

Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“

---

# Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019

---

Eine ex-post-Analyse



Quelle: iStock - ollo



Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“

---

# Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019

---

Eine ex-post-Analyse

**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:**

23. März 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](mailto: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](mailto: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](mailto:flaute@gws-os.com)

---

## Danksagung

---

Das Projektteam möchte sich insbesondere bei den folgenden Personen für zahlreiche Anmerkungen und Kommentare zu den Projektergebnissen und -methoden, sowie die Bereitstellung von Informationen und Datengrundlagen bedanken:

Nina Alsen	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Referat T III 1
Dr. Olaf Burghoff*	Leitung Statistik und Naturgefahrenmodellierung des GDV Berlin
Svenja Dahnke	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Referat T III 1
Horst Gömann*	Leitung Fachbereich Landbau und Nachwachsende Rohstoffe, Landwirtschaftskammer NRW
Dr. Markus Groth*	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Climate Service Center Germany (GERICS) des Helmholtz-Zentrum hereon GmbH
Clemens Haße	Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung, Umweltbundesamt
Sophie Heimes	Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH
Prof. Dr. Dea Niebuhr*	Professorin für „Health Technology Assessment und Gesundheitssystemdesign“, Hochschule Fulda
Florian Raecke	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Referat LC1
Prof. Dr. Annegret Thieken*	Arbeitsgruppenleitung Geographie und Naturrisikoforschung am Institut für Umweltwissenschaften und Geographie Potsdam
Dr. Leonie Wenz*	Arbeitsgruppenleiterin „Data-based analysis of climate decisions“ am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Besonderer Dank gilt hierbei den Reviewer:innen des Projektes (\*).

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Danksagung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
<b>1 Einleitung und Hintergründe</b>	<b>9</b>
<b>2 Auswahl des Fallbeispiels für eine Ex-Post-Betrachtung von Klimaschäden</b>	<b>10</b>
2.1 Auswahl und Priorisierung zu untersuchender Extremereignisse	10
2.2 Auswahl des Fallbeispiels für eine detaillierte Auswertung	12
<b>3 Auswirkungen der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019</b>	<b>15</b>
3.1 Intensität der Hitzewellen 2018/2019	15
3.2 Auftreten von Dürreextremen 2018/2019	16
<b>4 Schäden und Schadenskosten der Hitze- und Dürreextreme 2018/ 2019</b>	<b>19</b>
4.1 Schäden in der Landwirtschaft durch Ernteverluste	20
4.1.1 Ertragsverluste von Winterweizen durch Hitze und Trockenheit	23
4.1.2 Ertragsverluste von Silomais durch Hitze und Trockenheit	24
4.1.3 Ertragsverluste weiterer Feldfrüchte durch Hitze und Trockenheit	25
4.2 Schäden in der Forstwirtschaft durch Bestandsverluste	26
4.2.1 Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz durch Hitze und Trockenheit	28
4.2.2 Beeinträchtigung der Ökosystemleistungen des Waldes - Kosten durch Verluste in der Klimaschutzleistung	34
4.3 Hitzebedingte Minderung der Produktivität	38
4.4 Quantifizierung hitzebedingter Todesfälle	45
<b>5 Zusammenführung der Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf</b>	<b>47</b>

5.1	Gesamtübersicht der Schäden	47
5.2	Weiterer Forschungsbedarf	50
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>52</b>
	<b>Anhang 61</b>	
	Impressum	71

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1:	Erträge, Erntemengen, Verkaufspreise und Erlöse ausgewählter Feldfrüchte bis 2019	22
Tabelle 2:	Zusammensetzung der Schadenssumme der Ertragsverluste von Winterweizen	24
Tabelle 3:	Zusammensetzung der Schadenssumme der Ertragsverluste von Silomais	25
Tabelle 4:	Zusammensetzung der Schadenssumme der Ertragsverluste von weiteren Feldfrüchten	25
Tabelle 5:	Schadenskomponenten in der Forstwirtschaft	27
Tabelle 6:	Schadholzeinschlag 2018 / 2019	28
Tabelle 7:	Abschätzung der kalamitätsbedingten Mindererlöse und Mehrkosten für das aufgearbeitete Schadholz	29
Tabelle 8:	Verluste durch Hiebsunreife	30
Tabelle 9:	Mindererlöse durch abzuschreibendes Schadholz	31
Tabelle 10:	Abschätzung der Mehrkosten bei Wiederbewaldung der Kalamitätsfläche	31
Tabelle 11:	Bewerteter Zuwachsverlust 2018-2019	33
Tabelle 12:	Zusammensetzung der Schadenssumme in der Forstwirtschaft (exkl. Klimaschutzdienstl.)	34
Tabelle 13:	Baumartenspezifische Substitutionsfaktoren	35

Tabelle 14:	Berechnung des Gesamtverlusts des Erholungswertes der Wälder 2018 und 2019	36
Tabelle 15:	Verteilung der Schäden durch hitzebedingte Produktivitätseinbußen	40
Tabelle 16:	Berechnung indirekter Effekte der hitzebedingten Produktivitätseinbußen	41
Tabelle 17:	Zusammenstellung der Gesamtschäden durch hitzebedingte Produktivitätsausfälle	42
Tabelle 18:	Exemplarische Berechnung der Morbiditätskosten durch Hitze in den Jahre 2018 und 2019	44
Tabelle 19:	Zusammenstellung aller betrachteten Kosten durch Klimawandelfolgen der Hitze- und Dürreextreme 2018 und 2019	48

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1:	Übersicht über die Zusammensetzung der gesamten erfassten Schäden der Dürre- und Hitzesommer 2018 und 2019 (Mrd. €)	8
Abbildung 2:	Vorgehen zur Auswahl des zu untersuchenden klimawandelbedingten Schadensereignisses	11
Abbildung 3:	Entwicklung der Dürre im Jahr 2018	16
Abbildung 4:	Beispielhafte Bildung von Schadensindikatoren	19
Abbildung 5:	Direkte Schäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 nach den DAS-Handlungsfeldern (Mrd. €)	47
Abbildung 6:	Übersicht über die Zusammensetzung der Gesamtschäden der Hitze- und Dürresommer 2018 und 2019 (Mrd. €)	49
Abbildung 7:	Vorgehen zur Auswahl des zu untersuchenden klimawandelbedingten Schadensereignisses	62

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

BfG	Bundesamt für Gewässerkunde
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BWI	Bundeswaldinventur
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
Efm	Erntefestmeter
EM-DAT	International Disaster Database
FDA	Forensic Disaster Analysis Group
FIW	Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
KWRA	Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland
LWK	Landwirtschaftskammer
QALY	Quality-adjusted Value of a Life Year
SvB	Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VOLY	Value of a Statistical Life
VSL	Value of a Life Year
WWA	World Weather Attribution



---

## Zusammenfassung

---

Die vorliegende Studie identifiziert basierend auf bestehender wissenschaftlicher Literatur, der Klimawirkungs- und Risikoanalyse Deutschlands sowie den Monitoringberichten zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel **spezifische Schadensindikatoren zur Analyse und Quantifizierung der volkswirtschaftlichen Kosten der Hitze- und Dürresommer 2018 sowie 2019**. Sie zeigt auf, wie Kosten durch Klimawandelfolgen kategorisiert werden können, welche volkswirtschaftlichen Kosten theoretisch quantifizier- und monetarisierbar sind, welche in ihrem Schadenausmaß volkswirtschaftlich relevant sind und welche sich dabei auch ursächlich auf den Klimawandel zurückführen lassen. Sie schlägt dabei ein Verfahren vor, mit dem eine Priorisierung der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) sowie der diesen zugeordneten Indikatoren für das spezifische Schadensereignis möglich ist.

Im Ergebnis zeigt sich, dass volkswirtschaftlich relevante und gleichzeitig ermittelbare Schäden durch Hitze und Dürre insbesondere in den Handlungsfeldern **Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft sowie Industrie und Gewerbe** auftreten. Die Studie quantifiziert anhand der identifizierten Indikatoren

- Ertragsverluste von Winterweizen durch Hitze und Trockenheit
- Ertragsverluste von Silomais durch Hitze und Trockenheit
- Ertragsverluste weiterer Feldfrüchte durch Hitze und Trockenheit
- Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz durch Hitze und Trockenheit
- Beeinträchtigung der Ökosystemleistungen des moWaldes - Kosten durch Verluste in der Klimaschutzleistung
- Hitzebedingte Minderung der Arbeitsproduktivität

die volkswirtschaftlichen Gesamtschäden, die durch die vom Klimawandel belegbar wahrscheinlicher gewordenen Hitze- und Dürresommer 2018 und 2019 aufkamen. **Die Studie bezieht hierbei auch die indirekten (Folge)-Schäden mit ein, die bspw. durch den Ausfall oder eine Verteuerung von Vorleistungen in weiteren Bereichen auftreten.** Da sich eine exakte Quantifizierung dieser indirekten Effekte schwierig gestaltet, wird für diese eine Bandbreite, die das jeweilige 90%-Konfidenzintervall der Schadenshöhe angibt, wiedergegeben.

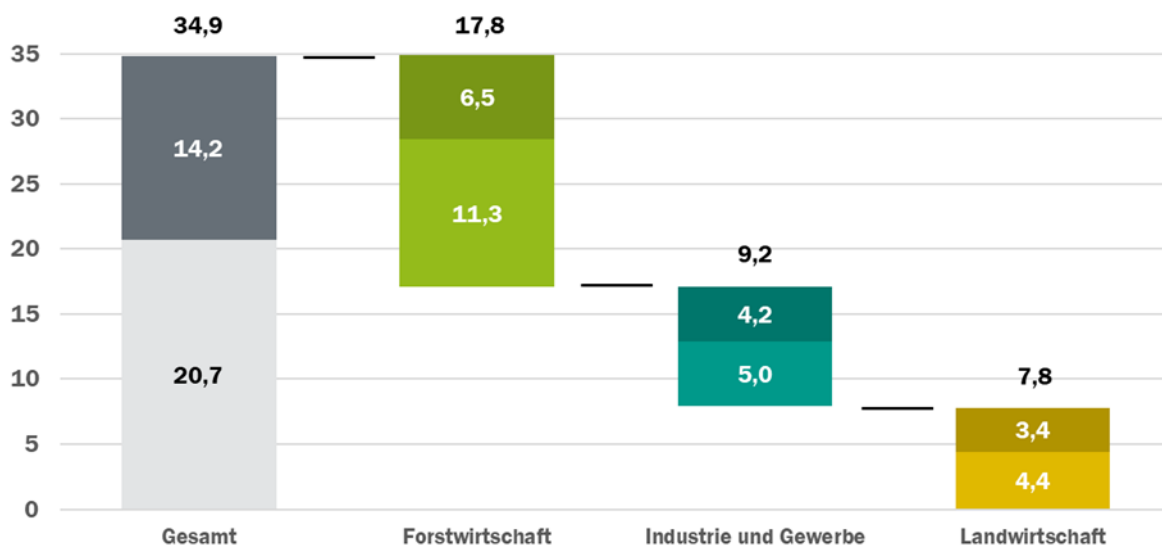
Insgesamt entstanden in der Landwirtschaft zwischen 7,1 und 8,2 Mrd. € Schäden (Median: 7,8 Mrd. €), in der Wald- und Forstwirtschaft zwischen 16,4 und 18,5 Mrd. € Schäden (Median: 17,8 Mrd. €) und in Industrie und Gewerbe 8,5 bis 10,3 Mrd. € Schäden (Median: 9,2 Mrd. €), was zu einer **Gesamtschadenshöhe zwischen 32 und 37 Mrd. €** führt (Median: 34,9 Mrd. €, siehe Abbildung 1).<sup>1</sup> Zu den Schäden und Kosten hat u.a. eine z.T. nicht standortangepasste Forstwirtschaft beigetragen. Die hier berechneten Gesamtschäden der Hitze- und Dürresommer 2018 und 2019, davon 20,7 Mrd. € direkte und 14,2 Mrd. € indirekte Schäden (vgl. Abbildung 1), liegen damit rund 5 Mrd. € unter den Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021. Letztere gelten ersten Untersuchungen zufolge mit insgesamt 40,5 Mrd. € Schäden (davon 33,4 Mrd. € direkte und 7,1 Mrd. € indirekte Schäden) als schadensträchtigstes Extremereignis der deutschen Geschichte (Trenczek et al., 2022a). Auch im Vergleich zu den in Trenczek et al.

<sup>1</sup> Es wird darauf hingewiesen, dass sich die berücksichtigten Schadensindikatoren und damit die Berechnungsgrundlage beider Studien teilweise unterscheiden. So werden in der vorliegenden Untersuchung bspw. keine Schäden durch Überschwemmungsereignisse oder Stürme berücksichtigt. Dafür wurden erhebliche Kosten durch eine hitzebedingte Minderung der Arbeitsproduktivität sowie Schäden in der Wald- und Forstwirtschaft berücksichtigt.

(2022c) bilanzierten durchschnittlichen Schäden durch Extremwetterereignisse seit 2000 von rund 5 Mrd. pro Jahr wird deutlich: Die Hitze- und Dürresommer 2018 und 2019 waren extrem.

Darüber hinaus wurde die **Anzahl der hitzebedingten Todesfälle** für die beiden Jahre 2018 und 2019 basierend auf einem statistischen Verfahren zur Ermittlung der Übersterblichkeit an besonders heißen Tagen ermittelt. Im Ergebnis zeigt sich, dass im Jahr 2018 mindestens 5.350 und im Jahr 2019 mindestens 2.150 zusätzliche Todesfälle auf die Hitze zurückführen lassen, sodass neben den entstandenen volkswirtschaftlichen Schäden auch insgesamt **mindestens 7.500 Menschen ihr Leben verloren.**<sup>2</sup>

**Abbildung 1: Übersicht über die Zusammensetzung der gesamten erfassten Schäden der Dürre- und Hitzesommer 2018 und 2019 (Mrd. €)**



Eigene Darstellung und Berechnung. Der untere (hell eingefärbte) Wert gibt die Höhe der direkten Schäden an, der obere stellt den Median der ermittelten Spannweiten der indirekten Effekte dar.

Eine **Quantifizierung bzw. Monetarisierung der ermittelten hitzebedingten Todesfälle wird nicht vorgenommen.** Einerseits wirft die Betrachtung extremwetterbedingter Todesfälle die moralische Frage nach der unterschiedlichen Bewertung menschlichen Lebens auf. Andererseits bestehen zahlreiche Ansätze für eine solche Bewertung, deren Berechnungsgrundlagen zum Teil deutlich voneinander abweichen und so je nach Berechnungsmethode stark unterschiedliche Zahlen produzieren (Chiabai et al., 2018), die dabei jedoch in anderen Untersuchungen die weiteren Schadensdimensionen im Vergleich deutlich in den Schatten stellen (Hsiang et al., 2017).

<sup>2</sup> Eine Untersuchung von Winklmayr et al. (2022), die nach Fertigstellung der vorliegenden Studie veröffentlicht wurde und daher nicht in den Abbildungen der Studie berücksichtigt sind, beziffern die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle der Jahre 2018-2021 auf insgesamt 21.000, wovon 8700 (2018), 6900 (2019), 3700 (2020) und 1700 (2021).

# 1 Einleitung und Hintergründe

---

Der Klimawandel stellt Deutschland vor enorme Herausforderungen in allen Lebensbereichen: Er schränkt beispielsweise die Qualität und Erntemengen landwirtschaftlicher Produkte ein, sorgt für Verzögerungen in Lieferketten, für Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen und führt zu gesundheitlichen Problemen sowie zu vorzeitigen Todesfällen. Mit dem Fortschreiten des Klimawandels nehmen auch die Klimawandelfolgeschäden bzw. die mit einem Wiederaufbau und der Anpassung an den Klimawandel verbundenen Kosten weiter zu. Die Politik der Bundesregierung zur Minderung der Treibhausgasemissionen sowie zur Anpassung an den Klimawandel dient dazu, Schäden und Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland zu begrenzen.

Ziel des Forschungsprojekts „**Kosten durch Klimawandelfolgen für Deutschland**“, in dessen Kontext die vorliegende Untersuchung erscheint, ist die detaillierte Analyse und Quantifizierung klimawandelbezogener Schäden in Deutschland. Die vorliegende Studie verfolgt **zwei Ziele**: Zum einen soll ein fundiertes Gesamtbild über die klimawandelbezogenen Folgeschäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 insgesamt sowie für ausgewählte Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) geliefert werden. Zum anderen liefert die Analyse vergangener Schäden wichtige Informationen für eine Abschätzung bzw. Modellierung zukünftig zu erwartender Schäden und volkswirtschaftlicher Kosten durch den Klimawandel.

Die Wirkungsbeziehungen des Klimawandels sind vielseitig und hochkomplex. Um ökonomische Größenordnungen verschiedener Schäden greifbar zu machen, ist es notwendig, Zusammenhänge im Rahmen von spezifischen Bewertungsmodellen stark zu vereinfachen. Eine vollständige Betrachtung sämtlicher Wirkungs- bzw. Schadenskanäle ist nicht möglich. Stattdessen muss die Betrachtung entlang ausgewählter, wichtiger bzw. für eine Quantifizierung vielversprechender Indikatoren der DAS und der Klimawirkungs- und Risikoanalyse Deutschlands 2021 (KWRA) erfolgen. Der Höhe des Gesamtschadens kann sich anschließend durch eine Aggregation der Schadenskomponenten genähert werden. Eine solche Untersuchung stellt dabei (auch aufgrund bestehender Unsicherheiten bzw. Spannbreiten möglicher Kostenbereiche) eine grobe Schätzung der Klimawandelschäden für Deutschland dar. Auch handelt es sich hierbei lediglich um einen Teil der aufgetretenen Schäden, da manche Schäden grundsätzlich nicht monetarisierbar sind, andere Schäden zwar theoretisch monetarisierbar wären, derzeit aber keine geeigneten Datengrundlagen oder Methoden zu ihrer Abschätzung vorliegen. Daher dürfte **die Schadenssumme in Wirklichkeit noch deutlich höher liegen**. Trotz dieser Teilbetrachtung trägt die Studie dazu bei, ein besseres Gesamtbild der Klimaschäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 zu zeichnen und kommunizierbar zu machen.

---

## 2 Auswahl des Fallbeispiels für eine Ex-Post-Betrachtung von Klimaschäden

---

### 2.1 Auswahl und Priorisierung zu untersuchender Extremereignisse

Verschiedene Extremwetterereignisse verursachen in Deutschland regelmäßig Schadensereignisse in Milliardenhöhe. Zu den Extremereignistypen gehören insbesondere

- Hagel
- Überschwemmung (Hochwasser)
- Sturm
- Hitzewellen (Hitzeperioden)
- Dürre (Trockenperioden)

Die verschiedenen Extremereignisse, unterscheiden sich zum einen in ihrer räumlichen Ausprägung sowie den durch sie betroffenen Handlungsfeldern der DAS und den insgesamt auftretenden Schäden deutlich. Zum anderen gibt es Unterschiede hinsichtlich der Evidenz für einen Einfluss des Klimawandels auf das Auftreten der Extremereignisse. Im Folgenden soll sich daher auf die Betrachtung eines einzelnen Extremereignisses fokussiert und dieses in seinen relevantesten Schadensdimensionen exploriert und quantifiziert werden. Hierbei wird auf einen mehrstufigen **Analysepfad** zurückgegriffen, der für jeden Extremwettertyp, der volkswirtschaftliche Kosten bzw. Schäden verursacht, Anwendung findet. Der Analysepfad (siehe Abbildung 2) besteht aus sechs Leitfragen, die sich drei Prüfungskriterien zuordnen lassen:

- **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?

Das **erste Prüfungskriterium** umfasst die **Ursächlichkeit** des Schadensereignisses und die Leitfrage<sup>3</sup>:

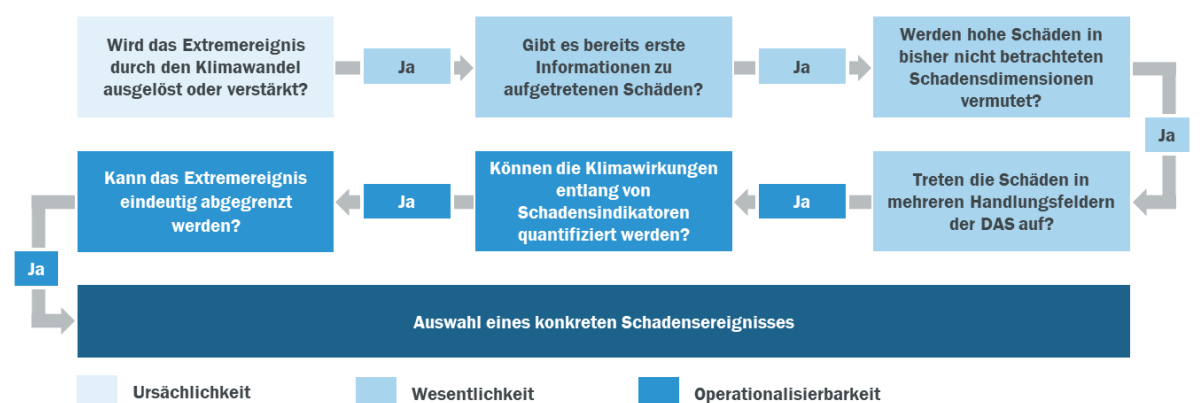
- Wird das Extremereignis durch den Klimawandel ausgelöst oder verstärkt?

