

Wolter, Marc Ingo; Bernardt, Florian; Daßler, Jannik; Reuschel, Saskia; Stöver, Britta

Research Report

Klimafolgen und Anpassung - 2024: Aus den Arbeiten zur Basisprojektion des INFORGE-Modells 2024

GWS Research Report, No. 2024/2

Provided in Cooperation with:

GWS - Institute of Economic Structures Research, Osnabrück

Suggested Citation: Wolter, Marc Ingo; Bernardt, Florian; Daßler, Jannik; Reuschel, Saskia; Stöver, Britta (2024) : Klimafolgen und Anpassung - 2024: Aus den Arbeiten zur Basisprojektion des INFORGE-Modells 2024, GWS Research Report, No. 2024/2, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), Osnabrück

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/289856>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

GWS Research Report 2024/2

Klimafolgen und Anpassung – 2024

Aus den Arbeiten zur Basisprojektion des
INFORGE-Modells 2024

Marc Ingo Wolter

Florian Bernardt

Jannik Daßler

Saskia Reuschel

Britta Stöver

Impressum

Autor:innen

Florian Bernardt

Tel: +49 541 40933-285, E-Mail: bernhardt@gws-os.com

Jannik Daßler

Tel: +49 541 40933-263, E-Mail: daßler@gws-os.com

Saskia Reuschel

Tel: +49 541 40933-283, E-Mail: bernhardt@gws-os.com

Dr. Britta Stöver

Tel: +49 541 40933-250, E-Mail: bernhardt@gws-os.com

Dr. Marc Ingo Wolter

Tel: +49 541 40933-150, E-Mail: wolter@gws-os.com

Titel

Klimafolgen und Anpassung – 2024

Aus den Arbeiten zur Basisprojektion des INFORGE-Modells

Veröffentlichungsdatum

© GWS mbH Osnabrück, April 2024

Lektorat

Inka Peters

Haftungsausschluss

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung des Verfassers / der Verfasser und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH wider.

Herausgeber der GWS Research Report Series

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 2196-4262

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	4
1 Klimafolgen und Klimafolgenanpassung	1
2 Klimafolgen	2
2.1 Wetter, Extremereignisse und Klimawandel	4
2.2 Die Annahmen zu den Effekten des Klimawandels	9
2.3 Kosten des Klimawandels im Überblick	13
3 Massnahmen zur Klimafolgenanpassung	15
3.1 Annahmen zur Klimafolgenanpassung im Einzelnen	15
4 Literatur	17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prognos und GDV im Vergleich	2
Abbildung 2: Erfasste Klimaschäden und mögliche Ableitungen daraus	3
Abbildung 2: Anzahl der Tage, an denen an mindestens einer Wetterstation in Deutschland 35 °C oder mehr gemessen wurden, 1900 bis 2023	4
Abbildung 3: Jahresmittel der Temperatur in Deutschland von 1900 bis 2023	5
Abbildung 4: Jahresgradtage von Deutschland im Zeitraum von 2010 bis 2023	6
Abbildung 5: Anzahl der Tage, an denen an mindestens einer Wetterstation in Deutschland eine Niederschlagshöhe von 40 mm pro Stunde oder mehr gemessen wurde, 1995 bis 2023	7
Abbildung 6: Mittlere Anzahl der Tage mit Bodenfeuchtwerten <30 %nFK auf lehmigem Sand- und sandigem Lehmboden in Deutschland, 1991 bis 2023	8
Abbildung 9: Klimaschäden im Überblick (kumulierte Verluste im realen BIP von 2023 bis 2050 auf 10 gerundet)	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Klimaszenario berücksichtigte Handlungsfelder und die jeweiligen Klimawirkungen	9
---	---

1 Klimafolgen und Klimafolgenanpassung

1| Der Klimawandel ist da. Insbesondere Europa ist viel stärker von den Folgen betroffen als bisher gedacht: Die Temperaturen steigen schneller als im globalen Durchschnitt und brechen viele vormals langfristige klimatische Rekorde. Auch die Zahl und Intensität von Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, Dürre, Starkregen, Sturmfluten und Hochwasser nimmt zu (EEA 2024). Der Klimawandel wird aller Voraussicht nach auch noch stärker werden, als wir ihn in den vergangenen Jahren wahrgenommen haben und die Klimafolgen nehmen für Beschäftigung und Wertschöpfung weiter zu. Gleichzeitig ist nicht zu erwarten, dass es keine Gegenmaßnahmen – also Maßnahmen zur Klimafolgenanpassung – geben wird. Sie werden entweder nachsorgend sein, indem Gebäude und Infrastrukturen nach Ereignissen wie jenen im Ahrtal 2021 repariert oder neu aufgebaut werden, sie können aber auch vorbeugend sein.

