäftsbericht 2018. Verfügbar unter: <https://boersengefluester.de/wp-content/uploads/assets/annuals/2018/KSAG88.pdf> (abgerufen am: 20.10.2021).

Merz, B. (2014): Hochwasser: Ist Klimawandel schuld?. Verfügbar unter: <https://www.eskp.de/naturgefahren/hochwasser-ist-klimawandel-schuld-935303/> (abgerufen am: 10.06.2021).

Möhring, B.; Bitter, A.; Bub, G.; Dieter, M.; Dög, M.; Hanewinkel, M.; v. Hatzfeldt, N.; Köhler, J.; Ontrup, G.; Rosenberger, R.; Seintsch, B.; Thoma, F. (2021): Abschätzung der ökonomischen Schäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018-2020 in der Forstwirtschaft.

Mudelsee, M.; Börngen, M.; Tetzlaff, G.; Grünewald, U. (2003): No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. In: *Nature*. 425. S.166-169.

Petrow, T.; Merz, B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951 – 2002. In: *Journal of Hydrology*. 371. S.129-141.

Raupach, T. H.; Martius, O.; Allen, J. T.; Kunz, M.; Lasher-Trapp, S.; Mohr, S.; Rasmussen, K. L.; Trapp, R. J.; Zhang Q. (2021): The effects of climate change on hailstorms. In: *Nature Reviews Earth & Environment*. 2. S.213-226.

Sauer, I. J.; Reese, R.; Otto, C.; Geiger, T.; Willner, S. N.; Guillod, B. P.; Bresch, D. N.; Frieler, K. (2021): Climate signals in river flood damages emerge under sound regional disaggregation. In: *Nature Communications*. 12.2128.

Schaller, N.; Kay, A. L.; Lamb, R.; Massey, N. R.; van Oldenborgh, G. J.; Otto, F. E. L.; Sparrow, S. N.; Vautard, R.; You, P.; Ashpole, I.; Bowery, A.; Crooks, S. M.; Haustein, K.; Huntingford, C.; Ingram, W. J.; Jones, R. G.; Legg, T.; Miller, J.; Skeggs, J.; Wallom, D.; Weisheimer, A.; Wilson, S.; Stott, P. A.; Allen, M. R. (2016): Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts. In: *Nature Climate Change*. 2. S.627-634.

Seneviratne, S. I.; Corti, T.; Davin, E. L.; Hirschi, M.; Jaeger, E. B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling, A. J. (2010): Investing soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. In: *Earth Science Reviews*. 99. S.125-161.

Stuttgarter Nachrichten (2019): Wälder in Deutschland - Waldschäden haben sich dramatisch verschlimmert. Verfügbar unter: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.waelder-in-deutschland-waldschaeden-haben-sich-drastisch-verschlimmert.6269fedd-85ce-4c4e-9598-78bc7ff9203b.html> (abgerufen am: 10.06.2021).

Tate, E. L.; Gustard, A. (2000): Drought definition: a hydrological perspective. In *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 23-48). Springer, Dordrecht.

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M.; Ibens, D. (2022a): Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019. Eine ex-post-Analyse. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“.

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M. (2022b): Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021 in Deutschland. Eine ex-post-Analyse. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“.

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M. (2022c): Schadenswirkungen von Überschwemmungen und Sturzfluten sowie Hitze und Dürre. Ein Vergleich der Extremereignistypen. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“.

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Sandhövel, M. (2022d): Übersicht vergangener Extremwetter-schäden in Deutschland. Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“.

UBA (2016): Erläuterungen zu den Klimawirkungsketten. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten_umweltbundesamt_2016.pdf (abgerufen am: 16.06.2021).

UBA (2020): Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel – Abschlussbericht. In: *Climate Change* 43/2020.

UFZ (2019): Entwicklung der Dürre 2018. Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=44429> (abgerufen am: 11.06.2021).

UFZ (2021a): Dürremonitor Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937#:~:text=das%20pflanzenverf%C3%BCgbare%20Bodenwasser%3F-,Pflanzenverf%C3%BCgbares%20Wasser,k%C3%B6nnen%20Wasser%20unterschiedlich%20gut%20speichern.> (abgerufen am: 10.06.2021).

UFZ (2021b): Jährliche Dürrestärken in Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.ufz.de/index.php?de=47252> (abgerufen am: 18.06.2021).

van Oldenborgh, G. J.; Otto, F. E. L.; Haustein, K.; Cullen, H. (2015): Climate change increases the probability of heavy rains like those of storm Desmond in the UK – an event attribution study in near-real time. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 12. S.13197-13216.

van Oldenborgh, G. J.; Philip, S.; Aalbers, E.; Vautard, R.; Otto, F.; Haustein, K.; Habets, F.; Singh, R.; Cullen, H. (2016): Rapid attribution of the May/June 2016 flood-inducing precipitation in France and Germany to climate change”. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*.