Es 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. 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- Projekts (WWA), des Environmental Change Institute (ECI), der Universität Oxford, aber auch weiterer, auf eine ex-post-Untersuchung von Klimaereignissen

<sup>3</sup> Detaillierte Ausführungen zu den Leitfragen finden sich im Anhang.

spezialisierten Einrichtungen, bspw. das Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM) des Karlsruhe Institute of Technology (KIT) finden Eingang in die Untersuchung.

Abbildung 2: Vorgehen zur Auswahl des zu untersuchenden klimawandelbedingten Schadensereignisses



Eigene Darstellung

Das **zweite Prüfungskriterium** umfasst die **Wesentlichkeit** des Schadensereignisses und wird durch drei Leitfragen abgebildet:

- Gibt es bereits erste, verstreute Informationen zu aufgetretenen Schäden?
- Werden hohe Schäden in bisher nicht erfassten Schadensdimensionen vermutet?
- Treten die Schäden in mehreren Handlungsfeldern der DAS auf?

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.

Das **dritte Prüfungskriterium** umfasst die **Operationalisierbarkeit** des Schadensereignisses und wird durch zwei Leitfragen abgebildet:

- Können die Klimawirkungen entlang von Schadensindikatoren belastbar quantifiziert werden?
- Kann das Extremereignis räumlich, zeitlich oder auf Basis von Klimaparametern eindeutig abgegrenzt werden?

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.

## 2.2 Auswahl des Fallbeispiels für eine detaillierte Auswertung

Eine detaillierte Erörterung des Analysepfades für die Ereignistypen Hagel, Starkregen und Hochwasser, Sturm, Hitzewellen sowie Dürre (Trockenperiode) finden sich im Anhang. In diesem Kapitel werden die Kernergebnisse knapp vorgestellt.

Für das Extremereignis **Hagel** kann auf Grundlage der aktuellen Forschung keine klare Aussage zu einem Zusammenhang zwischen Klimawandel und dem Auftreten vergangener extremer Hagelereignisse in Deutschland getroffen werden. Zwar wird ein Zusammenhang zwischen häufigeren und intensiveren Hagelereignissen und dem Klimawandel erwartet. Auf Basis der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Daten zu Hagelmengen sowie Analysemethoden lassen sich (noch) keine Attributionsstudien zu Hagelereignissen durchführen (persönliche Auskunft, Tobias Fuchs, Mai 2021). Die Untersuchung der Ursächlichkeit ergibt damit, dass sich das Extremereignis als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses **nicht eignet**.

Für die Extremereignisse Überschwemmung bzw. Stürme kann von einer zukünftigen Zunahme der Intensität und Häufigkeit der Ereignisse ausgegangen werden (IPCC, 2018). Gleichwohl bestätigten Untersuchungen zu den Stürmen Frederike und Eleonore im Jahr 2018 keinen Zusammenhang mit dem Klimawandel (WWA, 2018b). Hinsichtlich des Prinzips der Ursächlichkeit sind **Sturmextremereignisse** als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses **nicht uneingeschränkt geeignet**.

Grundsätzlich kann zwischen verschiedenen Überschwemmungstypen (Flusshochwasser, Sturmfluten sowie Überschwemmungen durch Starkregen und Sturzfluten) unterschieden werden. Die Frage der Attribution ist hierbei fallspezifisch zu erörtern. Insgesamt ist die Evidenz hinsichtlich eines kausalen Zusammenhangs von Klimawandel und vergangener Überflutungsextremereignisse in Deutschland nicht eindeutig. 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 Auftrittswahrscheinlichkeit 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 noch kritisch diskutiert wird.

Darüber hinaus deuten die ersten kommunizierten Schäden stark darauf hin, dass das Ereignis ebenfalls hinsichtlich der **Wesentlichkeit** sowie der **Operationalisierbarkeit** für eine vertiefte Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses **prinzipiell geeignet** ist. Allerdings erweitert sich die Informationslage zu direkten und monetären Schäden (bspw. an Gebäuden) aktuell noch erheblich. Eine umfassende Erfassung einzelner Schäden liegt noch nicht öffentlich einsehbar vor. Aus diesem Grund sind derzeit nur ein Ausweis der vorläufigen Gesamtschäden sowie erste annahmenbasierte Berechnungen zur detaillierten Verteilung der Schadenskomponenten möglich. Eine Detailuntersuchung zu diesem Ereignis, die auf Basis einer top-down-Abschätzung und Verteilung des Schadensmaßes agiert, lieferten zwischenzeitlich Trenczek et al. (2022a) als Teil des Vorhabens „Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland“.

Für die Extremereignisse **Hitze** und **Dürre** findet die Attributionsforschung eine **deutliche Evidenz** für die klimawandelbedingte Steigerung der Eintrittswahrscheinlichkeit sowie der Intensität (Büntgen et al., 2021; WWA, 2019a; WWA, 2019b). Sichtbar wurde die Häufigkeit von Hitzewellen insbesondere in den vergangenen Jahren 2018, 2019 sowie 2020. Eine starke Evidenz, dass die europäischen Dürren in den vergangenen Jahren aufgrund des Klimawandels wahrscheinlicher wurden, liegt ebenfalls vor (Garcia-Herrera et al., 2019; Acosta-Navarro et al., 2019; WWA, 2019a).

Eine methodische Schwierigkeit in der Untersuchung von Hitzewellen und Dürren liegt in der nicht immer eindeutigen Abgrenzbarkeit der Extremereignisse. So ist bspw. eine Hitzewelle aus meteorologischer Sicht eindeutig definiert (siehe Anhang). Eine sehr eng gefasste Betrachtung einzelner Extremereignisse lässt jedoch die Interdependenzen im Klimasystem außer Acht. Studien zeigen bspw., dass trockene Böden aufgrund von Rückkopplungen zwischen Land und Atmosphäre zusätzlich den Temperaturanstieg auf regionaler Ebene verstärken können (Seneviratne et al., 2010). Ein **Rückkopplungseffekt** zwischen Hitzewellen und Dürren war bspw. auch in den Jahren 2018 und 2019 zu beobachten: Durch erste Hitzewellen im Juni und die darauffolgende Austrocknung der Böden, Pflanzen und Wälder wurde die jeweils zweite Hitzewelle im Juli verstärkt (Vautard et al., 2020).

Aufgrund der engen **Interdependenzen** beider Ereignisse untereinander bietet sich **eine gemeinsame Betrachtung von Hitze und Dürre** an, um so konsolidiert belastbarere Ergebnisse zu erhalten. Es bietet sich darüber hinaus an, den Zeitraum, insbesondere bei der Betrachtung von Dürren, auch **über eine Jahresgrenze hinaus** zu definieren. Dürren bauen sich über einen langanhaltenden Zeitraum auf, da Trockenheit in den tieferen Bodenschichten durchaus lange Zeiten überdauert und folgende Trockenperioden somit verstärkt werden. So wurde bspw. 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. 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). Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass eine gemeinsame Betrachtung von Hitze und Dürre in den Jahren 2018 und 2019 als **Hitze- und Dürreextreme 2018/2019** hinsichtlich des Prinzips der Ursächlichkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses **geeignet** sind.

Hinsichtlich der **Wesentlichkeit** der Schäden und Schadenskosten der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 zeigt sich, dass 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 Mrd. Euro. Darüber hinaus deuten wissenschaftliche Untersuchungen auf erhebliche indirekte Kosten durch Multiplikatoreffekte hin (Horridge et al., 2003; Martin-Ortega et al., 2012; Diersen et al., 2002). 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 den Borkenkäfer. Möhring et al. (2021) schätzen die ökonomischen Gesamtschäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft auf fast 13 Mrd. Euro. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Bewertung von Waldschäden durch den Verlust von Ökosystemdienstleistungen sind diese hier jedoch nicht mitberücksichtigt. Keine Schadensinformationen liegen dabei für Verluste durch Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit durch Hitze vor. Vor dem Hintergrund, dass die hohe Zahl an Hitzetagen mit Temperaturen von über 30 Grad Millionen von erwerbstätigen Menschen beeinträchtigt hat, ist hier von hohen, bisher nicht erfassten, gesellschaftlichen Kosten auszugehen.

Hinsichtlich der **Operationalisierbarkeit** insgesamt ist festzuhalten, dass eine Untersuchung der Schäden entlang einzelner Schadensindikatoren prinzipiell durchführbar ist. So lassen sich Schäden durch Ertragsverluste in der Landwirtschaft, Einschränkungen in der Leistungsfähigkeit durch Hitze oder Schäden in der betrieblichen Forstwirtschaft mit Hilfe von Bewertungsmodellen zumindest grob bestimmen. In anderen Fällen, bspw. der Bewertung von Ökosystemdienstleistungen des Waldes, existieren jedoch Herausforderungen hinsichtlich der Monetarisierung. Darüber hinaus führen moralisch-ethische Erwägungen, bspw. bei Hitzetoten, zu einer bewussten Nicht-Monetarisierung. Insgesamt sind die **Hitze- und Dürreextreme 2018/2019** jedoch hinsichtlich der Prinzipien Wesentlichkeit und Operationalisierbarkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses **geeignet**.

**Als Ergebnis** der Einschätzung der Extremereignisse entlang des Analysepfades bieten sich die Sommerextreme Dürre und Hitzewelle in den Jahren 2018/2019 als Gegenstand einer Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses an und werden folglich in dieser Studie vertieft untersucht. Es ist wissenschaftlich untermauert, dass der Klimawandel die Wahrscheinlichkeit der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 deutlich erhöht hat. Darüber hinaus weisen beide Ereignisse ein vermutlich 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 einige DAS-Handlungsfelder und liegen bisher nur stark fragmentiert vor.



---

## 3 Auswirkungen der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019

---

Die Sommer 2018 und 2019 waren für Deutschland meteorologisch extrem. In diesem Kapitel wird ein knapper Überblick über die Entwicklung der Sommerextreme durch Hitze und Trockenheit, sowie deren unmittelbare Folgen der Dürren, Niedrigwasserstände und allgemeiner Hitzebelastung in den beiden Jahren gegeben. Dabei wird insbesondere im Fall der Dürren deutlich, wie stark die Extreme beider Jahre zusammenhängen.

### 3.1 Intensität der Hitzewellen 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, 2019e). 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.

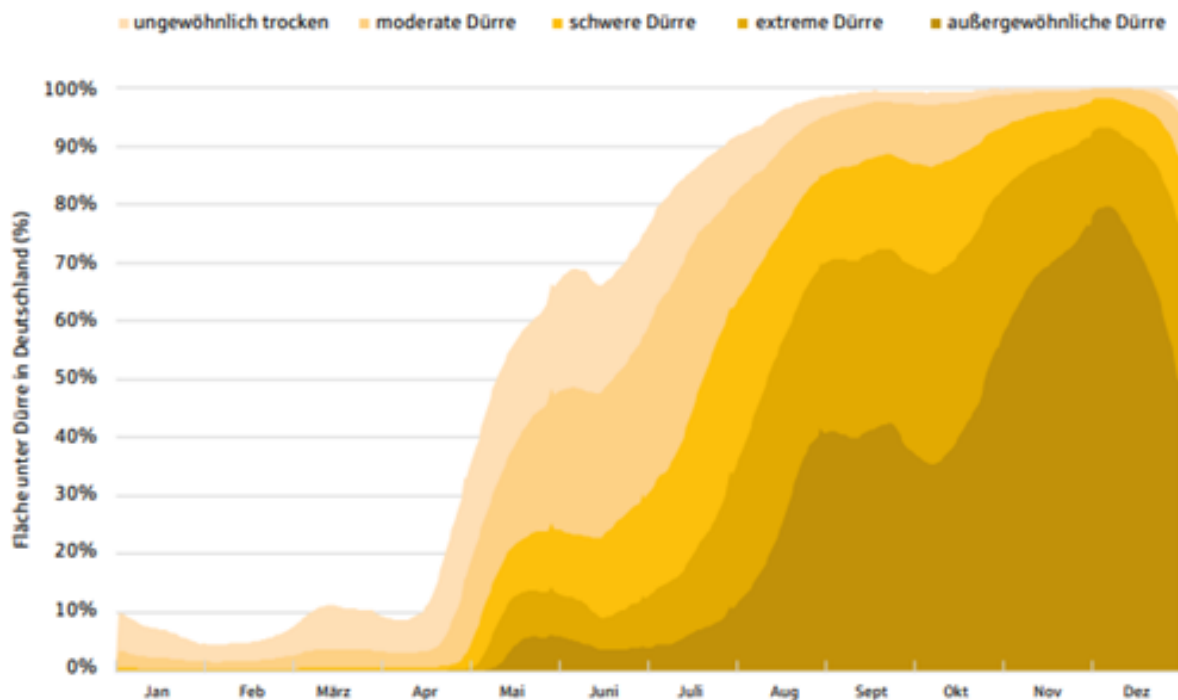
In der Zusammenschau ist der temperaturbedingte Klimaimpuls der Jahre 2018 / 2019 in der langjährigen Beobachtung als außergewöhnlich einzuschätzen. Neben den direkten Folgen der Hitzebelastungen entstanden weitergehende Folgewirkungen in Form einer extremen Dürre.

### 3.2 Auftreten von Dürreextremen 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 vertrocknen Böden 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 Wasser 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 FDA, 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 niederschlagsärmsten 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 Abbildung 3). Zum Vergleich: Im Hitzesommer 2003 lag der Wert bei max. 74%. Zuletzt gab es 1976 ein ähnlich großflächiges Ereignis (CEDIM FDA, 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, 2019e). 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, 2019e; DWD, 2019a).



### 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 (BfG, 2019). 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 gar 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.

## 4 Schäden und Schadenskosten der Hitze- und Dürreextreme 2018/ 2019

Die Erfassung von klimabedingten Schäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 in dieser Studie erfolgt mit Hilfe sogenannter **Schadensindikatoren**. Ein Schadensindikator kombiniert hierbei das jeweilige betroffene Handlungsfeld der DAS mit dem konkreten Ereignis, das zu einem Schaden geführt hat (siehe Abbildung 4). Beispiele für einen Schadensindikator sind „Ernteeinbußen in der Landwirtschaft durch hitzebedingte Ernteauffälle“ oder „Schäden in Industrie und Gewerbe durch hitzebedingte Produktivitätsausfälle“. Prinzipiell kann für jede Kombination aus Handlungsfeld und Klimasignal ein Schadensindikator gebildet werden. Dies ist jedoch durch die entstehende Komplexität der Wirkungsbeziehungen und die teilweise fehlende volkswirtschaftliche Relevanz der so entstehenden Indikatoren nicht zielführend. Vielmehr ist es wichtig, die relevantesten bzw. wirkungsstärksten Schadensindikatoren zu identifizieren, um zu einer fundierten Abschätzung des Gesamtschadensausmaßes der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 zu gelangen.

Abbildung 4: Beispielhafte Bildung von Schadensindikatoren



| Eigene Darstellung

Die Monitoringberichte zur DAS sowie die KWRA 2021 bieten einen Ausgangspunkt zur Identifizierung potenziell relevanter Schadensindikatoren. Eine Liste von 126 Indikatoren, die sich mit der Abbildung von Klimawandelschäden bzw. -folgen befassen, befindet sich im Anhang des Dokuments. Nur ein Teil der Indikatoren ist für eine Erfassung des Schadensausmaßes der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 wesentlich. Eine **erste Eingrenzung** kann auf die DAS Handlungsfelder erfolgen, in denen absolut hohe (im Kontext der deutschen Volkswirtschaft) oder relativ hohe (im Kontext der Relevanz der Schadenshöhe für das jeweilige Handlungsfeld) Schäden auftreten und sich diese operationalisieren lassen. Auf Basis von Hirschfeld et al. (2021) sowie den Einschätzungen der KWRA 2021 sind dies die DAS Handlungsfelder Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft, Wald- & Forstwirtschaft, Menschliche Gesundheit sowie Bauwesen. Eine **zweite Eingrenzung** erfolgt hinsichtlich der Relevanz der Schadensindikatoren für das konkret betrachtete Schadensereignis Hitze und Dürreextreme in den Sommern 2018 und 2019. **Im Ergebnis** bieten sich

für eine Abschätzung der Größenordnung der Schadenskosten der Hitze- und Dürreextreme insgesamt **sieben Indikatoren**, deren Schadenswirkungen im Folgenden quantifiziert bzw. (im Falle der hitzebedingten Todesfälle) exploriert werden sollen, an:

- Ertragsverluste von Winterweizen durch Hitze und Trockenheit
- Ertragsverluste von Silomais durch Hitze und Trockenheit
- Ertragsverluste weiterer Feldfrüchte durch Hitze und Trockenheit
- Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz durch Hitze und Trockenheit
- Beeinträchtigung der Ökosystemleistungen des Waldes - Kosten durch Verluste in der Klimaschutzleistung
- Hitzebedingte Minderung der Arbeitsproduktivität
- Hitzebedingte Todesfälle

#### 4.1 Schäden in der Landwirtschaft durch Ernteverluste

Die Kombination aus der Hitzeperiode und den ausbleibenden Niederschlägen führte in den Jahren 2018 und 2019 zu zwei aufeinanderfolgenden Dürresommern, die erhebliche Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion hatten. Die **direkten Schäden** in der Landwirtschaft ergeben sich durch den hitze- bzw. trockenheitsbedingten Rückgang der Erntemenge und der Qualität: Das Wachstum der Pflanzen wurde durch Hitzestress und fehlendes Wasser beeinträchtigt, und zusätzlich konnte ein vermehrtes Aufkommen von Schädlingen, begünstigt durch die bereits geschwächten Pflanzen, verzeichnet werden. Die zu verzeichnenden Ernteauffälle verteilen sich dabei regional unterschiedlich: Während der landesweite Durchschnitt der Ernteauffälle bei ca. 20% liegt, sind bei einzelnen Feldfrüchten in Nord- und Ostdeutschland Ausfälle von bis zu 70% zu verzeichnen. Für die Obstlese dagegen war insbesondere der warme Sommer 2018 sogar förderlich – hier stieg der Produktionswert um über 50% an (BMEL, 2019a).

Darüber hinaus sind auch Nutztiere durch die Hitzeperioden betroffen. Schon bei geringem Hitzestress geht die Milchleistung von Kühen zurück, sodass sowohl die Menge als auch die Qualität der abgegebenen Milch abnimmt. Schweine und Geflügel zeigen eine geringere Nahrungsaufnahme, was mit verringertem Wachstum und Qualität des Fleisches, sowie bei Geflügel mit dünneren Eierschalen und ebenfalls verringerter Qualität einhergeht (Kahlenborn et al., 2021). Aufgrund der komplexen und der nicht durchgängig erforschten Wirkungen kann dieser Indikator im Rahmen dieser Studie jedoch nicht monetarisiert werden.

Die **indirekten Schäden** durch Klimawandelauswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion treten sowohl in der Landwirtschaft selbst als auch in den nachgelagerten Branchen sowie bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern auf. So kann bspw. bei Nutztieren der benannte Effekt der Wachstums- und Qualitätseinbußen auch durch einen klimawandelinduzierten Mangel an Futtermitteln ausgelöst werden. Um diesem Futtermittelmangel entgegenzuwirken, werden zum Teil Feldfrüchte, für die eine anderweitige Verwendung (mit höheren Preisen) geplant war, verfüttert, oder im Extremfall Tierschlachtungen vorgezogen. In beiden Fällen ergeben sich Verluste und Kosten durch Abweichungen zum erwarteten bzw. möglichen Erlöswert.

Landwirtschaftliche Berufe sind durch einen hohen Anteil der im Freien stattfindenden Tätigkeit in Kombination mit einer oftmals hohen körperlichen Belastung gekennzeichnet, was insbesondere in den heißen Sommermonaten zu Produktivitätsverlusten oder auch Verletzungen und Krankheiten am Arbeitsplatz führen kann. Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen dieses Wirkungszusammenhangs werden jedoch im Indikator „Hitzebedingte Minderung der Arbeitsproduktivität“ im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe mitabgedeckt.

Analysen zum Verhältnis von direkten zu indirekten Schäden in der Landwirtschaft in verschiedenen regionalen Kontexten von Dürre und Hitzeereignissen deuten darauf hin, dass die indirekten Folgeschäden in der Landwirtschaft bei Dürre einen hohen Anteil an den Gesamtschäden ausmachen. **Je nach Untersuchung liegt das Verhältnis von direkten zu indirekten Schäden zwischen 0,6** (Horridge et al., 2003) **und 0,85** (Martin-Ortega et al., 2012; Diersen et al., 2002). Ein Euro direkter Schäden zieht folglich zwischen 60 und 85 Cent indirekter Schäden nach sich. Im Gegensatz zu den weiteren Wirtschaftssektoren, in denen die Effekte aus einer Input-Output-Modellierung von Sieg et al. (2019) übernommen werden konnten, musste für den Bereich Landwirtschaft eine Literaturliteraturanalyse durchgeführt werden. Einschränkend zu erwähnen ist hierbei, dass diese nicht für den Untersuchungsraum Deutschland durchgeführt wurden, aber mit Blick auf die Höhe der Faktoren nach Sieg et al. konsistent ins Gesamtbild passen. Die Bandbreite der Effekte gibt hier folglich auch nicht das Konfidenzintervall von 90% an, sondern die Spannweite der identifizierten Effekte aus den einzelnen Studien.