2| Das stellt die Erarbeitung von ökonomischen Projektionen vor nicht unerhebliche Herausforderungen: Die Ereignisse sind historisch gesehen diskretionär, also an bestimmte Zeiten gebunden. Sie sind aber auch kontinuierlich durch z. B. graduelle Erwärmung und zunehmende Verschiebung des Regens in den Winter. Ferner gibt das historische Datenmaterial keine Möglichkeit der Attribution: Wieviel ökonomischer Wandel der Vergangenheit ist dem Konglomerat an vor- und nachsorgenden Maßnahmen zuzuschreiben? Und schon gar nicht wird greifbar, welche Dynamiken sich ergeben.

3| Also muss das Empirische durch das Plausible ersetzt werden. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sind die „Kosten durch Klimawandelfolgen“ (Trenczek et al. 2022a) gesammelt worden. Die Ergebnisse dort werden zur Plausibilisierung zukünftiger Ergebnisse herangezogen.

Im Folgenden werden die Annahmen für die INFORGE-Basisprojektion dargelegt. Sie werden jährlich überprüft und ggf. angepasst. Stand der Arbeiten ist März 2023.

2 Klimafolgen

Die in Zukunft auftretenden Klimaschäden sind ungewiss. Im Rahmen eines BMWK-Projektes hat die Prognos AG die „jährlichen extremwetterbezogenen Schäden aus erfassten Ereignissen über 100 Mio. € in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021“ (Trenczek et al. 2022a, S. 12) zusammengetragen bzw. selbst berechnet.

Die Zeitreihe von Prognos wurde mittels der Daten des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV 2023) ergänzt. Dazu wurden erst die Zahlen beider Datenquellen verglichen (siehe Abbildung 1) und aus dem kumulierten Vergleich ein Hebesatz errechnet. Für die Jahre 2000 bis 2021 fallen die Prognosezahlen um 38 % höher aus als die des GDVs, der aber nur versicherte Schäden erfasst. Die Korrelation beider Zeitreihen liegt bei 83 %.

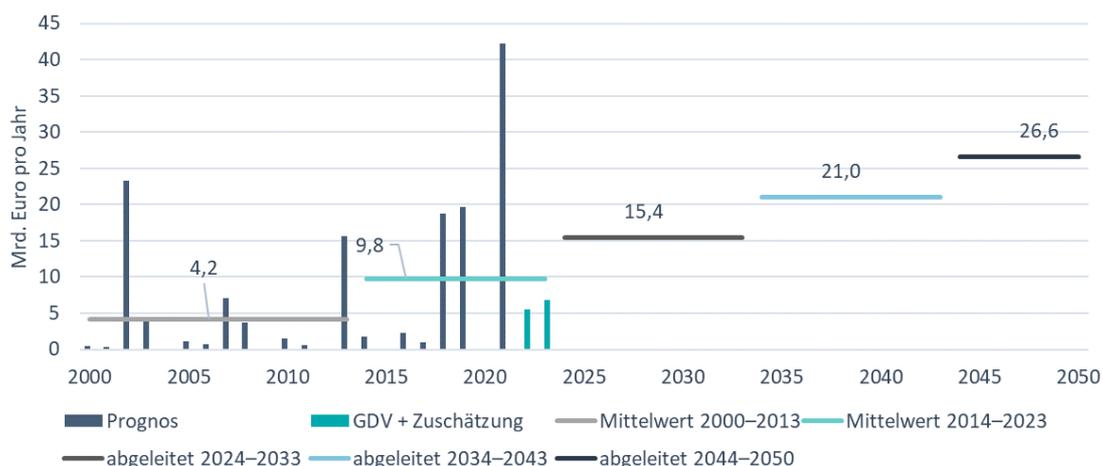
Abbildung 1: Prognos und GDV im Vergleich



Quelle: Trenczek et al. 2022a, GDV 2023, eigene Darstellung

Abbildung 1 zeigt einen immensen Anstieg der jährlichen Klimaschäden, wenn auf annähernd 10-Jahres-Zeiträume abgestellt wird: In den Jahren 2014 bis 2023 fielen die Klimaschäden um 5,6 Mrd. Euro höher aus als in den Jahren 2000 bis 2013. Wird diese Treppe in 10-Jahres-Abschnitten fortgesetzt, würden im Zeitraum 2024 bis 2033 jährliche Klimaschäden von 15,4 Mrd. Euro entstehen – für den nächsten 10-Jahres-Abschnitt 21 Mrd. Euro und danach 26,6 Mrd. Euro. Der noch kommende Gesamtschaden beläuft sich für die Jahre 2024 bis 2050 auf 550 Mrd. Euro. Für die Jahre 2000 bis 2023 wurden Schäden in Höhe von 157 Mrd. Euro erfasst.