Vautard, R.; van Aalst, M.; Boucher, O.; Drouin, A.; Haustein, K.; Kreienkamp, F.; van Oldenborgh, G. J.; Otto, F. E. L.; Ribes, A.; Robin, Y.; Schneider, M.; Soubeyroux, J.- M.; Stott, P.; Seneviratne, S. I.; Vogel, M. M.; Wehner, M. (2020). Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094077.

Vicedo-Cabrera, A. M.; Scovronick, N.; Sera, F.; Royé, D.; Schneider, R.; Tobias, A.; Astrom, C.; Guo, Y.; Honda, Y.; Hondula, D. M.; Abrutzky, R.; Tong, S.; de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M.; Nascimento Saldiva, P. H.; Lavigne, E.; Matus Correa, P.; Valdes Ortega, N.; Kann, H.; Osorio, S.; Kyselý, J.; Urban, A.; Orru, H.; Indermitte, E.; Jaakkola, J. J. K.; Rytí, N.; Pascal, M.; Schneider, A.;

Katsouyanni, K.; Samoli, E.; Mayvaneh, F.; Entezari, A.; Goodman, P.; Zeka, A.; Michelozzi, P.; de' Donato, F.; Hashizume, M.; Alahmad, B.; Hurtado Diaz, M.; De La Cruz Valencia, C.; Overcenco, A.; Houthuijs, A.; Ameling, C.; Rao, S.; Di Ruscio, F.; Carrasco-Escobar, G.; Seposo, X.; Silva, S.; Madsureira, J.; Holobaca, I. H.; Fratianni, S.; Acquaotta, F.; Kim, H.; Lee, W.; Iniguez, C.; Forsberg, B.; Ragettli, M. S.; Guo, Y. L. L.; Chen, B. Y.; Li, S.; Armstrong, B.; Aleman, A.; Zanobetti, A.; Schwartz, J.; Dang, T. N.; Dung, D. V.; Gillett, N.; Haines, A.; Mengel, M.; Huber, V.; Gasparri, A. (2021): The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. In: *Nature Climate Change*. 11. S.492-500.

Vittal, H.; Rakovec, O.; Markonis, Y.; Hanel, M.; Kumar, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. In: *Scientific Reports*. 10. 12207.

Wollesen G., Oellermann, R.; van Leerzem, S.; Müller, J.; Kayatz, B.; Kowalewski, E. (2021): Nachhaltigkeitsrisiken für die deutsche Landwirtschaft.

WWA (2018a): Hurricane Florence, September 2018. Veröffentlicht am: 13.09.2018. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/hurricane-florence-september-2018/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2018b): Stormy January over western Europe, 2018. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 16.03.2018. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/the-stormy-month-of-january-2018-over-western-europe/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2019a): Human contribution to the record-breaking July 2019 heat-wave in Western Europe. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 02.08.2019. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/human-contribution-to-the-record-breaking-july-2019-heat-wave-in-western-europe/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2019b): Human contribution to the record-breaking June 2019 heat wave in France. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 02.07.2019. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/human-contribution-to-record-breaking-june-2019-heatwave-in-france/> (abgerufen am: 16.06.2021).

WWA (2019c): Rapid attribution of the extreme rainfall in Texas from Tropical Storm Imelda. Forschungsbericht. Veröffentlicht am: 27.09.2019. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/rapid-attribution-of-the-extreme-rainfall-in-texas-from-tropical-storm-imelda/> (abgerufen am: 16.06.2021).

Yiou, P.; Cattiaux, J.; Faranda, D.; Kadyrov, N. (2020): Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018. In: *Bulletin of the American Meteorological Society*. 101.1. S.35-40.

Zeder, J.; Fischer, E.M. (2020): Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe. In: *Weather and Climate Extremes* 29 (2020) 100266.

Impressum

Auswahlprozess zur Detailuntersuchung eines klimawandelbezogenen Extremereignisses Methodisches Konzept und Anwendung

Erstellt im Auftrag von

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
Scharnhorststraße 34-37
10115 Berlin

Bearbeitet von

Prognos AG
Werdener Straße 4
40227 Düsseldorf
Telefon: +49 211 913 16-110
Fax: +49 211 913 16-141
E-Mail: info@prognos.com
www.prognos.com
twitter.com/Prognos_AG

Autoren

Dr. Jan Trenczek (Projektleitung)
Oliver Lühr
Lukas Eiserbeck
Myrna Sandhövel
Dorothee Ibens

Kontakt

Dr. Jan Trenczek (Projektleitung)
Telefon: +49 162 988 2483
E-Mail: jan.trenczek@prognos.com

Stand: März 2022

Copyright: 2022, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der Prognos AG. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).