Grundlage der nachfolgenden Berechnungen sind die Erntestatistiken der beiden Jahre (siehe Tabelle 1). In diesen können sich auch weitere Ereignisse wie Starkregen, Stürme oder Hagelereignisse niederschlagen. Da diese jedoch eher kleinräumig wirken, sind die Auswirkungen als eher gering einzuschätzen. Es gilt daher die Annahme, dass Veränderungen in den Erntemengen und Erträgen auf die Dürren zurückzuführen sind. Auch der Naturgefahrenreport des GDV stützt diese Annahme: Sowohl 2018 als auch 2019 entstanden in der Sachversicherung vergleichsweise geringe Kosten durch Sturm und Hagel (2,2 bzw. 1,8 Mrd. €), diese verteilen sich jedoch auf die Bereiche Wohngebäude, Hausrat, Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft, sodass der Landwirtschaftsanteil an den Schäden hier noch deutlich geringer einzuschätzen ist (GDV, 2020). Da mehr als zwei Drittel der landwirtschaftlichen Flächen gegen Hagel versichert sind (BMEL, 2017), kann auch nicht von versteckten, in den Versicherungsstatistiken nicht auftauchenden Schäden, ausgegangen werden.

Die vorliegenden Erntestatistiken zeigen, dass 2018 ein deutlicher Rückgang der Erntemenge zu verzeichnen gewesen ist. Dieser konnte sich bei einzelnen Feldfrüchten (bspw. Winterweizen) im Folgejahr zwar erholen, erreichte aber noch nicht das Niveau der Erntemengen der vorangegangenen Jahre. Bedingt durch eine starke Umstrukturierung der Anbausysteme als Reaktion auf die Dürre 2018 kam es ebenfalls bei einzelnen Feldfrüchten zu extremen Ernteeinbußen im Jahr 2019. So ging die Erntemenge von Raps zwischen 2018 und 2019 um 23%, im Vergleich von 2019 mit dem fünfjährigen Mittel von 2014 bis 2018 sogar um 40%, zurück. Der Rückgang der Rapsernte ist jedoch vor allem auf den Einbruch der Anbauflächen um 30% zwischen 2018 und 2019 zurückzuführen.<sup>4</sup> Entsprechend stiegen die Anbauflächen für die 2018 stark betroffenen Getreidearten Weizen und Roggen, sowie für Kartoffeln und Grünfutter an.

<sup>4</sup> Der extreme Rückgang ist ebenfalls auf die Dürre des Jahres 2018 zurückzuführen: Diese verhinderte die im Spätsommer und Herbst stattfindende Aussaat des Rapses zur Ernte im Jahr 2019, sodass in der Folge zahlreiche Landwirte auf ihren Flächen auf andere Feldfrüchte umstiegen (Bayerischer Bauernverband, 2019)

**Tabelle 1: Erträge, Erntemengen, Verkaufspreise und Erlöse ausgewählter Feldfrüchte bis 2019**

Fruchtart	Hektarertrag in dt			Erntemenge in 1000t			Verkaufspreis in € pro 100 kg			Erlös in 1000€		
	2013-2017	2018	2019	2013-2017	2018	2019	2013-2017	2018	2019	2013-2017	2018	2019
Weizen	80,0	66,7	74,0	25.661	20.250	23.073	16,5	16,8	16,7	4.478.078	3.410.120	3.850.917
Roggen u. Wintermenggetreide	56,8	42,1	50,9	3.589	2.202	3.237	13,9	16,0	15,1	588.203	352.073	490.118
Gerste	69,5	57,7	67,8	11.027	9.590	11.587	12,8	16,6	15,7	1.377.664	1.587.102	1.818.003
Hafer	47,0	41,1	41,1	587	575	518	15,3	15,5	16,3	105.013	89.072	84.567
Sommermenggetreide	43,6	37,4	35,8	59	41	32	16,5	16,8	16,7	15.386	6.928	5.378
Triticale	64,3	54,1	61,3	2.579	1.937	2.195	14,9	16,0	15,6	415.590	309.497	343.226
Körnermais/Mais zum Ausreifen (einschl. Corn-Cob-Mix)	97,5	81,4	88,1	4.442	3.346	3.665	16,5	16,5	16,5	826.991	552.014	605.451
Erbsen (ohne Frischerbsen)	34,9	27,9	30,6	230	198	230	193,1	229,5	218,5	382.294	454.636	501.458
Ackerbohnen	39,0	29,1	32,5	125	160	159	112,5	134,8	121,4	110.203	215.763	193.250
Süßlupinen	17,1	9,5	12,2	43	22	26	193,1	229,5	218,5	73.196	50.148	55.980
Sojabohnen	27,9	24,4	29,1	28	59	84	33,7	33,7	33,0	9.342	19.735	27.849
Kartoffeln	444,5	353,8	390,3	10.834	8.916	10.616	17,7	16,9	24,3	1.790.052	1.508.547	2.575.480
Zuckerrüben	741,2	632,8	727,4	26.552	26.198	29.751	2,9	2,6	2,7	753.244	681.146	803.565
Raps und Rübsen	38,1	29,9	33,0	5.182	3.672	2.828	36,2	35,3	35,9	1.981.010	1.296.117	1.013.874
Sonnenblumen	21,3	18,2	20,5	41	36	45	29,6	31,5	33,7	13.339	11.451	15.212
Silomais/Grünmais	436,4	352,9	390,0	91.111	77.497	86.697	2,893	2,888	2,891	2.772.333	2.237.721	2.506.410
Getreide zur Ganzpflanzenernte	269,7	229,5	285,5	2.488	1.997	3.312	16,5	16,8	16,7	375.618	336.236	552.739
<b>Gesamt</b>				<b>343.179</b>	<b>278.771</b>	<b>319.917</b>				<b>35.917.955</b>	<b>29.797.877</b>	<b>34.491.500</b>

Eigene Berechnung und Darstellung, Datenquellen: Statistisches Bundesamt: Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte 2020 und Eurostat: Selling prices of agricultural products (absolute prices) 2021. Einzelne Verkaufspreise wurden aufgrund fehlender statistischer Daten basierend auf Marktentwicklungen und ähnlichen Produkten berechnet (bspw. Silomais, siehe für Details hierzu Kapitel 4.1.2) oder geschätzt. Die Preise pro Gewichtseinheit basieren auf den Trockengewichten der Produkte



**Insgesamt ging die Erntemenge landwirtschaftlicher Produkte im Vergleich zum fünfjährigen Mittel zwischen 2013 und 2017 um 18,8% zurück.** In der Getreideernte lag der Rückgang sogar bei 20% (BMEL, 2019b). Vergleicht man die Produktionswerte der landwirtschaftlichen Gesamtrechnung des Bereichs der pflanzlichen Erzeugnisse, so zeigt sich zwischen 2017 und 2018 ein Rückgang von 25,7 Mrd. € um 2,2 Mrd. € auf 23,5 Mrd. €. 2019 nahm der Produktionswert dagegen um 4,4 Mrd. € auf 27,9 Mrd. € zu und lag damit sogar deutlich über den Werten der Vor-Dürre-Jahre (BMEL, 2019a). Dies erklärt sich vor allem über die angepassten Preisstrukturen als Reaktion auf die zweite deutlich unterdurchschnittliche Ernte in Folge- so kam es bspw. bei Kartoffeln 2019 zu einem Preisanstieg von ca. 50%. Diese Entwicklung zeigt, dass sich die Entwicklung der Erlöse bzw. des Produktionswertes für die Ermittlung der klimawandelbedingten Schäden in der Landwirtschaft nur bedingt eignet, und ein alternatives Vorgehen gewählt werden muss.

Aus diesem Grund wird zur Ermittlung der klimawandelbedingten Schäden die Abweichung der tatsächlich erzielten Erlöse von den zu erwartenden Erlösen herangezogen. Der zu erwartende Erlös berechnet sich dabei aus dem **Produkt der Anbaufläche eines Jahres mit den gemittelten Hektarerträgen der jeweils vorangegangenen fünf Jahre und dem statischen jährlichen Verkaufspreis des jeweiligen landwirtschaftlichen Produkts.**

#### 4.1.1 Ertragsverluste von Winterweizen durch Hitze und Trockenheit

Im Jahr 2018 konnten Landwirte mit der Ernte von (Winter-)Weizen einen Erlös von ca. 3,41 Mrd. € erzielen, was einem Rückgang um ca. 1 Mrd. € im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017 darstellt. Berechnet man hierzu den erwartbaren Erlös für das Jahr 2018 nach der obenstehenden Formel (als das Produkt der Marktpreise für Weizen des Jahres 2018, der Anbaufläche und des unter Normalzuständen zu erwartenden Hektarertrags, so erhält man ein Ergebnis von 4,09 Mrd. €. Die Differenz beider Werte (die die dürrebedingten Erlöseinbußen beinhaltet) beträgt **680 Mio. €.**

Für 2019 fallen die Verluste etwas geringer aus: Einem erwarteten Erlöswert von 4,16 Mrd. € steht hier der tatsächliche Erlös von 3,85 Mrd. € entgegen, was einer Einbuße von **310 Mio. €** entspricht. Zusammengerechnet über beide Jahre ergibt sich somit ein direkter Ertragsverlust von Winterweizen von **990 Mio. €.**

Unter Berücksichtigung der Anteile der indirekten Schadenskosten (zwischen 60 und 85% der direkten Kosten aus dem Bereich Landwirtschaft, s.o.), die im Falle des Weizens zwischen 594 und 842 Mio. € liegen, ergibt sich eine Gesamtschadenssumme zwischen **1,58 und 1,83 Mrd. €** (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Zusammensetzung der Schadenssumme der Ertragsverluste von Winterweizen

	Erwarteter Erlös	Tatsächlicher Erlös	Verlust	Spannbreite indirekter Effekte (Faktor 0,6) (Faktor 0,85)		Gesamt-schaden
2018	4.090	3.410	680	408	578	1.088- 1.258
2019	4.163	3.851	312	187	265	500-578
<b>Gesamt</b>	<b>8.253</b>	<b>7.261</b>	<b>992</b>	<b>595</b>	<b>843</b>	<b>1.588- 1.836</b>

Eigene Berechnung und Darstellung, Datenquellen: Statistisches Bundesamt: Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte 2020 und Eurostat: Selling prices of agricultural products (absolute prices) 2021  
Alle Angaben in Mio. €

#### 4.1.2 Ertragsverluste von Silomais durch Hitze und Trockenheit

Die Ertragsberechnung von Silomais gestaltet sich, im Gegensatz zu den weiteren Feldfrüchten, schwieriger, da der Großteil des Silomais nicht verkauft, sondern innerbetrieblich weiterverwendet wird (bspw. als Futtermittel), sodass es **wenig belastbare offizielle Preisstatistiken** gibt. Die hier zugrunde gelegte Berechnungsmethode basiert auf Daten der Landwirtschaftskammer Österreich und zeigt, dass die Silomaispreise bei einem mittleren Ertragsniveau ca. 17,5% des Körnermaispreises betragen. Wird eine Tonne Körnermais in einem Jahr für 165 € verkauft, so wird der Preis für Silomais mit rund 29 € pro Tonne angenommen (Landwirtschaftskammer Österreich, 2021).

Basierend auf diesem Preisbildungs-Vorgehen konnten Landwirte im Jahr 2018 mit der Ernte von Silomais einen Erlös von ca. 2,24 Mrd. € erzielen, was einem Rückgang um ca. 534 Mio. € im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017 darstellt. Berechnet man hierzu den erwartbaren Erlös für das Jahr 2018 nach der obenstehenden Formel (als das Produkt der Marktpreise für Silomais des Jahres 2018, der Anbaufläche und des unter Normalzuständen zu erwartenden Hektarertrags), so erhält man ein Ergebnis von 2,77 Mrd. €. Die Differenz beider Werte (die die dürrebedingten Erlöseinbußen beinhaltet) beträgt **530 Mio. €**.

Auch für den Silomais fallen die Verluste im Jahr 2019 etwas geringer aus: Einem erwarteten Erlöswert von 2,80 Mrd. € steht hier der tatsächliche Erlös von 2,50 Mrd. € entgegen, was einer Einbuße von **300 Mio. €** entspricht. Zusammengerechnet über beide Jahre ergibt sich somit ein direkter Ertragsverlust von Silomais von **830 Mio. €**.

Unter Berücksichtigung der Anteile der indirekten Schadenskosten (zwischen 60 und 85% der direkten Kosten aus dem Bereich Landwirtschaft, s.o.), die im Falle des Silomais zwischen 497 und 704 Mio. € liegen, ergibt sich eine Gesamtschadenssumme zwischen **1,32 und 1,53 Mrd. €** (siehe Tabelle 3), die den klimawandelbedingten Dürreextremen der beiden Jahre zuzuschreiben ist.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Schadenssumme der Ertragsverluste von Silomais

	Erwarteter Erlös	Tatsächlicher Erlös	Verlust	Spannbreite indirekter Effekte (Faktor 0,6) (Faktor 0,85)		Gesamt-schaden
<b>2018</b>	2.767	2.238	529	318	450	847-980
<b>2019</b>	2.805	2.506	298	179	253	477-552
<b>Gesamt</b>	<b>5.572</b>	<b>4.744</b>	<b>828</b>	<b>497</b>	<b>704</b>	<b>1.324- 1.531</b>

Eigene Berechnung und Darstellung, Datenquellen: Statistisches Bundesamt: Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte 2020 und Eurostat: Selling prices of agricultural products (absolute prices) 2021  
Alle Angaben in Mio. €

#### 4.1.3 Ertragsverluste weiterer Feldfrüchte durch Hitze und Trockenheit

Im Jahr 2018 konnten Landwirte mit der Ernte weiterer Feldfrüchte einen Erlös von ca. 7,47 Mrd. € erzielen, was einem Rückgang um ca. 1,35 Mrd. € im Vergleich zum Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017 darstellt. Berechnet man hierzu den erwartbaren Erlös für das Jahr 2018 nach der obenstehenden Formel (als das Produkt der gewichteten mittleren Marktpreise für die weiteren Feldfrüchte des Jahres 2018, der Anbaufläche und des unter Normalzuständen zu erwartenden Hektarertrags) so erhält man ein Ergebnis von 9,25 Mrd. €. Die Differenz beider Werte (die die dürrebedingten Erlöseinbußen beinhaltet) beträgt **1,78 Mrd. €**.

Für die weiteren Feldfrüchte fallen die Verluste im Jahr 2019 deutlich geringer aus als im Jahr 2018: Einem erwarteten Erlöswert von 9,91 Mrd. € steht hier der tatsächliche Erlös von 9,09 Mrd. € entgegen, was einer dürrebedingten Einbuße von **826 Mio. €** entspricht. Zusammenge-rechnet über beide Jahre ergibt sich somit ein direkter Ertragsverlust von **2,60 Mrd. €**.

Tabelle 4: Zusammensetzung der Schadenssumme der Ertragsverluste von weiteren Feldfrüchten

	Erwarteter Erlös	Tatsächlicher Erlös	Verlust	Spannbreite indirekter Effekte (Faktor 0,6) (Faktor 0,85)		Gesamt-schaden
2018	9.248	7.470	1.778	1.067	1.511	2.844- 3.288
2019	9.912	9.086	826	495	702	1.321- 1.527
<b>Gesamt</b>	<b>19.160</b>	<b>16.557</b>	<b>2.603</b>	<b>1.562</b>	<b>2.213</b>	<b>4.165- 4.816</b>

Eigene Berechnung und Darstellung, Datenquellen: Statistisches Bundesamt: Fachserie 3, R 3.2.1, Feldfrüchte 2020 und Eurostat: Selling prices of agricultural products (absolute prices) 2021  
Alle Angaben in Mio. €

Unter Berücksichtigung der Anteile der indirekten Schadenskosten (zwischen 60 und 85% der direkten Kosten aus dem Bereich Landwirtschaft, s.o.), die im Falle der weiteren Feldfrüchte zwischen 1,56 und 2,21 Mrd. € liegen, ergibt sich eine Gesamtschadenssumme zwischen **4,17 und 4,82 Mrd. €** (siehe Tabelle 4).

Summiert man die Schäden über alle drei untersuchten Indikatoren des Handlungsfelds Landwirtschaft hinweg, so ergibt sich für das Jahr 2018 ein direkter Gesamtschaden von **2,99 Mrd. €**, zzgl. 1,79-2,54 Mrd. € indirekte bzw. nachgelagerter Schäden. Für 2019 beträgt die direkte Schadenshöhe **1,44 Mrd. €**, auf die weitere 0,86-1,22 Mrd. € indirekte Schäden hinaufgerechnet werden. Insgesamt ergibt sich für die klimawandelbedingten Hitze- und Trockenheitsextreme der Jahre 2018 und 2019 somit ein Gesamtschadenswert zwischen **7** und knapp über **8 Mrd. €**.

## 4.2 Schäden in der Forstwirtschaft durch Bestandsverluste

Deutschlands Wälder litten stark unter den Hitze- und Dürreextremen 2018/2019. Abiotische (Sturm, Waldbrand, Hitze, Trockenheit) und biotische Faktoren (Insekten, Pilze) schädigten massiv Waldbestände. Die **Ursachen** der Waldschäden sind nicht nur vielfältig, sondern bedingen sich auch gegenseitig. So können Schädlinge wie der Borkenkäfer sich in bereits durch Trockenheit geschwächten Bäumen besonders schnell vermehren (UBA, 2019). Geschädigte Bäume weisen darüber hinaus auch eine geringere Sturmfestigkeit aus. Die Erfassung der Schäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 in der Forstwirtschaft erfolgt in dieser Studie daher über alle Einschlagsursachen und schreibt sie formal den Wetterextremen Hitze und Trockenheit zu, da diese die entscheidenden Faktoren für einen aufkommenden Einschlag durch allgemeine Schwäche bzw. Instabilität eines Baumes, durch Schädlingsbefall oder durch Stürme darstellen.<sup>5</sup> Dies dient der Konsistenz der Logik der Schadensindikatoren als Zusammensetzung von DAS-Handlungsfeld, Kostendimension und Extremereignis.<sup>6</sup>

Die Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 führten zu einem deutlich gestiegenen **Schadholzaufkommen sowie -einschlag**. Mit 49 % bzw. 67 % war der Anteil des Schadholzeinschlags am gesamten Holzeinschlag in den Jahren 2018 respektive 2019 mehr als zwei bis dreimal so hoch wie im Jahr 2010 mit rund 20 % (Destatis, 2021a).<sup>7</sup> Bilanziell verantwortlich für die Schäden waren vor allem Wind- und Sturmereignisse in 2018 und der Insektenbefall in 2019. Seit 2015 hat sich das Schadholzaufkommen verfünffacht, während sich der Schadholzeinschlag durch Insektenbefall binnen fünf Jahren gar verzehnfachte (Destatis, 2021a). Insgesamt beziffert sich in den Hitze- und Dürreextremen 2018/2019 das Schadholzaufkommen auf schätzungsweise rund 104 Mio. Erntefestmeter (Efm), wovon rund 76 Mio. Efm eingeschlagen wurden.<sup>8</sup> Zum Vergleich: Die durchschnittlichen Holzeinschläge pro Jahr belaufen sich im Mehrjahresmittel 2012-2017 auf rund 70 Mio. Efm (Thünen-Institut für Int. Waldwirtschaft und Forstökonomie, 2021).

<sup>5</sup> Seit 2020 weist die Holzeinschlagsstatistik "Trockenheit" als eigenständige Einschlagsursachen aus. Bis zum Berichtsjahr 2019 gehörten Schäden durch Trocknisanfall, mit zu den "Sonstigen herkömmlichen Ursachen für Schadholzeinschlag". Hierzu gehören auch Brandholz und Pilzanfall. Vor dem Hintergrund der starken Interdependenzen sind die Schäden der Hitze- und Dürreextreme allerdings nicht nur auf Trockenheit im Sinne der Destatis Einschlagsursache zu verorten.

<sup>6</sup> Der in dieser Studie verwendete Schadensindikator fasst somit die KWRA Indikatoren „Schäden durch Schadorganismen“, „Schäden durch Windwurf“, „Hitze- und Trockenstress“ sowie „Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz“ zusammen.

<sup>7</sup> Im Jahr 2020 stieg der durch Schäden bedingter Holzeinschlag nochmals an. Fast drei Viertel (72 %) der insgesamt eingeschlagenen Schadholzmenge ließ sich im Jahr 2020 auf Insektenbefall zurückführen (Destatis, 2021b)

<sup>8</sup> Eigene Berechnung auf Basis von Möhring et al. (2021). Ausführlichere Informationen in 4.2.1.

Ein hoher Schadholzeinschlag führt in mehrfacher Hinsicht zu gesellschaftlichen Kosten. So ist Schadholz nicht wertlos<sup>9</sup> <sup>10</sup>. Im Fall einer Verwertung müssen die vom Borkenkäfer befallenen Bäume jedoch möglichst schnell gefällt und aus den Wäldern transportiert werden. Das verursacht **Mehrkosten** und **Mindererlöse**. Zum einen muss bspw. die Wiederaufforstung finanziert werden. Zum anderen kann das Schadholz durch ein Überangebot ggf. nur mit Preisabschlägen verkauft werden. In manchen Fällen muss mit Kalamitätsabschlägen von 10% bis 45% je Baumart gerechnet werden. In der Summe kann ein hoher Anteil an Schadholz zu erheblichen Mindererlösen im Verkauf des Holzeinschlags führen.