Abbildung 2: Erfasste Klimaschäden und mögliche Ableitungen daraus



Quelle: Trenczek et al. 2022a, GDV 2023, eigene Berechnung und Darstellung

Würde der Durchschnitt der Vergangenheit (2000–2023) auch für die Folgejahre unterstellt werden, läge der noch kommende Schaden bis 2050 bei 27 Jahren á 6,5 Mrd. Euro bei rund 175 Mrd. Euro.

Es ist davon auszugehen, dass die in der Vergangenheit erfassbaren Ereignisse auch zum großen Teil in Form von Beseitigungsmaßnahmen Eingang in die Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen gefunden haben. Wo in diesem Buchungssystem und in welchen Jahren, ist allerdings nicht bekannt. Eine Basisprojektion schreibt diese „embedded“, also implizit enthaltenen Schäden dennoch weiter fort. Die Steigerungen, die sich in der Vergangenheit andeuten aber nicht, da keine explizite Kenntlichmachung und damit Adressierung in empirischen Arbeiten möglich ist. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Regressionsanalysen diese Sonderereignisse bewusst aus der Berechnung von Verhaltensparametern herausnehmen.

Es bleiben also noch ca. 375 Mrd. Euro für die kommenden 27 Jahre bis 2050 (vorher 400 Mrd. Euro für die kommenden 29 Jahre), die nicht berücksichtigt werden, falls die „Treppen“ in der Abbildung 1 für plausibel gehalten werden.

Es gibt nun mehrere Gründe, warum diese „Treppe“ unplausibel sein könnte:

- (1) Die Wetterereignisse, die zu den beiden ersten Treppenstufen führten, sind von Zufall und nicht von Klimawandel geprägt. Das kann sein.
- (2) Die Erfassung ist zu ungenau. Die Ergebnisse werden unterschätzt. Das wird so sein, da eine genaue Erfassung von z. B. graduellen Schäden nicht möglich ist.
- (3) Die Dynamik der Treppen wird über oder unterschätzt. Das ist sicher auch richtig.

Wir wählen daher folgendes Vorgehen: Wir treffen konkrete Annahmen zu den mutmaßlich am stärksten ökonomisch betroffenen Bereichen nach der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2022, setzen diese in das Modell ein und „messen“ den entstandenen Schaden. Dieser wird dann über die Jahre 2024 bis 2050 kumuliert. Liegt der Gesamtschaden am preisbereinigten Bruttoinlandsprodukt über 375 Mrd. Euro, korrigieren wir die Annahmen nach unten.

Es bleibt zu sagen, dass die Zahlen „wackelig“ sind. Das liegt am Erfassungsgrad der Schäden und am Anteil der versicherten Schäden. Gerade Letzterer kann sich ändern, wenn a) die Versicherungsprämien steigen und einige Haushalte sich das nicht mehr leisten können und b) die Schäden zunehmend in Regionen auftreten, die nie Probleme hatten und daher auch nie Versicherungen. Ein Schadenskataster (wie das UBA es anlegt) mit einheitlichen und gleichbleibenden Erfassungsregeln ist für die Beurteilung der Lage entscheidend.

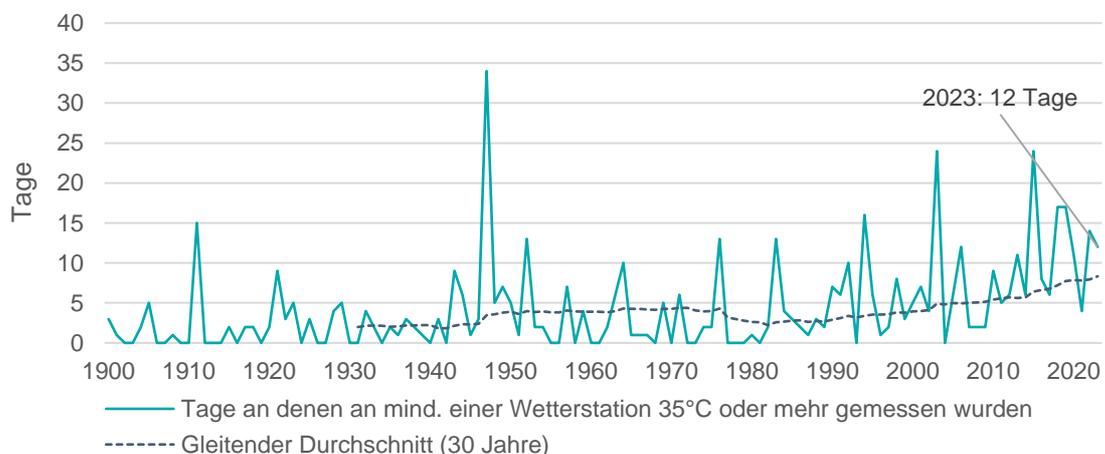
2.1 Wetter, Extremereignisse und Klimawandel