Ein hohes Aufkommen von Schadholz führt darüber hinaus zu weiteren Kosten für Betrieb und Gesellschaft, die sich jedoch nur schwer monetär erfassen lassen. So müssen zu den Kalamitätsabschlägen auch Verluste durch die sogenannte **Hiebsunreife** hinzugerechnet werden. Mit Hiebsunreife wird der Verlust zukünftiger Erträge bezeichnet, der dadurch entsteht, dass dem Bestand normalerweise noch innewohnende Ertragspotentiale verloren gehen. Darüber hinaus wird nicht jedes Schadholz aufbereitet und verkauft. Für ein langfristiges Fortbestehen des Forstbetriebes ist es entscheidend, dass auf den Kalamitätsflächen **Wiederbewaldung** betrieben wird. Dies kann ebenfalls zu Mehrkosten gegenüber den normalen Kulturkosten führen.

**Tabelle 5: Schadenskomponenten in der Forstwirtschaft**

In dieser Studie berücksichtigt	In dieser Studie nicht berücksichtigt
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mindererlöse bei aufgearbeitetem Schadholz</li> <li>■ Mehrkosten bei aufgearbeitetem Schadholz</li> <li>■ Abschreibung des nicht aufgearbeiteten Schadholzes</li> <li>■ Verluste durch Hiebsunreife</li> <li>■ Mehrkosten der Wiederaufforstung</li> <li>■ sonstige betriebliche Mehrkosten</li> <li>■ Wertzuwachsverluste</li> <li>■ Folgeschäden entlang der Wertschöpfungsketten</li> <li>■ Ökosystemdienstleistung Klimaschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Destabilisierung der verbleibenden Rest- und Nachbarbestände</li> <li>■ Marktpreisverfall für Normaleinschlag und Einschlagsverzicht</li> <li>■ Aufschub regulärer Maßnahmen und Reduktion des nachhaltigen Hiebsatzes</li> <li>■ Ökosystemdienstleistung Biodiversität</li> <li>■ Ökosystemleistung Lokale Auswirkungen auf das Klima</li> </ul>
<p><b>In dieser Studie berücksichtigt, jedoch aufgrund methodischer Unsicherheiten nicht in die Gesamtsumme eingeflossen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ökosystemdienstleistung Erholungswert</li> </ul>	

Eigene Darstellung

Tabelle 5 listet die im Rahmen dieser Studie monetär erfassten Schadenskategorien in der Forstwirtschaft durch Bestandsverluste auf. Zum einen umfasst dies die oben skizzierten kalamitätsbedingten betrieblichen Kosten der Forstbetriebe, sowie die entstehenden indirekten Schäden entlang der Wertschöpfungskette des Holzes bzw. der Holzprodukte. Darüber hinaus führt eine Verringerung des Waldbestands auch zu einem Verlust von **Ökosystemdienstleistungen**. So trägt

<sup>9</sup> Die zwischen Stamm und Borke gelegten Gänge des Borkenkäfers verändern die statischen Eigenschaften des Holzes im Prinzip nicht. In diesem Fall kann es vergleichbar mit dem Holz gesunder, nicht schadhafter Bäume im Baugewerbe, bspw. im nicht sichtbaren Bereich, eingesetzt werden.

<sup>10</sup> Ein schneller Abtransport muss oder sollte jedoch nicht stets erfolgen. Während es für kleinflächigen Befall sinnvoll und schadensbegrenzend wirkt, wenn befallene Bäume möglichst schnell aus dem Wald entfernt werden, ist dies für bei einem großflächigen Befall ggf. sogar besser nicht noch weiter in Bestandsstrukturen einzugreifen. Eine Aussicht auf Eindämmung der Kalamität existiert zu diesem Zeitpunkt nicht mehr und die Befahrung der Flächen mit schwerem Forstgerät zieht ökologische Folgeschäden nach sich, die insbesondere auch den Waldboden nachhaltig schädigen (Verdichtung, weitere Austrocknung).

der Waldbestand in seiner Funktion als Senke von Kohlenstoffdioxid zum **Klimaschutz** bei. Je nach Holzverwendung geht der im Wald geerntete Kohlenstoff in den Holzprodukteteil über, wo er, nach Lebensende der Holzprodukte, wieder freigesetzt wird. Ein kalamitätsbedingter Verlust des Waldbestands führt somit auch zu einem Verlust der CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität und damit der Klimaschutzleistungen. Durch das Ansetzen eines **Emissionspreises** lassen sich diese gesellschaftlichen Kosten der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 ebenfalls monetär erfassen.

#### 4.2.1 Beeinträchtigung der Qualität & Verfügbarkeit von Holz durch Hitze und Trockenheit

Die Berechnung der kalamitätsbedingten betrieblichen Mehrkosten in der Rohholzproduktion der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 basiert im Wesentlichen auf den Daten, Bewertungsansätzen und Annahmen von Möhring et al. (2021). Ausgehend von einem Schadholzaufkommen von rund 104 Mio. Erntefestmetern, ermittelt sich abzüglich der Waldflächen mit Nutzungseinschränkungen, des nicht verwerteten Derbholzes sowie der nicht aufgearbeiteten Schadholzmenge ein Schadholzeinschlag von rund 76 Mio. Efm in 2018/2019 (siehe Tabelle 6).<sup>11</sup>

**Tabelle 6: Schadholzeinschlag 2018 / 2019**

Baum-/ Holzarten- gruppe	Schadholzaufkommen der BMEL-Länderabfrage (Stand 30.09.2020)		insgesamt	abzüglich Waldflächen mit Nutzungs- einschrän- kungen	abzüglich nicht verwertetes Derbholz	nicht aufge- arbeitete Schad- holzmenge	Schadholz- einschlag/ Schadholz- aufarbei- tung
	2018	2019					
<i>Alle Angaben in Efm</i>							
							<b>2018-2019</b>
<b>Eiche</b>	598.511	627.820	1.226.331	1.179.068	1.085.934	0	1.085.934
<b>Buche</b>	2.501.489	4.752.180	7.253.669	6.750.449	5.757.332	283.724	6.041.055
<b>Fichte</b>	27.036.700	57.857.701	84.894.401	79.323.173	60.799.422	15.286.745	76.086.167
<b>Kiefer</b>	5.473.300	5.482.299	10.955.599	10.315.869	8.360.337	1.654.526	10.014.863
<b>gesamt</b>	<b>35.610.000</b>	<b>68.720.000</b>	<b>104.380.000</b>	<b>97.589.044</b>	<b>76.038.131</b>	<b>17.210.375</b>	<b>93.248.505</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021). Annahme: Abzug durch Nutzungseinschränkung, nicht verwertetes Derbholz und nicht aufgearbeitetes Schadholz pro Jahr proportional zum Schadholzaufkommen der Jahre 2018 bis 2020.

Unter Annahme von kalamitätsbedingten Erlösabschlägen sowie durchschnittlichen Holzerlösen lassen sich die kalamitätsbedingten Mindererlöse des Schadholzes berechnen. Fichten repräsentieren nicht nur den Großteil des Schadholzes, sie weisen darüber hinaus auch noch die höchsten Preise pro Efm aus und sind am stärksten von kalamitätsbedingten Erlösabschlägen betroffen. Im Ergebnis entfällt ein Großteil von über 90 % der betrieblichen Schadenskosten auf Mindererlöse im Vertrieb von Fichten, während Kiefer (5,3 %), Buche (3,4%) und Eiche (0,5%) eine

<sup>11</sup> Möhring et al. (2021) basieren Ihre Analyse auf Informationen des Europäischen Wirtschaftsdienstes (EUWID, 2020), BMEL-Ländermeldungen und der nach amtlicher Holzeinschlagsstatistik eingeschlagenen Schadholzmenge (Destatis, 2021). Da die amtliche Holzeinschlagsstatistik regelmäßig den tatsächlichen Einschlag unterschätzt, wurde der Schadholzeinschlag mit Korrekturfaktoren auf Basis der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Institutes korrigiert. Möhring et al. (2021) weisen den betrieblichen Schadholzeinschlag für die Jahre 2018 bis 2020 lediglich als Aggregat aus. Zur Ermittlung des Schadholzeinschlags für 2018/2019 wird unterstellt, dass sich die Korrektur von Schadholzaufkommen zu Schadholzeinschlag in jedem Jahr entsprechend des relativen jährlichen Schadholzaufkommen verhält.

untergeordnete Rolle spielen. Über alle Baumarten summieren sich die kalamitätsbedingten **Mindererlöse** auf fast **2 Mrd. €** (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7: Abschätzung der kalamitätsbedingten Mindererlöse und Mehrkosten für das aufgearbeitete Schadholz**

Baum-/ Holzarten- gruppe	Schadholzein- schlag 2018- 2019 (ohne nicht aufgearb. Schadholz)	mittl. Holzerlös je Efm	kalamitätsbe- dingter Erlös- abschlag	Mindererlös für das auf- gearbeitete Schadholz	normale Holzernte- kosten	kalamitäts- bedingter Kostenzu- schlag	Mehrkosten für das auf- gearbeitete Schadholz
	Mio. Efm	€/Efm	%	Mio. €	€/Efm	%	Mio. €
<b>Eiche</b>	1,1	75,6	10%	8	26,00	15%	4
<b>Buche</b>	5,8	48,35	20%	56	26,00	15%	22
<b>Fichte</b>	60,8	67,15	45%	1.837	26,00	15%	237
<b>Kiefer</b>	8,4	52,67	20%	88	26,00	15%	33
<b>gesamt</b>	<b>76,0</b>			<b>1.989</b>			<b>296</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021).

Kalamitätsbedingte Einschläge führen nicht nur dazu, dass das Holz im Schnitt an Qualität verliert. Auch müssen oftmals Bäume frühzeitig geschlagen werden. Dadurch, dass dem Bestand normalerweise noch innewohnendes Ertragspotential verloren geht, entgehen den Forstbetrieben indirekt weitere Erlöse durch **Hiebsunreife**. Unter Berücksichtigung einiger Korrekturfaktoren im Rahmen des sogenannten Alterswertfaktorverfahrens belaufen sich die geschätzten Verluste durch Hiebsunreife auf ca. **1,3 Mrd. €** oder rund 5.700 €/ha (siehe Tabelle 8).

Neben den Mindererlösen sind die Forstbetriebe mit **Mehrkosten** konfrontiert. Unter Annahme eines pauschalen kalamitätsbedingten Kostenzuschlags von 15 % (ca. 300 Mio. Euro, siehe Tabelle 7), einem Schadensbetrag des abzuschreibenden Schadholzes (ca. 680 Mio. Euro, siehe Tabelle 9), Mehrkosten bei der Wiederbewaldung der Kalamitätsfläche (ca. 800 Mio. Euro, siehe Tabelle 10) sowie sonstigen betrieblichen Mehrkosten (ca. 350 Mio.)<sup>12</sup> belaufen sich die geschätzten kalamitätsbedingten **betrieblichen Mehrkosten** in der Rohholzproduktion auf **insgesamt über 2,1 Mrd. €** (siehe Tabelle 9 und Tabelle 8).

<sup>12</sup> Die sonstigen Mehrkosten setzen sich aus einem geschätzten Verwaltungs-Mehraufwand i.H. 266 Mio. (76 Mio. Efm Schadholzanfall multipliziert mit 3,5 €/Efm) sowie zusätzliche Organisationskosten für die Wiederbegrünung i.H.v. 81 Mio. € (10%) zusammen.

Tabelle 8: Verluste durch Hiebsunreife

Baum-/ Holzar- ten- gruppe	Schad- holzauf- kommen 2018- 2019*	Vorrat Bestände >60 Jahre gem. BWI	kalku- lierte Kalami- tätsflä- che	mittlere relative Ertrags- klasse	Standard- Endnut- zungs- alter gem. Wald R2000	Abtriebs- wert im Alter der Umtriebs- zeit Au (gem. PG WB 2019)	Kultur- kosten (gem. PG WB 2019)	Bezugsal- ter (75% der Umtriebs- zeit)	Alters- wertfak- tor (gem. WaldR 2020)	Be- stands- wert im Be- zugsalter (gem. PG WB 2019)	Wertrela- tion von AW im Bezugsal- ter zu Au nach WBR- NRW	über Wertrela- tion abgelei- teter Abtriebs- wert im Be- zugsalter	Hiebsun- reife im Be- zugsalter	Hiebsun- reife Verlust
	Mio. Efm	Efm/ha	ha		Alter	€/ha	€/ha	Alter		€/ha		€/ha	€/ha	Mio. €
<b>Eiche</b>	1,2	269	4.383	1,7	180	35.920	13.495	135	0,854	32.646	0,574	20.634	12.012	53
<b>Buche</b>	6,8	334	20.211	1,9	140	18.685	4.137	105	0,857	16.605	0,548	10.243	6.362	129
<b>Fichte</b>	79,3	461	172.068	1,1	100	37.503	2.969	75	0,822	31.356	0,672	25.220	6.136	1.056
<b>Kiefer</b>	10,3	272	37.926	1,5	120	16.664	4.414	90	0,85	14.827	0,727	12.120	2.707	103
<b>gesamt</b>	97,6		234.588											<b>1.340</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021). Hinweise: \* ohne Waldflächen mit Nutzungseinschränkungen



Tabelle 9: Mindererlöse durch abzuschreibendes Schadh Holz

Baum-/Holzartengruppe	nicht aufgearbeitete Schadh Holzmenge	erntekostenfreier Holzerlös	Schadensbetrag nicht aufgearbeitetes Schadh Holz
	Mio. Efm	€/Efm	Mio. €
<b>Eiche</b>	0,0	49,6	0
<b>Buche</b>	0,3	22,35	6
<b>Fichte</b>	15,3	41,15	629
<b>Kiefer</b>	1,7	26,67	44
<b>gesamt</b>	<b>76,0</b>		<b>680</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021). Annahme: Holz verbleibt ohne zusätzliche Kosten im Wald.

Die Schäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 am Waldbestand beschränken sich nicht nur auf ein erhöhtes Schadh Holz aufkommen, sie zeigen sich auch in **Zuwachsverlusten** des verbleibenden Waldbestandes. Diese Zuwachsverluste können erheblich sein. So schätzt Beck (2010) die prozentualen Zuwachsverluste des Trockenjahres 2003 über einen 4-Jahres Zeitraum bei Fichten auf 119% eines durchschnittlichen Jahreszuwachses.

Tabelle 10: Abschätzung der Mehrkosten bei Wiederbewaldung der Kalamitätsfläche

Baum-/Holzarten-gruppe	Kosten Naturver-jüngung €/ha	Kosten Pflanzung, mittlere Verhält-nisse €/ha	Anteile Verjün-gungsart gem. BWI 3		normale Kulturkosten gewichtet nach Verjün-gungsart €/ha	Kosten Pflanzung, schwie-rige unter-stellte Naturver-jüngung €/ha		Kosten Wiederbe-waldung nach Kalamität €/ha	Mehrkos-ten der Wiederbe-waldung €/ha
			Pflan-zung %	Naturver-jüngung %		Verhält-nisse %	Naturver-jüngung %		
<b>Eiche</b>	2.600	16.500	46%	54%	8.930	18.900	20%	15.640	6.710
<b>Buche</b>	1.800	8.800	13%	87%	2.715	11.000	20%	9.160	6.445
<b>Fichte</b>	1.300	3.600	13%	87%	1.605	4.400	20%	3.780	2.175
<b>Kiefer</b>	1.900	5.800	16%	84%	2.527	7.500	20%	6.380	3.853
<b>i. M. alle Baumarten</b>	<b>1.900</b>	<b>8.675</b>			<b>3.944</b>	<b>10.450</b>		<b>8.740</b>	<b>4.796</b>
<b>Kalamitätsfläche (ha)</b>									<b>167.967</b>
<b>Mehrkosten Kalamitätsfläche (Mio. €)</b>									<b>806</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021). Da bundesweite Angaben zu dem Baumartenwechsel bzw. den neu zu begründenden Baumartenanteilen auf den Kalamitätsflächen fehlen, aber eine deutliche Erhöhung der Laubholzanteile zu erwarten ist, wird bei der Kalkulation der Mehrkosten der arithmetische Mittelwert der vier Baumartengruppen (in Höhe von 4.796 €/ha) verwendet.

Die vorliegende Studie folgt auch hier dem Berechnungsansatz von Möhring et al. (2021) und orientiert sich in Bezug auf die geschätzten Zuwachsverluste an den in Beck (2010) geschätzten prozentualen Zuwachsverlusten über einen 4-Jahres Zeitraum als Folge des Trockenjahres 2003. Konkret wird stark vereinfachend angenommen, dass sich die Zuwachsverluste durch die Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 auf das 1,3-fache des Trockenjahres 2003 belaufen. Dies ergibt eine vorsichtige Schätzung der Zuwachsverluste von über **3,0 Mrd. €** (siehe Tabelle 11).

**Insgesamt** summieren sich die Schäden der Sommerextreme 2018/2019 in der Rohholzproduktion wie folgt:

■ kalamitätsbedingte Mindererlöse	2 Mrd. Euro
■ Verluste durch Hiebsunreife	1,3 Mrd. Euro
■ kalamitätsbedingte betriebliche Mehrkosten	2,1 Mrd. Euro
■ Wertzuwachsverluste	3 Mrd. Euro

für die Forstbetriebe auf rund **8,47 Mrd. €**.

Die Hitze und Trockenheit in den Sommern 2018 und 2019 stellten zweifellos klimatische Extreme für den deutschen Wald dar. Allerdings zeigt ein Blick in die Verteilung des Schadholzes über Baumartengruppen auch eine deutlich überproportional hohe Betroffenheit der Fichten. Dies deutet darauf hin, dass auch eine nicht standortangepasste Forstwirtschaft zu den erheblichen Schäden beigetragen hat. Bei der Wiederbewaldung bietet eine natürliche Verjüngung von auf der Fläche bereits vorkommenden Baumarten bzw. mittels ankommender Pionierbaumarten (z.B. Birke oder Weide) nicht nur eine Möglichkeit die Mehrkosten bei den Forstbetrieben zu verringern. Darüber hinaus trägt es auch zu einem stabilen Waldökosystem bei, was wiederum hilft zukünftige Schäden zu begrenzen.

Tabelle 11: Bewerteter Zuwachsverlust 2018-2019

Baum-/ Holzarten- gruppe	Gesamt	abzüglich Kalamitätsfläche 2018-2020	abzüglich Waldfläche mit Nutzungsein- schränkungen	Zuwachsverlust	2018-2019	abzüglich Anteil nicht verwertetes Derbholz	durchschn. Deckungsbeitrag (erntekostenfreier Holzerlös)	Wertzuwachs- Verlust	
				2003 (nach Beck 2010; Dauer 4 Jahre)	X-facher Zuwachs- verlust gegenüber 2003				Gesamt
<i>Holzzuwachs BWL 2002-2012</i>			<i>Zuwachsverlust 2018-2020</i>						
	Mio. Efm	Mio. Efm	Mio. Efm			Mio. Efm	Mio. Efm	€/ Efm	Mio. €
<b>Eiche</b>	7,2	7,2	6,7	13,1%	17,0%	1,1	1,1	49,6	52
<b>Buche</b>	26,4	26,2	24,5	64,8%	84,2%	20,6	18,5	22,34	413
<b>Fichte</b>	41,3	37,5	35,0	119,1%	154,8%	54,2	52,0	41,14	2.138
<b>Kiefer</b>	20,7	20,3	19,0	64,2%	83,5%	15,8	15,4	26,67	410
<b>gesamt</b>	95,7	91,1	85,2			91,8	86,9		<b>3.013,5</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021). Geschätzt als 1,3-facher Zuwachsverlust des Trockenjahres 2003 aus Beck (2010), bewertet mit dem mittl. Deckungsbeitrag in €/fm gem. TBN-Forst der Jahre 2012-2017.

Neben den direkt betroffenen Forstbetrieben sind ebenfalls Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette **indirekt** von Schäden in der Rohholzproduktion betroffen. Analog zum Verhältnis von direkten zu indirekten Schäden in der Landwirtschaft wird zur Berechnung der indirekten Schäden ein Faktor zwischen 0,6 und 0,85 angewendet (u.a. Dhuháin et al., 2009).<sup>13</sup> In diesem Fall belaufen sich die indirekten Schäden auf **weitere 5,1 bis 7,2 Mrd. €** (siehe Tabelle 12).

**Tabelle 12: Zusammensetzung der Schadenssumme in der Forstwirtschaft (exkl. Klimaschutzdienstl.)**

	Spannbreite indirekter Effekte			Gesamtschaden
	Direkte Kosten	Faktor 0,6	Faktor 0,85	
2018	2,89 Mrd. €	1,74 Mrd. €	2,46 Mrd. €	4,63 – 5,35 Mrd. €
2019	5,58 Mrd. €	3,35 Mrd. €	4,74 Mrd. €	8,93 – 10,32 Mrd. €
<b>gesamt</b>	<b>8,47 Mrd. €</b>	<b>5,09 Mrd. €</b>	<b>7,20 Mrd. €</b>	<b>13,56 – 15,67 Mrd. €</b>

Eigene Berechnung

#### 4.2.2 Beeinträchtigung der Ökosystemleistungen des Waldes - Kosten durch Verluste in der Klimaschutzleistung

Schließlich wirken sich die Schäden am Waldbestand durch die Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 auch auf die **CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität** (Senken- oder Klimaschutzleistungen) aus. Zur Berechnung der gesellschaftlichen Kosten der reduzierten Klimaschutzleistungen orientiert sich die vorliegende Studie an den Ansätzen der regionalisierten Bewertung der Waldleistung in Deutschland des Thünen Instituts (Elsasser et al., 2021).

Die Berechnung der reduzierten CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird die im Schadholz gebundene Menge an Kohlendioxid bestimmt. Hierfür wird, differenziert für jede Baumart, zunächst die Holzmasse auf Grundlage der Darrdichte berechnet. Da ungefähr die Hälfte der Holzmasse aus Kohlenstoff besteht, wird die Darrdichte durch den Faktor zwei dividiert, um das Gewicht des im Baum gespeicherten Kohlenstoffs zu erhalten. Die Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente und damit der CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität des Schadholzeinschlags erfolgt durch den physikalisch-chemisch gegebenen Umrechnungsfaktor von 3,67.

In einem zweiten Schritt wird die Menge des **freigesetzten Kohlendioxids** bestimmt. Zwei wichtige Annahmen unterliegen der Berechnung der durch die reduzierte CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität freigesetzten Menge Kohlendioxid. Die erste Annahme betrifft die unterstellte **Nutzungsverteilung** des aufgearbeiteten Schadholzes.<sup>14</sup> Je nach Holzverwendung wird der im Wald geerntete Kohlenstoff wieder freigesetzt (z.B. durch energetische Verwertung) oder bleibt noch lange in

<sup>13</sup> Dhuháin et al. (2009) ermitteln einen Multiplikator für die Forstwirtschaft in Irland i.H.v. 1,85 was einem Faktor von 0,85 entspricht. Dieser schließt neben den indirekten Effekten auch induzierte Effekte mit ein und ist dadurch am oberen Ende der Folgekosten anzusiedeln. Je nach gewähltem Aggregationsniveau fallen bei einer Input-Output Modellierung die Forst- und Waldwirtschaft zusammen mit der Landwirtschaft in den Produktionsbereich „Erzeugnisse der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei“. Auch in der amtlichen statistischen Systematik der Wirtschaftszweige der EU (NACE) fallen die Forst- und Waldwirtschaft gemeinsam mit der Landwirtschaft in den Wirtschaftszweig „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei“.

<sup>14</sup> Der zuvor in der oberirdischen Biomasse des im Wald verbleibenden Schadholzes gebundene Kohlenstoff geht somit annahmemaßig komplett in den Totholzspeicher ein und bleibt weiterhin langfristig gebunden.

Holzprodukten (z.B. in langlebigen Konstruktionen wie Gebäuden oder Möbeln) gespeichert. Bei der Nutzungsverteilung wird im Wesentlichen zwischen der Verwendung von Laub- und Nadelholz unterschieden.

Die zweite Annahme ist die der **Substitutionseffekte**. Sowohl die energetische als auch die langlebige stoffliche Verwendung von Holz führt zu einem reduzierten Einsatz anderer Materialien wie Stahl oder Beton (stoffliche Substitution) sowie von Brennstoffen (energetische Substitution). Entscheidend für die Erfassung der gesellschaftlichen Kosten durch reduzierte Klimadienstleistungen ist somit die **Nettomenge** an freigesetztem Kohlendioxid, die mit dem vermehrten Aufkommen von Schadholz verbunden ist. Laut Elsasser et al. (2021) wird durch eine stoffliche Verwendung von Holz durch die geringere Verwendung von Nicht-Holzprodukten netto Kohlenstoff eingespart. Bei der energetischen Substitution wird hingegen davon ausgegangen, dass es durch eine energetische Verwendung des Holzes zu einem Nettozuwachs an Kohlenstoffdioxid kommt.

Die in dieser Studie unterstellte Nutzungsverteilung und daraus resultierende Substitutionsleistung der Baumarten folgt Elsasser et al. (2021)<sup>15</sup> und ist in Tabelle 13 ausgewiesen. Ein Substitutionswert von unter 1 bedeutet, dass durch das Aufkommen von Schadholz ein Nettozuwachs an freigesetztem Kohlendioxid entstanden ist und somit gesellschaftliche Kosten durch reduzierte Klimaschutzdienstleistungen vorliegen. Kombiniert mit den Informationen des aufgearbeiteten Schadholzeinschlags ergibt sich eine geschätzte Nettomenge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid von rund **14 Mio. t CO<sub>2</sub>**.<sup>16</sup> Unter Annahme verschiedener Kostenansätze für eine Tonne CO<sub>2</sub>, die zwischen 50 (niedrigster Preis im EU-Emissionshandelssystem seit Juli 2021) und 201 € (UBA Referenzpreis der sozialen CO<sub>2</sub>-Kosten) liegen können, bewegen sich die gesellschaftlichen Kosten durch Verluste in der Klimaschutzleistung zwischen **0,7 bis 2,8 Mrd. Euro**.

Tabelle 13: Baumartenspezifische Substitutionsfaktoren

Baumartengruppe	Eiche	Buche	Fichte	Kiefer
Faktor Substitution	0,82	0,77	0,79	0,84

Elsasser et al. (2021)

### i

#### Exkurs: Quantifizierung der Ökosystemleistung Erholungswert

Neben den bereitstellenden (bspw. in Form von Holz und weiteren Rohstoffen) und den regulierenden (bspw. durch die Bindung von Feinstaub und CO<sub>2</sub>) Ökosystemleistungen stellen die sogenannten kulturellen Ökosystemleistungen den dritten Bereich von Waldfunktionen dar. Unter diesen dritten Bereich fällt auch die Nutzung der Wälder zur Freizeitgestaltung bzw. zur Erholung (Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik, 2021). In Umfragen zeigt sich, dass über 80 % der Bevölkerung einen Besuch in der Natur verwenden, um sich zu erholen. Insgesamt finden so in Deutschland jährlich über 3 Mrd.

<sup>15</sup> Elsasser et al. (2021) ermitteln die Substitutionsleistung auf Basis des Klimarechners des Deutschen Forstwirtschaftsrats sowie Durchschnittswerten für Deutschland.

<sup>16</sup> Die Beeinträchtigung der zukünftigen CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität des Waldes durch das Schadholzaufkommen ist an dieser Stelle nicht Gegenstand der Betrachtung.

Reisen bzw. Ausflüge in den Wald statt, wobei sich die Menschen insgesamt 16,6 Mrd. Stunden in der Natur aufhalten (Hermes et al., 2021).

Trotz dieses enormen Werts des Waldes für die Gesellschaft bestehen derzeit nur erste recht grobe Ansätze, die Ökosystemleistung des Erholungswertes der Wälder ökonomisch zu quantifizieren. Im Jahr 2015 erstellte das Institute for Environment and Sustainability des Joint Research Centres der Europäischen Kommission auf Basis einer Literaturanalyse eine Datenbank mit hektarbasierten Erholungswerten für insgesamt 295 europäische Wälder bzw. Waldstücke (Quintano und Barredo, 2015). Von diesen befinden sich jedoch nur fünf in Deutschland, sodass über deren Werte nur eine eingeschränkte Quantifizierung möglich ist. Quintano und Barredo geben jedoch den Mittelwert für alle europäischen Wälder mit 2.324 € pro Hektar an. Bereinigt man diese für das Jahr 2013 berechneten Effekte um die Inflation, so ergibt sich ein Wert von 2.531 € pro Hektar.

Um annähernd bestimmen zu können, wie viele Hektar an Waldfläche durch die Extremesommer 2018 und 2019 verloren gingen, wird die Gesamtmenge des angefallenen Schadholzes (entnommen aus Möhring et al. 2021) durch das durchschnittliche Holzaufkommen eines Hektars deutschen Waldes (336 m<sup>3</sup>, BMEL, 2016) geteilt (siehe Tabelle 14). Multipliziert man die Anzahl der so erhaltenen Fläche mit dem aus Quintano und Barredo übernommenen Erholungswert, so zeigt sich für das Jahr 2018 ein Schaden von ca. 268 Mio. € und für das Jahr 2019 ein Schaden von ca. 518 Mio. €. **Insgesamt beträgt nach dieser Rechnung der Verlust des Erholungswertes des Waldes über beide Jahre 768 Mio. €.**

**Tabelle 14: Berechnung des Gesamtverlusts des Erholungswertes der Wälder 2018 und 2019**

	Schadholzaufkommen in m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> Holz pro ha	Anzahl verlorene ha	Erholungswert pro ha	Gesamtverlust des Erholungswertes
2018	35.610.000	336	105.982	2.531 €	268 Mio. €
2019	68.720.000	336	204.524	2.531 €	518 Mio. €
<b>gesamt</b>	<b>104.330.000</b>	<b>336</b>	<b>310.506</b>	<b>2.531 €</b>	<b>786 Mio. €</b>

Eigene Berechnung basierend auf Möhring et al. (2021), BMEL (2016) und Quintano und Barredo (2015)

Da jedoch aus der Datenbank nur wenige Aussagen für Deutschland entnehmbar waren und zusätzlich eine extreme Spannweite zwischen den einzelnen Datenpunkten von Quintano und Barredo besteht, ist das Ergebnis nur eingeschränkt aussagekräftig. Darüber hinaus ist auch die Annahme eines konstanten Holzvolumens pro Hektar Wald mit Unsicherheiten verbunden- insbesondere, wenn dieser mit dem tatsächlichen Schadholzvolumen multipliziert wird. Hierbei kann nicht berücksichtigt werden, ob in den Wäldern nur einzelne Bäume von Schäden betroffen waren oder eine großflächige Zerstörung auftrat (und sich somit die Implikationen für den Erholungswert stark

unterscheiden). Eine Besonderheit in der Untersuchung von Quintano und Barredo besteht außerdem darin, dass diese den jährlichen Erholungswert einzelner Wälder angeben. Die oben gezeigte Berechnung kann daher nur den kurzfristigen Verlust der Erholungsleistung im jeweiligen Jahr wiedergeben, langfristige Folgen sind nicht ermittelbar (da keine Aussagen über eventuelle Wiederaufforstungen und einer ‚Regeneration‘ des Erholungswerts getroffen werden können).

Aus den Untersuchungen von Möhring et al. (2021) zeigt sich darüber hinaus, dass insbesondere Fichtenmonokulturen von den Extremereignissen betroffen waren, die aufgrund des oftmals primären wirtschaftlichen Charakters einen deutlich geringeren allgemeinen Erholungsnutzen vorweisen. Die überschlägig errechneten Ergebnisse sind, auch aufgrund der hohen Spannweite der theoretischen Erholungswerte, aus denen der Mittelwert gebildet wird, mit starken Unsicherheiten entlang der gesamten Berechnungskette verbunden. Da somit nicht einmal eine Aussage getroffen werden kann, ob die Ergebnisse tendenziell zu hoch oder zu niedrig ausfallen, wird auf eine Einbeziehung in die Gesamtschadenssumme verzichtet.

### 4.3 Hitzebedingte Minderung der Produktivität

Unter Einwirkung von Hitzestress verringert sich die Konzentrationsfähigkeit und es kommt zu häufigeren oder schwereren Arbeitsunfällen (Kjellstrom et al, 2016). Somit sinkt die allgemeine Arbeitsproduktivität an heißen Tagen, insbesondere in körperlich anstrengenden oder im Freien stattfindenden Berufen. Eine Vielzahl an Untersuchungen stimmt darin überein, dass die Produktivität bei Hitze abnimmt, unterscheidet sich jedoch in der Höhe der konkret ermittelten Effekte. Einen konsistenten Rahmen der Produktivitätsverringering präsentieren bspw. Hübler et al. (2007), die in ihrem Ansatz eine Grenztemperatur von 26 °C und einen Produktivitätsverlust zwischen 3 und 12% (basierend auf Untersuchungen von Bux, 2006) verwenden. Laut Seppänen et al. (2004) nimmt jedes zusätzliche Grad über einer Schwelle von 25 °C die Produktivität um ca. 2% ab. Dieser Annahme folgend, liegt an Tagen mit einer Temperatur von 30 °C die flächendeckende Produktivität folglich nur noch bei 90%, sofern der entsprechende Arbeitsplatz nicht über Anpassungs- bzw. Kühlungsmaßnahmen verfügt, was mit dem Ansatz von Hübler et al. konsistent zu lesen ist. Aufgrund fehlender entsprechend detaillierter klimatischer sowie sozioökonomischer Daten für Gesamtdeutschland kann im Rahmen dieser Untersuchung für den Indikator nur die Minderung der Arbeitsproduktivität an Tagen über 30 °C ermittelt werden. Da jedoch, insbesondere in den Jahren 2018 und 2019 eine Vielzahl an Tagen auftrat, an denen die Temperatur sogar noch deutlich über den genannten 30 °C lag (deren genaue und bundeslandscharfe Anzahl jedoch nicht ermittelbar war), wird für die folgende Berechnung der obere Grenzwert einer Produktivitätsminderung von 12% für jeden Tag mit  $T_{\max} > 30\text{ °C}$  aus Bux (2006) sowie Hübler et al. (2007) übernommen.

Es wird die Annahme getroffen, dass an einem Hitzetag mit 30 °C die Temperatur an **vier Arbeitsstunden** (um die Mittags-/ Nachmittagszeit herum) bei über 30 °C liegt. Die weiteren vier Arbeitsstunden werden nicht in die Produktivitätsminderungsberechnung miteinbezogen (da sie laut Annahme unter 30 °C liegen). Multipliziert man die **Anzahl der durchschnittlichen Hitzetage pro Bundesland** im Gebietsmittel mit den fünf angenommenen Arbeitsstunden, so erhält man bundeslandscharf die jeweilige Arbeitsstundenanzahl, auf die der verringerte Produktivitätsfaktor von 88% angewendet werden soll.

Um den volkswirtschaftlichen Wert des Produktivitätsverlustes während der Hitzestunden zu ermitteln, wird das gesamte **Arbeitsvolumen** der zu untersuchenden Jahre (disaggregiert nach 19 Wirtschaftsbranchen und 16 Bundesländern) **in Vollzeitäquivalente** umgerechnet. Eine Verwendung der Anzahl sozialversicherungspflichtig Beschäftigter (SvB) bietet sich in diesem Fall nicht an, da diese keine Aussagen über in Teilzeit oder nur saisonalen Beschäftigungsverhältnissen stehende Personen zulässt. Die Anzahl der Vollzeitäquivalente wird anschließend mit dem branchen- und bundeslandscharfen **Bruttostundenlohn** und der Anzahl der Hitzestunden multipliziert.

Die so ermittelte Gesamtproduktivität während der Hitzestunden wird in einem nächsten Schritt mit dem verringerten Produktivitätsfaktor von 90%, sowie einem **Nicht-Anpassungsfaktor** multipliziert. Der Nicht-Anpassungsfaktor drückt dabei aus, wie viele Vollzeitäquivalente nicht von Anpassungsmaßnahmen, die die Umgebungstemperatur unter 30 °C halten, profitieren können. Nur in diesen findet der Produktivitätsverlust tatsächlich statt. Insbesondere in den körperlichen und im Freien stattfindenden Berufen, bspw. im Baugewerbe oder der Landwirtschaft, ist der Nicht-Anpassungsfaktor höher als in den Dienstleistungsbranchen. Die Quellenlage zur Abdeckung mit Klimaanlageanlagen, die im Kontext der vorliegenden Maßnahme den (volkswirtschaftlich) wirksamsten Anpassungsmechanismus darstellen, ist jedoch schlecht bzw. basiert auf lange zurückliegenden Untersuchungen. Insbesondere eine sektorspezifische Abschätzung der Abdeckungen ist auf der Basis dieser nicht möglich: Als alternative Ansatz wurden beruhend auf bestehenden Untersuchungen vier Gruppen von Wirtschaftszweigen geformt:



- **Im Freien stattfindende, von körperlicher Belastung gekennzeichnete Wirtschaftszweige** (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Bergbau, Bauwesen): Hier wird eine Abdeckung mit Anpassungsmaßnahmen von 0% angenommen.
- **Tätigkeiten des Verarbeitenden Gewerbes, des Einzelhandels, und sonstiger, nicht in Büros stattfindender Dienstleistungen:** Hier wird basierend auf der Abdeckung von klimatisierten Nicht-Wohngebäuden nach Bettgenhäuser et al. (2011) mit Klimaanlage eine Abdeckung mit Anpassungsmaßnahmen von 33% angenommen.
- **In Bürogebäuden stattfindende Dienstleistungen** (Finanz- und Versicherungsdienstleistungen, Grundstücks- und Wohnungswesen, Freiberufliche, wiss. u. techn. Dienstleistungen, Information und Kommunikation, etc.): Hier wird, ebenfalls basierend auf Bettgenhäuser et al. (2011) die Annahme getroffen, dass 51% der Büroflächen klimatisiert sind.
- **Verkehrsbezogene Tätigkeiten** (Verkehr und Lagerei): Diese von nicht in Gebäuden stattfindenden Berufen gekennzeichnete Gruppe (bspw. Transport- und Logistikdienstleistungen in LKW, sowie ÖPNV-Dienstleistungen) werden zu einem Großteil in klimatisierten Fahrerkabinnen durchgeführt, sodass eine Abdeckung mit Anpassungsmaßnahmen von 60% angenommen werden kann.

Auf Basis der Entwicklung der Anzahl gesamter Klimaanlage nach Zahlen der Internationalen Energieagentur (IEA, 2018) wird für Deutschland eine Wachstumsrate von jährlich 2% angenommen, um die Abdeckung mit Klimaanlage auch für die Jahre 2018 und 2019 ermitteln zu können.

Für 2018 werden direkte Schäden durch die hitzebedingten Produktivitätsverluste von 2,73 Mrd. € ermittelt; für das Jahr 2019 liegen die direkten Schäden mit 2,27 Mrd. € nur geringfügig niedriger. Somit ergibt sich ein gesamtes direktes Schadensausmaß von rund **5 Mrd. €** (siehe Tabelle 15). Es zeigt sich, dass der größte Anteil der gesamten direkten Schäden (sowohl im Jahr 2018 als auch 2019) im Bereich des **Verarbeitenden Gewerbes** entstand – insgesamt über 1,2 Mrd. €. Dies liegt an der großen Anzahl der in dieser Branche arbeitenden Personen in Kombination mit der geringen Abdeckung entsprechender Klimatisierungsmaßnahmen. Ähnlich verhält es sich mit der Branche des **Gesundheits- und Sozialwesens** mit fast einem Sechstel der Gesamtschäden (840 Mio. €). Mit 540 Mio. € direkten Schäden über die beiden Jahre hinweg ist außerdem auch das **Baugewerbe** stark von den hitzebedingten Produktivitätseinbußen betroffen.

Tabelle 15: Verteilung der Schäden durch hitzebedingte Produktivitätseinbußen

Branche	2018		2019		direkte Gesamtschäden
	Nicht-Anpassungsfaktor	direkte Schäden	Nicht-Anpassungsfaktor	direkte Schäden	
Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei	100%	48,76	100%	39,60	88,35
Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	100%	8,46	100%	6,82	15,29
Verarbeitendes Gewerbe	61,1%	668,07	60,4%	553,23	1221,30
Energieversorgung	61,1%	28,20	60,4%	24,11	52,31
Wasserversorgung, Entsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	61,1%	19,78	60,4%	16,90	36,68
Baugewerbe	100%	294,93	100%	247,19	542,11
Handel, Instandhaltung und Reparatur von Kfz	61,1%	53,41	60,4%	44,98	98,39
Verkehr und Lagerei	29,2%	207,63	28,0 %	166,61	374,24
Gastgewerbe	61,1%	58,41	60,4%	49,08	107,49
Information und Kommunikation	39,8%	92,25	38,8%	78,60	170,85
Erbringung von Finanz- und Versicherungsleistungen	39,8%	77,55	38,8%	61,78	139,34
Grundstücks- und Wohnungswesen	39,8%	21,45	38,8%	17,62	39,07
Freiberufliche, wiss. u. techn. Dienstleistungen	39,8%	166,26	38,8%	138,06	304,32
Sonstige wirtschaftliche Dienstleistungen	39,8%	105,63	38,8%	84,68	190,31
Öff. Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	39,8%	123,50	38,8%	102,33	225,83
Erziehung und Unterricht	61,1%	143,74	60,4%	121,18	264,92
Gesundheits- und Sozialwesen	61,1%	452,74	60,4%	383,68	836,43
Kunst, Unterhaltung und Erholung	61,1%	34,73	60,4%	29,38	64,11
Erbringung von sonstigen Dienstleistungen	61,1%	121,58	60,4%	101,59	223,17
<b>Gesamt</b>		<b>2.727,07</b>		<b>2.267,41</b>	<b>4.994,49</b>

Eigene Berechnung. Datengrundlagen: destatis, DWD, IEA, Prognos Economic Outlook  
Alle Angaben in Mio. €

Die Produktivitätsverringering in den jeweiligen Branchen zieht dabei auch noch **indirekte Effekte** nach sich: Durch fehlende, verspätete oder qualitativ verschlechterte Vorleistungen können auch weitere Produktionsverluste in anderen, nachgelagerten Branchen entlang der Wertschöpfungsketten auftreten. Im Folgenden werden die indirekten Effekte der Produktivitätsausfälle durch Hitze auf Basis eines von Sieg et al. (2019) ursprünglich für die Berechnung indirekter Effekte durch Hochwasserschäden entwickelten Modellansatzes ermittelt. Sieg et al. verwenden hierzu ein branchenscharfes angebotsseitiges Input-Output-Modell. Der Logik folgend, dass die **Entstehungsart (Hitze oder Hochwasser) eines Produktionsverlustes im Rahmen einer Input-Output-Modellierung unerheblich** ist und dieselben Folgewirkungen nach sich zieht, kann der **Ansatz auch auf die Berechnung der indirekten Effekte durch Hitze angewandt werden** – zumal in diesem Fall nur auf das Verhältnis von direkten zu indirekten Effekten nach Sieg et al. (2019) zurückgegriffen wird, nicht auf die absoluten Schadenshöhen. Die Verwendung dieses Ansatzes hat darüber hinaus den Vorteil, dass sämtliche Faktoren aus derselben konsistenten Modellwelt entstammen und branchenscharf abgebildet werden können. Die in Tabelle 16 beschriebenen Spannweiten stellen dabei das 90%-Konfidenzintervall dar (mit Ausnahme des Bereichs

Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei, für das die in Kapitel 4.1 identifizierten Quellen und deren Spannweiten Anwendung finden).

**Tabelle 16: Berechnung indirekter Effekte der hitzebedingten Produktivitätseinbußen**

Branche	Spannweite indirekter Effekte	Höhe indirekter Schäden 2018 in Mio. €		Höhe indirekter Schäden 2019 in Mio. €	
Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei	0,6 - 0,85	29,3	41,4	23,8	33,7
Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	0,84 - 1,11	7,1	9,4	5,8	7,6
Verarbeitendes Gewerbe	1,53 - 2,39	1020,5	1593,7	845,1	1319,7
Energieversorgung	0,34 - 0,44	9,6	12,5	8,2	10,7
Wasserversorgung, Entsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen	0,12 - 0,17	2,3	3,4	2,0	2,9
Baugewerbe	0,84 - 1,11	248,8	328,1	208,5	275,0
Handel, Instandhaltung und Reparatur von Kfz	0,68 - 0,96	36,4	51,3	30,6	43,2
Verkehr und Lagerei	0,36 - 0,46	75,2	94,6	60,3	75,9
Gastgewerbe	0,54 - 0,91	31,5	53,2	26,5	44,7
Information und Kommunikation	0,61 - 0,85	56,2	78,7	47,9	67,1
Erbringung von Finanz- und Versicherungsleistungen	0,65 - 1,24	50,2	96,2	40,0	76,6
Grundstücks- und Wohnungswesen	0,65 - 1,24	13,9	26,6	11,4	21,9
Freiberufliche, wiss. u. techn. Dienstleistungen	0,48 - 0,63	80,4	104,4	66,8	86,7
Sonstige wirtschaftliche Dienstleistungen	0,32 - 0,51	33,7	54,0	27,0	43,3
Öff. Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	0,15 - 0,26	18,5	31,9	15,4	26,4
Erziehung und Unterricht	0,24 - 0,45	35,1	64,1	29,6	54,1
Gesundheits- und Sozialwesen	0,22 - 0,35	99,8	159,7	84,5	135,4
Kunst, Unterhaltung und Erholung	0,44 - 0,8	15,2	27,9	12,9	23,6
Erbringung von sonstigen Dienstleistungen	0,32 - 0,51	38,7	62,1	32,4	51,9
<b>Gesamt</b>		<b>1.902,3</b>	<b>2.893,4</b>	<b>1.578,5</b>	<b>2.400,4</b>

Eigene Berechnung. Datengrundlage: Sieg et al, 2019. In Einzelfällen wurden die indirekten Anteile aus weiteren Sekundärquellen ergänzt oder basierend auf ähnlichen Wirtschaftssektoren übernommen.

Alle Angaben in Mio. €

Neben den zahlenmäßig großen direkten Effekten weist das Verarbeitende Gewerbe auch hohe Spannweiten der indirekten Effekte auf. So führt 1 € direkter Schäden durch hitzebedingte Produktivitätsverluste hier zu indirekten Kosten von 1,53 bis 2,39 €. In absoluten Zahlen ausgedrückt bedeutet dies für 2018 ein indirektes Schadensausmaß zwischen 1,02 und 1,59 Mrd. €, und für 2019 zwischen 0,85 und 1,32 Mrd. € - alleine im Verarbeitenden Gewerbe. Im Gesundheits- und Sozialwesen, das für die zweithöchsten direkten Effekte verantwortlich war, beträgt die Spannweite dagegen lediglich 100 bis 160 (für 2018) und 85 bis 135 (für 2019) Mio. €. Addiert man alle Spannweiten der indirekten Effekte, so zeigt sich, dass diese für 2018 insgesamt zwischen 1,9 und 2,89 Mrd. € lagen; für 2019 ergibt sich ein Effekt von 1,58 bis 2,4 Mrd. €, sodass

allein durch die indirekten Effekte der hitzebedingten Produktivitätsausfälle über beide Jahre hinweg ein volkswirtschaftlicher Schaden **zwischen 3,5 und 5,3 Mrd. €** entstand. Addiert man die gesamten direkten Schäden hierauf, so zeigt sich ein 90%-Konfidenzintervall der gesamtwirtschaftlichen Effekte von **8,5 bis 10,3 Mrd. €** durch hitzebedingte Produktivitätsverluste (siehe Tabelle 17), mit einem Medianwert von gut 9,2 Mrd. €.

**Tabelle 17: Zusammenstellung der Gesamtschäden durch hitzebedingte Produktivitätsausfälle**

	<b>direkte Schäden</b>	<b>Spannbreite indirekter Effekte</b>		<b>Gesamtschaden</b>	
2018	2.727	1.902	2.893	4.629	5.620
2019	2.267	1.579	2.400	3.846	4.668
<b>Gesamt</b>	<b>4.994</b>	<b>3.481</b>	<b>5.293</b>	<b>8.475</b>	<b>10.288</b>

Eigene Berechnung  
Alle Angaben in Mio. €

Aufgrund der Berechnungsmethode, die die Abdeckung mit Anpassungsmaßnahmen als einen relevanten Faktor für die Ermittlung der Gesamtschäden miteinbezieht, lässt sich eine vereinfachte Berechnung des monetären Nutzens von Anpassungsmaßnahmen (im konkreten Fall vorrangig die Einführung von Klimatisierungstechnik) durchführen. Tröltzsch et al. (2012) klassifizieren den flächendeckenden Einbau von Klimaanlage als low-regret-Maßnahme, da diese auch ohne den fortschreitenden Klimawandel zur Verbesserung der Lebensqualität beitragen. In einer Fallstudie für die Stadt Köln berechnen Pissarskoi et al. (2015) selbst in einem optimistischen Klimawandel-Szenario (in dem eine Klimaanlage seltener benötigt würde als in einem pessimistischen Szenario) ein Verhältnis zwischen Gesamtkosten und Nutzen von 1:1,45, im pessimistischen Szenario sogar von 1:4,2. Tröltzsch et al. (2012) attestieren sogar ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 1:6,5 für eine vollständige Abdeckung mit Klimaanlage. Einschränkend bemerken Tröltzsch et al. (2012) allerdings, dass Klimaanlage in Bezug auf die Anpassungsleistung effektiv, aber nicht effizient sind (insbesondere, wenn diese aus einem ganz oder z.T. auf fossilen Energieträgern basierenden Strommix betrieben werden), da lediglich eine Umverteilung der Temperaturen erfolgt, die tatsächliche Lufttemperatur in der Summe aber nicht abgekühlt wird.

Die Verwendung des Nicht-Anpassungsfaktors als Teil der Gleichung zur Ermittlung der Schäden hat den Vorteil, dass auf Basis seiner Veränderung (also der Erhöhung des Anteils bspw. von Klimaanlage) eine grobe Abschätzung der monetären Effekte von Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden kann. So zeigt sich, dass ein über alle Sektoren, in denen dies sinnvoll ist (dies schließt die Sektoren Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei, sowie Bergbau und das Bauwesen aus) um jeweils 20% der derzeitigen Abdeckung erhöhter Anteil an Klimaanlage eine monetäre Wirkung (als Vergleich des neu ermittelten Gesamtschadens zum bisherigen Gesamtschadensmaß) von 1,52 Mrd. € in den Sommern 2018 und 2019 zur Folge gehabt hätte (Rückgang der Schäden um insg. 17%). Eine Erhöhung um 50% hätte gegenüber den tatsächlichen Summen einen Nutzen von 3,66 Mrd. € (Rückgang der Schäden um insg. 40 %) gebracht, während eine Verdoppelung des Anteils der Klimaanlage sogar in 5,91 Mrd. € (Rückgang der Schäden um insg. 64 %) resultiert wäre.



### Exkurs: Schäden durch erhöhte Morbidität

Hitze wirkt sich nicht nur verringernd auf die Arbeitsproduktivität aus, sie hat darüber hinaus auch signifikante Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung und verursacht somit Mehrausgaben im Gesundheitssystem, die ebenfalls als extremwetterbezogene Schäden klassifiziert werden können.

In einer exemplarischen Untersuchung von Karlsson und Ziebarth (2018) zeigt sich, dass jeder zusätzliche Hitzetag ( $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$ ) in Deutschland zwischen 8.000 und 19.000 Krankenhaustage nach sich zieht. Die große Spannweite der Effekte erklärt sich durch die unterschiedliche Betrachtung zusätzlicher, durch die Hitze auftretender bzw. verstärkt werdender Belastungsfaktoren. Karlsson und Ziebarth untersuchen die Effekte, die jeder zusätzliche Hitzetag in Deutschland nach sich zieht, nicht mit Hilfe eines ökonomischen Modells, sondern auf Basis eines Gesundheitsmodells. Dies macht die auftretenden Gesundheitseffekte valide. Unsicherheiten existieren insbesondere bei der Übersetzung der Gesundheitseffekte in monetäre Schäden.

So werden die 8.000 bzw. 19.000 zusätzlichen Krankenhaustage lediglich mit einem fixen Kostensatz von 500 € als den durchschnittlichen Kosten eines Krankenhaustages multipliziert. Zusätzlich erfolgt eine Einbeziehung der durch den Verlust von Arbeitsleistung entstehenden Kosten (diese sind nicht mit den allgemeinen hitzebedingten Produktivitätsminderungen gleichzusetzen, sondern beschreiben explizit die durch Krankenhausaufenthalte verlorene Produktivität). Karlsson und Ziebarth verwenden hierfür einen fixen Kostensatz von 150 € (als dem durchschnittlichen täglichen Bruttolohn in Deutschland). Darüber hinaus werden auch die Mortalitätskosten, sowie der Verlust von Lebensqualität monetarisiert. Aufgrund großer methodischer Unsicherheiten sowie der ethischen Implikationen der Quantifizierung eines Menschenlebens, finden diese aber in der vorliegenden Untersuchung keinen Eingang in die Berechnungen (siehe zur Erläuterung Kapitel 4.4).

Karlsson und Ziebarth ermitteln so einen volkswirtschaftlichen Verlust von 4 bis 9,5 Mio. € durch Krankenhauskosten und von 0,6 bis 1,4 Mio. € durch verlorene Arbeitsleistung für jeden Hitzetag in Deutschland. Wendet man diese Kostensätze auf die Anzahl der Hitzetage 2018 bzw. 2019 an (20,4 bzw. 17), so ergeben sich **Kosten zwischen 195 und 462 Mio. €** (siehe Tabelle 18).

**Die hier berechneten Gesamtkosten sind jedoch mit einigen methodischen Einschränkungen versehen, und sollen aus diesem Grund auch nicht in die ermittelte Gesamtschadenssumme einbezogen werden:** So geben Karlsson und Ziebarth selbst an, dass der Kostensatz von 150 € pro Krankenhaustag zu hoch gewählt ist, da häufig sehr alte oder ohnehin langzeiterkrankte Personen eine stationäre Behandlung benötigen, durch die keine Arbeitsausfälle auftreten. Der standardisierte Kostensatz von 500 € pro Behandlungstag könnte dagegen ggf. als zu gering angesehen werden und spiegelt die große Bandbreite medizinischer Eingriffe und ihrer entsprechenden Kosten nur grob wider.

**Tabelle 18: Exemplarische Berechnung der Morbiditätskosten durch Hitze in den Jahre 2018 und 2019**

Jahr	Anzahl der Hitzetage	Anzahl zusätzlicher Krankenhaustage	Krankenhauskosten pro Hitzetag	Kosten durch Arbeitskraftverlust pro Hitzetag	Krankenhauskosten insgesamt	Kosten durch Arbeitskraftverlust insgesamt	Gesamt-schaden
2018	20,4	8.000	4,0	0,6	81,6	24,5	106
		19.000	9,5	1,4	193,8	58,2	252
2019	17	8.000	4,0	0,6	68,0	20,4	88
		19.000	9,5	1,4	161,5	48,5	210
<b>Gesamt</b>	<b>37,4</b>	<b>8.000</b>	<b>4,0</b>	<b>0,6</b>	<b>149,6</b>	<b>44,9</b>	<b>194</b>
		<b>19.000</b>	<b>9,5</b>	<b>1,4</b>	<b>355,3</b>	<b>106,7</b>	<b>462</b>

Eigene Berechnung auf Basis von: Karlsson und Ziebarth (2018), DWD  
Alle Kosten in Mio. €

Weiterhin berücksichtigt die im Kontext der vorliegenden Studie ermittelte Zahl nur die kurzfristigen Effekte der Hitzetage und vernachlässigt eine langfristige Berücksichtigung potenzieller ‚Harvesting‘-Effekte. Dies bedeutet, dass sich vor allem bei alten oder langfristig erkrankten Menschen, die sich aufgrund ihrer schlechten Gesundheitssituation in den nachfolgenden Tagen oder Wochen ohnehin in stationäre Behandlung hätten begeben müssen, der Aufenthalt durch einen auftretenden Hitzetag lediglich zeitlich nach vorne verschiebt, aber nicht zusätzlich auftritt. Weiterhin sind Gesundheitszustände bzw. die aus ihnen entstehenden Behandlungsnotwendigkeiten keine monokausalen Systeme, sondern entstehen durch das Zusammenspiel einer Vielzahl an Faktoren. Karlsson und Ziebarth (2018) versuchen diesen Effekt durch verschiedene Modellannahmen zu umgehen, jedoch entsteht so eine sehr große Spannweite möglicher Effekte. Darüber hinaus trifft die Untersuchung keine Aussage, ob sich die Zahl der zusätzlichen Krankenhausaufenthalte bei mehreren aufeinanderfolgenden Hitzetagen linear oder exponentiell fortsetzt bzw. sich aufgrund der beschriebenen Harvesting-Effekte ggf. sogar verringert.

Eine weitere Herausforderung für die zukünftige Forschung an der Schnittstelle zwischen Hitzebelastung und ihrer ökonomischen Folgen liegt in der Regionalisierung der vorhandenen Daten. Karlsson und Ziebarth verwenden für ihre Modellierung das gesamtdeutsche Temperaturmaximum, aufgrund der unterschiedlichen klimatischen und siedlungsstrukturellen Rahmenbedingungen kann sich die Zahl der Hitzetage innerhalb von Deutschland durchaus unterscheiden und hat erhebliche Auswirkungen auf die tatsächlichen Krankenhausaufenthalte. Darüber hinaus können insbesondere in Städten durch den Urbanen Hitzeinseleffekt auch bei (auf das Gebietsmittel gerechneten) Temperaturen unter 30 °C lokal gesundheitliche Beeinträchtigungen entstehen.

#### 4.4 Quantifizierung hitzebedingter Todesfälle

Neben den monetarisierbaren Schäden, die in der Land- und Forstwirtschaft sowie in Industrie und Gewerbe auftreten, sind insbesondere im Gesundheitsbereich Belastungen durch sommerliche Extremtemperaturen zu verzeichnen. Die Hitze steigert u.a. die Anfälligkeit gegenüber Herzkreislauferkrankungen und weiteren Organversagen, wobei ältere und vorerkrankte Personen, sowie Menschen, die im Freien arbeiten besonders vulnerabel gegenüber erhöhten Temperaturen über einen langen Zeitraum sind (Kjellstrom et al., 2016). Insbesondere in diesen vulnerablen Gruppen kommt es daher in heißen Sommermonaten zu einer statistisch signifikanten Übersterblichkeit, die sich aus der Abweichung von der zu erwartenden Anzahl der Todesfälle errechnet.

Die Anzahl der hitzebedingten Todesfälle wird bundesweit nicht formal erhoben. Stattdessen gibt es Schätzungen. Ein komplexer Ansatz stellen Modelle auf Basis von regionalen oder globalen Expositions-Wirkungskurven dar (Watts et al., 2018; an der Heiden et al., 2020; Winklmayr et al., 2022). Ausgehend von den Expositions-Wirkungskurven werden je nach Detailtiefe Temperaturschwellenwerte für z.B. Altersgruppen, Regionen, Jahreszeit und Dekaden definiert, oberhalb deren die Temperatur relevant auf die Mortalität einwirkt.<sup>17</sup> Einzelne Bundesländer, zum Beispiel Hessen, Baden-Württemberg, Berlin und Brandenburg weisen Schätzungen über die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle aus, verfolgen dabei aber einen einfacheren und an die Datenlage weniger fordernden Ansatz. Beispielsweise berechnet Axnick (2021) für das Fallbeispiel von Berlin und Brandenburg die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle als eine statistische Abweichung (in Höhe der doppelten Standardabweichung) von der Basislinie (der erwarteten Anzahl von Todesfällen), die an einem Tag auftreten, der eine Tagesmitteltemperatur  $>23^{\circ}\text{C}$  besitzt.

Die auf Basis des Ansatzes in Axnick (2021) ermittelten Zahlen besitzen einige methodische Einschränkungen: So werden verzögert auftretende Hitzetode (bei denen die Hitze eine Erkrankung oder einen Unfall auslöst, aber der Todesfall erst an einem Tag auftritt, der nicht unter das Kriterium  $T_{\text{mittel}} > 23^{\circ}\text{C}$  fällt) nicht einberechnet. Außerdem erfolgt keine Regionalisierung der Daten: im vorliegenden Ansatz wurden Tage nur dann als Hitzetodauslösend definiert, wenn der Tagesmittelwert aller ca. 500 deutschen Wetterstationen über  $23^{\circ}\text{C}$  lag. Regionale Temperaturextreme oder auch die Einwirkungen des urbanen Hitzeinseleffekts, der insbesondere in dicht besiedelten Regionen und Städten die Temperaturen stark beeinflusst, konnten nicht berücksichtigt werden. Diese haben jedoch einen deutlichen Einfluss darauf, welche Tage (im regionalen Kontext) als Hitzetodauslösend definiert werden. Somit ist davon auszugehen, dass die ermittelte Zahl der hitzebedingten Todesfälle eher eine **untere Grenze** der tatsächlichen Todesfälle angibt, da die Grobkörnigkeit der Daten dafür sorgt, dass einige der Todesfälle ggf. durch das Raster fallen.

Anwendung des von Axnick (2021) entwickelten Vorgehens zur statistischen Ermittlung Übersterblichkeit zeigt für das Jahr 2018 eine Übersterblichkeit von 5.350 Personen und für 2019 von 2.150 Personen. **Insgesamt kamen so in beiden Jahren ca. 7.500 Personen durch die Hitze zu Tode.** Andere Untersuchungen geben hier jedoch teils deutlich höhere Zahlen an: Untersuchungen der Entwicklung der hitzebedingten Todesfälle über einen verlängerten Zeitraum ermittelten zeigt für das Jahr 2018 eine Übersterblichkeit von 8.700 Personen und für 2019 von 6.900 Personen durch Hitzebelastung in Deutschland (Winklmayr et al., 2022).<sup>18</sup> Eine Untersuchung des

<sup>17</sup> Neben methodischen Unterschieden gibt es teils auch Unterschiede bei der Berücksichtigung bzw. Definition eines hitzebedingten Todesfalls. So wird beispielsweise zwischen Fällen, in denen der Hitzestress der Haupt-Risikofaktor der Sterblichkeit war und zwischen Fällen, in denen die Hitze eine bereits bestehende Erkrankung verschlimmert hat, und so nur ein Teil der Todesursache war unterschieden (Chiabai et al., 2018).

<sup>18</sup> Die Untersuchung von Winklmayr et al. (2022) wurde nach Fertigstellung der vorliegenden Studie veröffentlicht und ist daher nicht in den Abbildungen der Studie berücksichtigt. Winklmayr et al. (2022) beziffern die Anzahl hitzebedingter Sterbefälle der Jahre 2018-

Lancet Journals geht für Deutschland alleine im Jahr 2018 von einer Übersterblichkeit von 20.200 Personen aus (Watts et al., 2020). Für 2019 liegen derzeit nur gesamt-europäische Daten vor - hier verstarben insgesamt 94.100 Personen hitzebedingt. Die Anzahl von 7.5000 Personen ist somit als eine stark konservative Schätzung anzusehen.

Neben den verschiedenen Modellierungsansätzen zur Ermittlung der Anzahl der Todesfälle und der so entstehenden Bandbreite an Ergebnissen, wird intensiv darüber diskutiert ob und wie Todesfälle in monetären Kosten ausgedrückt werden. Es bestehen verschiedene Ansätze zur Berechnung der aus ihnen entstehenden volkswirtschaftlichen Verluste:

- 1. Der Value of a Statistical Life-Ansatz (VSL)** beruht auf Zahlungsbereitschaftsanalysen von Personengruppen zur Abwendung konkreter Gesundheits- bzw. Sterberisiken. Er unterscheidet sich (aufgrund der global unterschiedlichen Verfügbarkeit monetärer Ressourcen) zwischen Ländern deutlich, und sogar zwischen Männern und Frauen bestehen Unterschiede (Kniesner und Viscusi, 2019).
- 2. Der Value of a Life Year-Ansatz (VOLY)** kombiniert den Ansatz des VSL mit der durchschnittlichen Lebenserwartung und dem bereits bestehenden Alter einer Person.
- 3. Der Quality-adjusted Value of a Life Year-Ansatz (QALY)** bezieht in der Untersuchung (insbesondere des Nutzens von gesundheitsfördernden Maßnahmen) einen Qualitätsfaktor mit ein. Dieser besagt, dass in Abhängigkeit von der körperlichen Kondition eines Menschen ein Leben einen anderen Wert besitzt, da die Lebensqualität, der Komfort und auch die ökonomische Leistungsfähigkeit der Person unterschiedlich sind (Health and Safety Executive, 2020).

Es zeigt sich, dass je nach Wahl des Quantifizierungsansatzes extreme Spannweiten zwischen den ermittelten Schadenskosten durch die Todesfälle auftreten (Chiabai et al, 2018). In Relation zu den weiteren ermittelten Schäden und Kosten der Klimawandelfolgen könnten die Schadenskosten der Todesfälle somit entweder insignifikant wirken oder alle weiteren Schadensdimensionen um ein Vielfaches überragen. Zusätzlich zu diesen methodischen Einschränkungen stellt sich die Frage, inwiefern eine Übertragung eines menschlichen Lebens in einen volkswirtschaftlichen Wert erfolgen sollte, insbesondere, wenn dieser auf der Annahme (bspw. beim VSL-Ansatz) beruht, dass den Leben unterschiedliche Werte je nach Alter und Herkunftsland zugewiesen werden.

**Im Kontext dieser Untersuchung wird keine Monetarisierung der hitzebezogenen Todesfälle vorgenommen** - zum einen aufgrund der beschriebenen moralisch-ethischen Fragen und zum anderen aufgrund großer methodischer Unsicherheiten der Quantifizierung in der Forschung. Die (nicht in einen volkswirtschaftlichen Wert übersetzte) Anzahl der Todesfälle stellt nichtsdestotrotz einen relevanten Gradmesser für den Fortschritt des Klimawandels bzw. die Erfolge der Anpassung an ihn dar.

2021 auf insgesamt 21.000, wovon 8700 (2018), 6900 (2019), 3700 (2020) und 1700 (2021). Die Berechnungen von Winklmayr et al. (2022) basieren wie van der Heiden (2020) auf einem generalisierten additiven Modell unter Verwendung von Expositions-Wirkungskurven



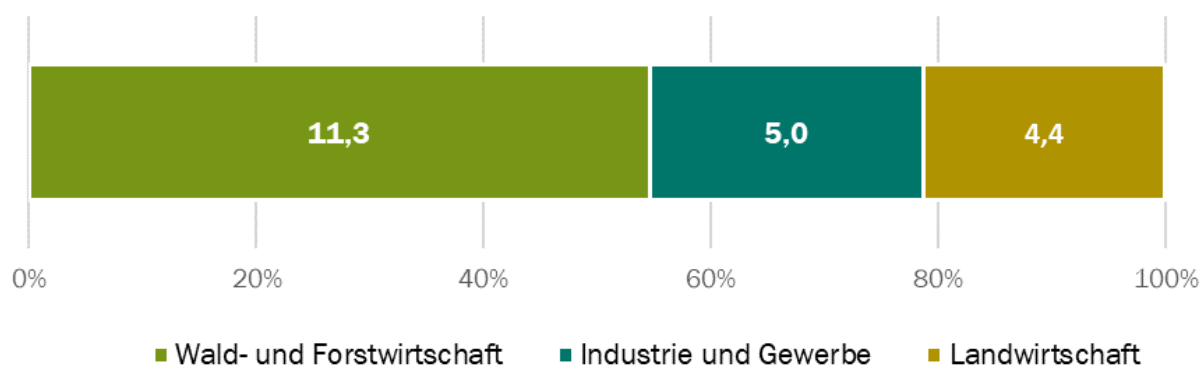
## 5 Zusammenführung der Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, ein fundiertes Gesamtbild der klimawandelbezogenen Folgeschäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 insgesamt sowie für ausgewählte Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) zu liefern. Es zeigt sich, dass die Wirkungsbeziehungen des Klimawandels vielseitig und hochkomplex sind. Aus diesem Grund wurde eine Eingrenzung auf die wesentlichen Schadensindikatoren vorgenommen, entlang derer entstandene monetäre Schäden identifiziert und berechnet wurden. Es handelt sich somit lediglich um einen Teil der aufgetretenen Schäden. Die Schadenssumme dürfte in Wirklichkeit noch deutlich höher liegen.

### 5.1 Gesamtübersicht der Schäden

Die direkten Schäden der Hitze- und Dürreextreme 2018 und 2019 über die drei untersuchten Handlungsfelder hinweg betragen insgesamt 20,7 Mrd. € (siehe Abbildung 5). Die größten Schadenssummen sind hierbei im Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft entstanden, gefolgt von der Industrie und dem Gewerbe, sowie der Landwirtschaft.

Abbildung 5: Direkte Schäden der Hitze- und Dürreextreme 2018/2019 nach den DAS-Handlungsfeldern (Mrd. €)



Eigene Darstellung und Berechnung

Alle drei betrachteten Handlungsfelder weisen im gesamtwirtschaftlichen Vergleich darüber hinaus einen hohen Anteil indirekter Folgeschäden auf: In Land- sowie Forstwirtschaft entstehen (basierend auf dem Median der Faktoren aus den im Zuge der Literaturanalyse identifizierten Papieren) für jeden Euro direkter Schäden 77 Cent weiterer Folgeschäden. Im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe liegt das Verhältnis kumuliert sogar bei einem Euro zu 96 Cent, sodass sich hier die **direkten und indirekten Schäden beinahe die Waage halten**.

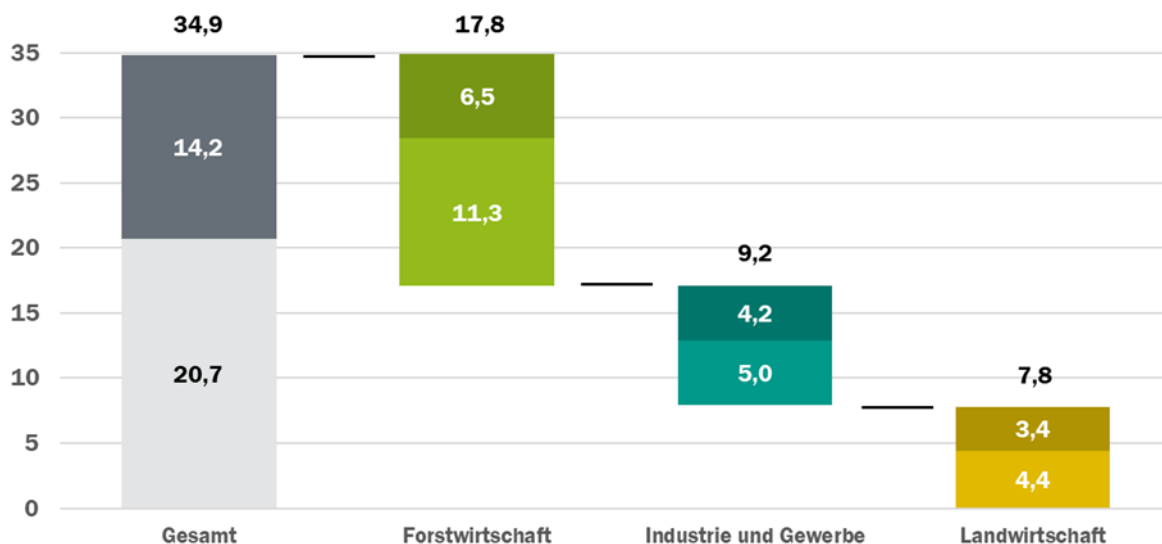
**Tabelle 19: Zusammenstellung aller betrachteten Kosten durch Klimawandelfolgen der Hitze- und Dürreextreme 2018 und 2019**

Handlungsfeld	Indikatorenname	2018			2019			2018 und 2019 zusammen		
		direkt	indirekt	gesamt	direkt	indirekt	gesamt	direkt	indirekt	gesamt
Landwirtschaft	Ertragsverluste von Winterweizen durch Hitze und Trockenheit	680	408 - 578	1.088 - 1.258	312	187 - 265	500 - 578	992	595 - 843	1.588 - 1.836
	Ertragsverluste von Silomais durch Hitze und Trockenheit	529	318 - 450	847 - 980	298	179 - 253	477 - 552	828	497 - 704	1.324 - 1.531
	Ertragsverluste weiterer Feldfrüchte durch Hitze und Trockenheit	1.778	1.067 - 1.511	2.844 - 3.288	826	495 - 702	1.321 - 1.527	2.603	1.562 - 2.213	4.165 - 4.816
Forstwirtschaft	Kosten in der Rohholzproduktion	2.891	1.735 - 2.457	4.626 - 5.349	5.579	3.348 - 4.742	8.927 - 10.322	8.471	5.082 - 7.200	13.553 - 15.670
	Kosten durch Verluste in der Klimaschutzleistung	974	-	974	1.879	-	1.879	2.853	-	2.853
Industrie und Gewerbe	Hitzebedingte Minderung der Arbeitsproduktivität	2.727	1.902 - 2.893	4.629 - 5.620	2.267	1.578 - 2.400	3.845 - 4.667	4.994	3.480 - 5.293	8.474 - 10.287
<b>Gesamt</b>		<b>9.579</b>	<b>5.430 - 7.889</b>	<b>15.008 - 17.469</b>	<b>11.161</b>	<b>5.787 - 8.362</b>	<b>16.949 - 19.525</b>	<b>20.741</b>	<b>11.216 - 16.253</b>	<b>31.957 - 36.993</b>

Eigene Berechnungen und Zusammenstellung. Eventuell auftretende Unterschiede in den Aufsummierungen sind auf Rundungsunschärfen zurückzuführen. Die indirekten Schäden geben hier das 90%-Konfidenzintervall der auftretenden Spannweiten an.

Somit entstehen über die drei betrachteten Handlungsfelder hinweg im Median ca. 14 Mrd. € indirekte Schäden (siehe Abbildung 6), das 90%-Konfidenzintervall liegt zwischen rund 11 und 16 Mrd. €. **Das kumulierte Gesamtschadensausmaß aller in der vorliegenden Studie betrachteten Kosten der Hitze- und Dürreextreme 2018 und 2019 liegt im Median bei rund 35 Mrd. € und unter Betrachtung des Konfidenzintervalls zwischen 32 und 37 Mrd. €** (siehe Tabelle 19).

Abbildung 6: Übersicht über die Zusammensetzung der Gesamtschäden der Hitze- und Dürresommer 2018 und 2019 (Mrd. €)



Eigene Darstellung und Berechnung. Der untere (hell eingefärbte) Wert gibt die Höhe der direkten Schäden an, der obere stellt den Median der ermittelten Spannweiten der indirekten Schäden dar.

### i

#### Exkurs: Aufteilung der Schäden auf die DAS-Handlungsfelder

Für die Nutzung der Ergebnisse der entstandenen Schäden der Hitze- und Dürresommer 2018/2019 wurde in einem weiteren Arbeitsschritt die Möglichkeit geprüft, die Schäden auf die Handlungsfelder der DAS zu verteilen. Hierzu wurden den 19 untersuchten Branchen der Volkswirtschaft die inhaltlich korrespondierenden Handlungsfelder der DAS zugewiesen und wo dies möglich war, eine entsprechende Aufteilung der Schadenssummen vorgenommen.

Es zeigte sich, dass eine weitere Aufteilung der Folgeschäden der betrachteten Indikatoren aus den **Handlungsfeldern Landwirtschaft sowie Wald- und Forstwirtschaft** grundsätzlich möglich ist, im Rahmen der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht durchführbar war: Für eine präzise Annäherung müssten hierzu die aufgetretenen direkten Schäden in eines, bestenfalls regionalisierten Input-Output-Modells für Deutschland gespielt werden, um zu ermitteln, welche Wirtschaftssektoren von der verminderten Produktion der beiden Bereiche (bspw. durch Positionierung in der nachgelagerten Wertschöpfungskette) in welcher Höhe betroffen sind.

Für den Indikator der **hitzebedingten Produktivitätsminderung** sind dagegen detailliertere Aussagen zur Betroffenheit der weiteren Handlungsfelder der DAS durch die Schäden möglich. Dieser ist zwar in der Logik der DAS sowohl im Handlungsfeld Industrie und Gewerbe als auch im Handlungsfeld Menschliche Gesundheit zu finden, bedingt durch die angewandte Berechnungsmethode basierend auf den branchenspezifischen Auswirkungen der Hitze lassen sich die Schäden hier auch weiter nach

Handlungsfeldern unterteilen. Auf Basis der Zuordnung der Wirtschaftssektoren konnten dann die Schadenssummen entsprechend ‚umgeschlüsselt‘ werden.

Die Auswertung der direkten und indirekten Schäden in diesem Bereich zeigt, dass das Handlungsfeld **Industrie und Gewerbe** (aufgrund seiner absoluten Größe, sowie der vergleichsweise geringen Abdeckung mit Anpassungsmaßnahmen) die Schadenssummen mit ca. einem Drittel des Gesamtschadens (3,5 der insgesamt 9,2 Mrd. € Schäden) dominiert. Weitere stark betroffene Handlungsfelder sind die **Menschliche Gesundheit** (mit einem hohen Anteil direkter Schäden) und das **Bauwesen** (beide ca. 1,1 Mrd. € Schäden). Es wird jedoch auch deutlich, dass insbesondere im Dienstleistungsbereich nicht immer eine eindeutige Zuordnung der Sektoren auf die Handlungsfelder der DAS möglich ist. Die **nicht zuordnungsfähigen Schäden** belaufen sich in diesem Bereich auf ca. 1,7 Mrd. € und stellen damit den zweitgrößten Schadensposten.

## 5.2 Weiterer Forschungsbedarf

Aufgrund der methodischen Komplexität (siehe Infobox) konnte unter anderem eine Aufteilung der in Land- sowie Forstwirtschaft angefallenen Schäden nicht nach den Handlungsfeldern der DAS vorgenommen werden. Eine entsprechende Untersuchung unter **Einbeziehung eines, bestenfalls regionalisierten, Input-Output-Modells für Deutschland** im Nachgang des Vorhabens kann helfen, Abhängigkeiten und indirekte Vulnerabilitäten der nachgelagerten Sektoren zu bestimmen. Insbesondere vor dem Hintergrund des hohen Gesamtschadensausmaßes der beiden primär produzierenden Bereiche besitzt dies eine gesteigerte Relevanz, um Versorgungsengpässen vorzubeugen und die allgemeine Anpassungskapazität der Wirtschaft zu steigern. Es zeigt sich auch, dass die Zuordnung der Wirtschaftszweige auf die Handlungsfelder der DAS nicht ohne Limitationen ist. So ist bspw. nicht zwangsläufig klar, welchem Handlungsfeld die Schäden eines Unternehmens der Energieversorgung zuzuordnen sind, da sowohl das Handlungsfeld Gewerbe und Industrie als auch Energiewirtschaft infragekommen. Gleichzeitig sind bspw. Schäden in den sozialen, nicht-medizinischen Bereichen (bspw. an sozialen Infrastrukturen bzw. den Menschen, die in diesen tätig sind), von keinem der bestehenden Handlungsfelder abgedeckt. Hier ist weitergehend zu prüfen, ob sich für die Zukunft eine Aufteilung der Schäden anhand anderer Systematisierungskriterien zielführender gestaltet, oder ob diese Erkenntnisse in einer ggf. zu erfolgenden Überarbeitung der DAS zu einer Schließung der genannten Lücken beitragen können.

Darüber hinaus fokussierte sich die vorliegende Untersuchung auf die Quantifizierung der hitze- und trockenheitsbezogenen Sommerereignisse. **Weiterer Untersuchungsbedarf** besteht daher auch in einem **Vergleich der Schadensstruktur und -höhen mit anderen klimawandelbedingten Extremereignissen**, wie bspw. einem Hochwasser- oder Sturzflutereignis. Dieser Vergleich kann helfen, spezifische Betroffenheiten und somit Anpassungserfordernisse zu identifizieren. Im Rahmen des Projekts „Kosten durch Klimawandelfolgen“ wurde eine solche Untersuchung für den Vergleich mit dem Sturzflutereignis des Juli 2021 durchgeführt (Trenczek et al., 2022a und 2022b).

Darüber hinaus gibt es jedoch auch in Bezug auf die Hitzeereignisse weiteren Forschungsbedarf, was die Verteilung der angefallenen Kosten angeht. Bisherige Ansätze diskutieren bspw. die **Verteilung der Schäden in Bezug auf Gender- oder weitere soziale Aspekte** nur ungenügend an. Auch der hier vorgestellte Ansatz kann dies nur über eine qualitative Interpretation der Daten leisten: Zeigt sich zum Beispiel, dass in den häufig von prekären Arbeitsbedingungen und -verhältnissen geprägten Sektoren der Landwirtschaft, des Bergbaus und des Bauwesens zusätzlich zur hohen körperlichen Belastung und den geringen Einkommen auch noch eine hohe Exposition gegenüber Hitze besteht, so ist davon auszugehen, dass diese insbesondere sozial und einkommensschwache Personen (die häufig auch in ihrer häuslichen oder privaten Umgebung nur geringe Anpassungskapazitäten besitzen) überdurchschnittlich belastet. Auch eine **Aufschlüsselung der hitzebedingten Produktivitätsverluste nach Altersgruppen** kann weitere Erkenntnisse über die soziale Komponente der Klimafolgekosten geben, wurde aber aufgrund fehlender Forschungsdaten zu den altersspezifischen hitzebedingten Produktivitätsverlusten in der vorliegenden Untersuchung nicht weiterverfolgt.

Insbesondere im Bereich der **Attribution der angefallenen Schäden auf den Klimawandel** besteht ebenfalls noch weiterer Forschungsbedarf. Die in der vorliegenden Studie berechneten Kosten von ca. 35 Mrd. € beziehen Schäden, die auf Temperatur- oder Trockenheitsphänomene zurückführbar sind, in die Summe mit ein. Sie geben jedoch noch keinen Aufschluss darüber, für welchen Anteil der Schäden tatsächlich der Klimawandel verantwortlich ist, oder welcher Anteil der Schäden auch in einem Jahr mit „normalem“ Klima zu erwarten gewesen wäre. Dies liegt in der Kernaussage der Attributionsforschung begründet: Diese kann lediglich die Veränderung der statistischen Auftrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses durch den Klimawandel wiedergeben, jedoch (noch) nicht ermitteln, wie sehr sich ein spezifisches Ereignis durch den Klimawandel intensiviert hat. Eine Möglichkeit, sich hier an die attribuierbaren Schäden anzunähern, besteht über den **jährlichen Schadenserwartungswert** eines Ereignisses. Für die Ereignisse des Jahres 2018 gibt es für Deutschland keine zuverlässige Attributionsaussage, lediglich für Nordeuropa wurde eine bis zu fünf Mal erhöhte Wiederkehrhäufigkeit des Ereignisses festgestellt (WWA, 2018c). Die Ereignisse des Jahres 2019, die laut der vorliegenden Untersuchung 18,5 Mrd. € der insgesamt 35 Mrd. € Schäden verursachten, werden für Deutschland als Ereignisse mit „Wiederkehrzeiten zwischen mehreren Jahrzehnten und wenigen Jahrhunderten“ klassifiziert, deren Auftrittswahrscheinlichkeit durch den Klimawandel jedoch um den Faktor 10 erhöht wurde (WWA, 2019c).

Bei einer Wiederkehrzeit des Ereignisses alle 100 Jahre, was laut WWA die obere Grenze der Auftrittswahrscheinlichkeit der Hitze- und Dürreextreme darstellt, liegt der jährliche Schadenserwartungswert bei 185 Mio. €. Erhöht sich die Auftrittswahrscheinlichkeit um den Faktor 10 (auf 10 Jahre), so beträgt der **jährliche Schadenserwartungswert 1,85 Mrd. €**, was einem **klimawandelbedingten Anstieg um 1,67 Mrd. €** (90% der Gesamtschäden) entsprechen würde. Bei einer Wiederkehrzeit alle 300 Jahre (laut WWA die untere Grenze der Auftrittswahrscheinlichkeit) liegt der jährliche Schadenserwartungswert für das Ereignis bei rund 62 Mio. €. Eine Erhöhung der Auftrittswahrscheinlichkeit um den Faktor 10 führt zu einem jährlichen Schadenserwartungswert von 617 Mio. € (was einer klimawandelbedingten Differenz von 555 Mio. € entspräche). Da jedoch noch keine vollständige Attribution der Hitzewellen 2018 für Deutschland feststeht, kann diese Aussage vorerst nur für die Ereignisse des Jahres 2019 getroffen werden - für ein umfassendes Bild sind folglich weitere Attributions- und Schadensuntersuchungen nötig. Unstrittig ist jedoch, dass die Hitze- und Dürreextreme zu enormen Schäden geführt haben, für die bisher kein Gesamtbild vorlag. Die vorliegende Studie schließt diese Lücke auf Basis ausgewählter, belastbarer Schadensindikatoren. **Die resultierende Bilanz aller in der vorliegenden Studie betrachteten Schäden und Kosten: Rund 35 Mrd. € monetäre Kosten und insgesamt 7.500 Menschen, die ihr Leben verloren.**

---

## Quellenverzeichnis

---

Acosta-Navarro, J. C.; Ortega, P.; Garcia-Serrano, J.; Guemas, V.; Tourigny, E.; Cruz-Garcia, R.; Massonnet, F.; Doblás-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.

Axnick, M. (2021): Hitzebedingte Sterblichkeit in Berlin und Brandenburg. In: Zeitschrift für amtliche Statistik Berlin Brandenburg 1, 2021, S. 34- 39.

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

Bayerischer Bauernverband (2019): Darum schützen wir Pflanzen – Teil 2: Bayern blüht gelb. Rapsblüte 2019 bricht an. Online verfügbar: <https://www.bayerischerbauernverband.de/presse/darum-schuetzen-wir-pflanzen-teil-2-bayern-blueht-gelb-7197?lat=51.2325201&long=6.7932122> (abgerufen am: 16.11.2021).

Beck, W. (2010): Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland - waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMELV. In: Nagel J., (ed) Beiträge / Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Jahrestagung 17. - 19. Mai 2010, Körbecke am Möhnesee. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, pp 56-65.

Bettgenhäuser, K.; Boermanns, T.; Offermann, M.; Krechting, A.; Becker, D. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Climate Change 10/2011. Verfügbar unter: <http://www.uba.de/uba-info-medien/3979.html> (abgerufen am: 22.10.2021).

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](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](http://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20190801_hitzerekord_juli2019.pdf).

BMEL (2016): Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012. Verfügbar unter: [https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE\\_MASTER/content/Downloads/BMEL\\_BWI\\_Bericht\\_Ergebnisse\\_2012\\_RZ02\\_web-4.pdf](https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/BMEL_BWI_Bericht_Ergebnisse_2012_RZ02_web-4.pdf) (abgerufen am: 14.01.2022).

BMEL (2017): Extremwetterlagen in der Land- und Forstwirtschaft. Maßnahmen zur Prävention und Schadensregulierung. Verfügbar unter: [https://web.archive.org/web/20181104213242/http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Extremwetterlagen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://web.archive.org/web/20181104213242/http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Extremwetterlagen.pdf?__blob=publicationFile) (abgerufen am 02.06.2021).

BMEL (2019a): Landwirtschaftliche Gesamtrechnung 2018. Erzeugung des landwirtschaftlichen Wirtschaftsbereichs 2018. Verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SGB-0100022-2018.pdf> (abgerufen am: 21.10.2021).

BMEL (2019b): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2018. Verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/EQB-1002000-2018.pdf> (abgerufen am: 21.10.2021).

Bastos, A.; Ciais, P.; Friedlingstein, P.; Sitch, S.; Pongratz, J.; Fan, L.; Wigneron, J. P.; Weber, U.; Reichstein, M.; Fu, Z.; Anthoni, P.; Arneth, 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. *Science advances*, 6(24), eaba2724.

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.

Bux, K. (2006): Klima am Arbeitsplatz. Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen, Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund.

CEDIM, FDA (2018): Dürre & Hitzewelle Sommer 2018 (Deutschland). Report No. 1. Verfügbar unter: [https://www.cedim.kit.edu/download/FDA\\_Duerre\\_Hitzewelle\\_Deutschland\\_report1\\_final\\_2.pdf](https://www.cedim.kit.edu/download/FDA_Duerre_Hitzewelle_Deutschland_report1_final_2.pdf) (abgerufen am 22.10.2021).

Chiabai, A.; Spadaro, J. V.; Neumann, M. B. (2018): Valuing deaths or years of life lost? Economic benefits of avoided mortality from early heat warning systems. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23, S. 1159–1176.

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

Destatis (2021): Korrektur: Trockenheit schadet dem Wald: Durch Insektenbefall verursachter Schadholzeinschlag 2019 im Vergleich zum Vorjahr fast verdreifacht. Pressemitteilung Nr. N 041 vom 27. Juli 2020.

Destatis (2021): Waldschäden: Schadholzeinschlag durch Insektenbefall binnen fünf Jahren mehr als verzehnfacht. Pressemitteilung Nr. 050 vom 4. August 2021.

Diersen, M.A.; Taylor, G.; May, A. (2002): Direct and Indirect Effects of Drought on South Dakota's Economy. Verfügbar unter: [https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1422&context=econ\\_comm](https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1422&context=econ_comm) (abgerufen am: 21.10.2021).

Dhubháin, Á. N.; Fléchar, M. C. ; Moloney, R. ; O'Connor, D. (2009): Assessing the value of forestry to the Irish economy—an input–output approach. *Forest Policy and Economics*, 11(1), 50-55.

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](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\\_nordosten2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180906_waermstersommer_nordosten2018.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](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 Hitze-welle 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](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](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](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](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](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20201217_annulierung_lingen_news.html) (abgerufen am: 16.11.2021).

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



Elsasser, P., Altenbrunn, K., Köthke, M., Lorenz, M., & Meyerhoff, J. (2021). Regionalisierte Bewertung der Waldleistungen in Deutschland (No. 79). Thünen Report.

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).

Freistaat Sachsen (2013): Der Wiederaufbau im Freistaat Sachsen nach dem Hochwasser im Juni 2013. Verfügbar unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/20553> (abgerufen am 20.10.2021).

Fuchs, Tobias (2021): Attribution von Hagelereignissen, persönliches Telefonat im Mai 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.

GDV (2020) Naturgefahrenreport 2020. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer. Verfügbar unter: <https://www.gdv.de/re-source/blob/63610/9fb7d9d95fa0874f312ae871363310fa/naturgefahrenreport-2020--schadenchronik-data.pdf> (abgerufen am 20.10.2021).

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. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.

Health and Safety Executive (2020): A scoping study on the valuation of risks to life and health: the monetary value of a life year (VOLY). Final report. Verfügbar unter: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/903543/voly-scoping\\_study-report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/903543/voly-scoping_study-report.pdf) (abgerufen am: 22.10.2021).

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](https://www.hereon.de/innovation_transfer/communication_media/news/099294/index.php.de) (abgerufen am 13.06.2021).

Hermes, J.; von Haaren, C.; Schmücker, D.; Albert, C. (2021): Nature-based recreation in Germany: Insights into volume and economic significance. In: *Ecological Economics* 188:107136.

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).

Horridge, M.; Madden, J.; Wittwer, G. (2003): Using a Highly Disaggregated Multi-Regional Single-Country Model to Analyse the Impacts of the 2002-03 Drought on Australia. General Working Paper No. G-141, Centre of Policy Studies and the Impact Project.

Hsiang, S.; Kopp, R.; Jina, A.; Rising, J.; Delgado, M.; Shashank, M.; Rasmussen, D. J.; Muir-Wood, R.; Wilson, P.; Oppenheimer, M.; Larsen, K.; Houser, T. (2017): Estimating economic damage from climate change in the United States. In: *Science*, Vol. 356, No. 6345. S. 1362-1369.

Hübler, M.; Klepper, G.; Peterson, S. (2007): Costs of Climate Change. The Effects of Rising Temperatures on Health and Productivity in Germany. Kiel Working Paper No. 1321.

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).

IEA (2018): The Future of Cooling. Opportunities for energy- efficient air conditioning. Verfügbar unter: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The\\_Future\\_of\\_Cooling.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf) (abgerufen am 22.10.2021).

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 pre-industrial 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.

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.; Schausser, 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](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf) (abgerufen am 20.10.2021).

Karlsson, M; Ziebarth, N. R. (2018): Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany. In: Journal of Environmental Economics and Management, Volume 91, September 2018, Pages 93-117.

Kjellstrom, T.; Briggs, D.; Freyberg, C.; Lemke, B.; Otto, M.; Hyatt, O. (2016): Heat, Human Performance, and Occupational Health: A Key Issue for the Assessment of Global Climate Change Impacts. In: Annual Review Public Health 2016. 37, S. 97-112.

Kniesner, T.J.; Viscusi, W.K. (2019): The Value of a Statistical Life. In: Oxford Research Encyclopedias. Verfügbar: <https://oxfordre.com/economics/view/10.1093/acrefore/9780190625979.001.0001/acrefore-9780190625979-e-138> (abgerufen am: 22.10.2021).

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).

Landesregierung Sachsen-Anhalt (2014): Bericht der Landesregierung zur Hochwasserkatastrophe 2013. Verfügbar unter: [https://hochwasser.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik\\_und\\_Verwaltung/StK/Hochwasser/Dokumente/Bericht\\_der\\_Landesregierung\\_zur\\_Hochwasserkatastrophe\\_2013\\_\\_27-05-14-incl-redakt-AEnderungen.pdf](https://hochwasser.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/StK/Hochwasser/Dokumente/Bericht_der_Landesregierung_zur_Hochwasserkatastrophe_2013__27-05-14-incl-redakt-AEnderungen.pdf) (abgerufen am 20.10.2021).

Landwirtschaftskammer Österreich (2021): Richtpreise für den Verkauf von Silomais ab Feld 2021. Online verfügbar unter: <https://www.lko.at/richtpreise-f%C3%BCr-den-verkauf-von-silomais-ab-feld-2021+2400+3472277> (abgerufen am: 22.11.2021).

Martin-Ortega, J.; González-Eguino, M.; Markandya, A. (2012): The costs of drought: the 2007/2008 case of Barcelona. In: *Water Policy* 14 (2012) 539–560.

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.

Pissarskoi, E.; v. Möllendorff, C.; Sterba, M-B. (2015): Abschätzung von Kosten und Nutzen der Anpassung an Hitzeereignisse - Fallstudie für die Stadt Köln. Verfügbar unter: <http://www.oekonomie-klimawandel.de/veroeffentlichungen-downloads.html> (abgerufen am: 01.12.2021).

Quintano, P. N.; Barredo, J. I. (2015): A database of the recreational value of European forests. Design and implementation from recreational valuation studies, Verfügbar unter: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC95103> (abgerufen am: 14.01.2022).

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.

Seppänen, O.; Fisk, W.J.; Faulkner, D. (2004): Control of temperature for health and productivity in offices. Verfügbar unter: <http://escholarship.org/uc/item/39s1m92c> (abgerufen am 22.10.2021).

Sieg, T.; Schinko, T.; Vogel, K.; Mechler, R.; Merz, B.; Kreibich, H. (2019): Integrated assessment of short-term direct and indirect economic flood impacts including uncertainty quantification.

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.

Thünen-Institut für Int. Waldwirtschaft und Forstökonomie (2021): Holzeinschlag und Verwendung. Verfügbar unter: <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/> (abgerufen am 20.10.2021).

Tol, R. (2018): The Economic Impacts of Climate Change. In: Review of Environmental Economics and Policy, volume 12, issue 1, Winter 2018, pp. 4-25.

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

Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H.; Peter, M.; Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/4298.pdf> (abgerufen am: 01.12.2021).

UBA (2016): Erläuterungen zu den Klimawirkungsketten. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten\\_umweltbundesamt\\_2016.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten_umweltbundesamt_2016.pdf) (abgerufen am: 16.06.2021).

UBA (2019) Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie. Indikator-Factsheets zum Handlungsfeld Wald und Forstwirtschaft. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4770/dokumente/fw-i-5\\_indikator\\_schadholz\\_buchdrucker\\_2019.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4770/dokumente/fw-i-5_indikator_schadholz_buchdrucker_2019.pdf) (abgerufen am 11.10.2021).

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).

UNFCCC (2021): Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report by the secretariat. Verfügbar unter: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021\\_08\\_adv\\_1.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_08_adv_1.pdf) (abgerufen am 20.10.2021).

van Oldenborgh, G. J.; Otto, F. E. L.; Hausteijn, 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.; Hausteijn, 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.; Hausteijn, 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.; Abruzy, 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.; Madsen, J.; Holobaca, I. H.; Fratanni, S.; Acquafredda, 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.; Gasparrini, A. (2021): The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. In: *Nature Climate Change*. 11. S.492-500.

Watts, N.; Amann, M.; Arnell, N.; Ayeb-Karlsson, S.; Beagley, J.; Belesova, K.; Boykoff, M.; Byass, P.; Cai, W.; Campbell-Lendrum, D.; Capstick, S.; Chambers, J.; Coleman, S.; Dalin, C.; Daly, M.; Dasgupta, N.; Dasgupta, S.; Davies, M.; Di Napoli, C.; Dominguez-Salas, P.; Drummond, P.; Dubrow, R.; Ebi, K. L.; Eckelman, M.; Ekins, P.; Escobar, L. E.; Georgeson, L.; Golder, S.; Grace, D.; Graham, H.; Hagggar, P.; Hamilton, I.; Hartinger, S.; Hess, J.; Hsu, S.-C.; Hughes, N.; Mikhaylov, S. J.; Jimenez, M. P.; Kelman, I.; Kennard, H.; Kiesewetter, G.; Kinney, P. L.; Kjellstrom, T.; Kniveton, D.; Lampard, P.; Lemke, B.; Liu, Y.; Liu, Z.; Lott, M.; Lowe, R.; Martinez-Urtaza, J.; Maslin, M.; McAllister, L.;

McGushin, A.; McMichael, C.; Milner, J.; Moradi-Lakeh, M.; Morrissey, K.; Munzert, S.; Murray, K. A.; Neville, T.; Nilsson, M.; Sewe, M. O.; Oreszczyn, T.; Otto, M.; Owfi, F.; Pearman, O.; Pencheon, D.; Quinn, R.; Rabbaniha, M.; Robinson, E.; Rocklöv, J.; Romanello, M.; Semenza, J. C.; Sherman, J.; Shi, L.; Springmann, M.; Tabatabaei, M.; Taylor, J.; Triñanes, J.; Shumake-Guillemot, J.; Vu, B.; Wilkinson, P.; Winning, M.; Gong, P.; Montgomery, H.; Costello, A.; (2021): The 2020 report of the Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises. *Lancet* 2021; 397, S. 129–170.

Winklmayr, C; Muthers, S; Niemann, H; Mücke, HG; an der Heiden, M (2022): Heat-related mortality in Germany from 1992 to 2021. *Dtsch Arztebl Int* 2022; 119: 451–7.

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel, Verfügbar unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/\\_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf;jsessionid=A8BACF88E8D045A37C16BB83D3ADABCD.live842?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf;jsessionid=A8BACF88E8D045A37C16BB83D3ADABCD.live842?__blob=publicationFile&v=2) (abgerufen am 14.01.2022).

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. 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 (2018c): Heatwave in northern Europe, summer 2018. Veröffentlicht am: 28.07.2018. Verfügbar unter: <https://www.worldweatherattribution.org/attribution-of-the-2018-heat-in-northern-europe/> (abgerufen am: 23.11.2021).

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).

---

# Anhang

---

## Zusammensetzung des Review-Gremiums

<b>Person</b>	<b>Funktion</b>
Dr. Olaf Burghoff	Leitung Statistik und Naturgefahrenmodellierung des GDV Berlin
Horst Gömann	Leitung Fachbereich Landbau und Nachwachsende Rohstoff, Landwirtschaftskammer NRW
Dr. Markus Groth	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Climate Service Center Germany (GERICS) des Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, Schwerpunkt Analyse und ökonomische Bewertung von Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiesektor und weitere „Kritische“ Infrastrukturen.
Prof. Dr. Dea Niebuhr	Professorin für „Health Technology Assessment und Gesundheitssystemdesign“ und Leitung des Promotionszentrums Public Health, Mitglied in der AG Klimawandel und Gesundheit, Hochschule Fulda
Prof. Dr. Annegret Thieken	Arbeitsgruppenleitung Geographie und Naturrisikenforschung am Institut für Umweltwissenschaften und Geographie Potsdam
Dr. Leonie Wenz	Arbeitsgruppenleiterin, Stv. Abteilungsleiterin, Arbeitsgruppe Komplexitätsforschung/ Data-based analysis of climate decisions am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

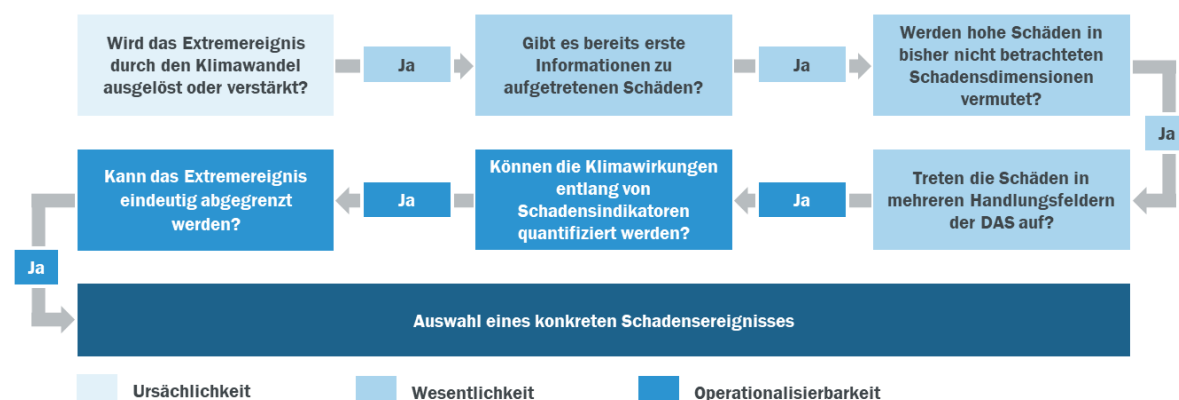
## Auswahl und Priorisierung zu untersuchender Extremereignisse (Auszug aus dem zugehörigen Bericht zum Forschungsvorhaben „Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland“)

Die verschiedenen Extremereignisse, die im Kontext des fortschreitenden Klimawandels relevant werden, unterscheiden sich in ihrer räumlichen Ausprägung sowie den durch sie betroffenen Handlungsfeldern der DAS und den insgesamt auftretenden Schäden deutlich. Im Folgenden soll sich daher auf die Betrachtung eines einzelnen Extremereignisses fokussiert und dieses in seinen relevantesten Schadensdimensionen exploriert und quantifiziert werden. Hierbei wird auf einen mehrstufigen **Analysepfad** zurückgegriffen, der für jedes Extremwetterereignis, das volkswirtschaftliche Kosten bzw. Schäden verursacht, Anwendung findet. Der Analysepfad (siehe Abbildung 2) besteht aus sechs Leitfragen und ermöglicht in der Folge 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 7: Vorgehen zur Auswahl des zu untersuchenden klimawandelbedingten Schadensereignisses



Eigene Darstellung

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.



#### 4. 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 Klimawandel 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- Projekts (WWA) 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.

#### 5. 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.

#### 6. 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.

#### **7. 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 an den Klimawandel (DAS) 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“).

#### **8. 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.

#### **9. 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. Bspw. 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.

Im Folgenden 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.

## 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, 2021). 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.**

## Starkregen und 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, insbesondere 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 Auftrittswahrscheinlichkeit 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; Muddelsee 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 zeigen statistische Analysen, dass es im Vergleich zu den 1950er Jahren heute etwa drei bis vier zusätzliche Sturmtage in Norddeutschland gibt. Laut dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht lassen sich diese jedoch nicht auf die Folgen menschengemachter

Treibhausgasemissionen zurückführen. Insgesamt ist aufgrund starker Schwankungen von Jahr zu Jahr kein signifikanter Trend in der Sturmhäufigkeit zu erkennen (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. (2022a).

## Sturm

Starker Wind im Rahmen der Beaufort-Skala, von 74 bis 117 km/h, wird als Sturm bezeichnet (DWD, 2021). 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 der 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. 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.**

## Hitzewellen

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, 2021). 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 (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 verschnellern 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-Cabrerera 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.

## Dürre (Trockenperiode)

Unter Dürre wird eine hydrologische, landwirtschaftliche und ökologische Wasserknappheit über einen langanhaltenden Zeitraum verstanden (Tate und 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). 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. 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; 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.**

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 Mrd. 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 Mio. Kubikmeter, mit einem Gesamtschaden von 2,5 Mrd. € (Stuttgarter Nachrichten, 2019). Schwierigkeiten bei der Bewertung von Waldschäden durch den Verlust von Ökosystemdienstleistungen deuten allerdings auf eine hohe Dunkelziffer hin. So schätzen Möhring et al. (2021) die ökonomischen Gesamtschäden der Extremwetterereignisse der Jahre 2018 bis 2020 in der Forstwirtschaft auf fast 13 Mrd. Euro.

Die Folgen anhaltender Trockenheit umfassen ebenfalls sinkende Flusswasserstände, die zu Kosten durch Lieferkettenunterbrechungen und Produktionsausfällen führen können. Bspw. gibt der Chemiekonzern BASF an, im Zuge des extremen Rheinniedrigwassers von September bis Dezember 2018 Kosten i.H.v. 250 Mio. € 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 hin, 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 bspw. 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 das Extremereignis hinsichtlich des Aspekts der Operationalisierbarkeit als Gegenstand einer vertieften Analyse eines klimawandelbedingten Schadensereignisses geeignet.** Allerdings empfiehlt sich eine weiter gesteckte Abgrenzung des Schadensereignisses auf mehrere Perioden.



---

# Impressum

---

Schäden der Dürre- und Hitzeextreme 2018 und 2019  
Eine ex-post-Analyse

---

## 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](mailto:info@prognos.com)  
[www.prognos.com](http://www.prognos.com)  
[twitter.com/Prognos\\_AG](https://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](mailto: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).