Es ist schwer, aus volkswirtschaftlicher Sicht Aussagen zu Wetter oder gar Klima zu machen. Die folgenden Abbildungen zu Temperatur, Hitzetagen, Windtagen und Regenextremen dienen hier insbesondere dazu, zu prüfen, ob die Annahmen steigender Klimafolgen weiter plausibel bleiben. Die entsprechenden Werte wurden aus der Datenbank des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bezogen. Sollte auf Basis der Indikatoren zu erkennen sein, dass die Dynamiken nicht linear sind, könnte dies darauf hinweisen, dass die obige dargestellte Plausibilisierung der linearen Zuwächse nicht stichhaltig ist und überdacht werden müsste.

1| Hitzetage

Die Zahl der Tage, an denen in mindestens einer Wetterstation in Deutschland mehr als 35 °C gemessen wurden, ist in Abbildung 3 für den Zeitraum zwischen 1900 und 2023 dargestellt. Ergänzt ist der gleitende Durchschnitt der letzten 30 Jahre. Der Höchstwert wurde im „Steppensommer“ 1947 mit insgesamt 34 Hitzetagen gemessen, wodurch der gleitende Durchschnitt in der Folgeperiode spürbar geprägt ist. Ab Mitte der 1980er Jahre steigt der gleitende Durchschnitt der Hitzetage beginnend von einem Niveau von 2,2 Tagen wieder kontinuierlich an. Sommer mit Tagen über 35 °C bilden nicht mehr die Ausnahme, sondern die Regel. Im Jahr 2023 liegt der gleitende Durchschnitt der letzten 30 Jahre bei 8,3 Tagen, wobei die Jahre 2018 bis 2023 mit Ausnahme des Jahres 2021 alle zweistellige Werte aufweisen.

Abbildung 3: Anzahl der Tage, an denen an mindestens einer Wetterstation in Deutschland 35 °C oder mehr gemessen wurden, 1900 bis 2023

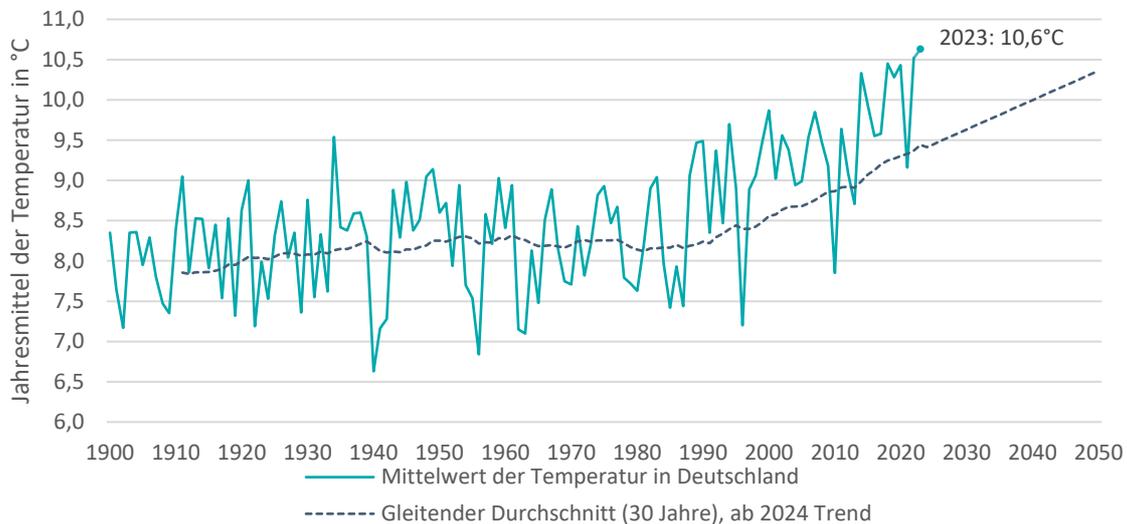


Quelle: DWD 2023 , eigene Darstellung

2| Jahresmittel der Lufttemperatur in Deutschland

Das Jahresmittel der Lufttemperatur im Zeitraum von 1900 bis 2023 ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Jahresmittel der Temperatur in Deutschland von 1900 bis 2023



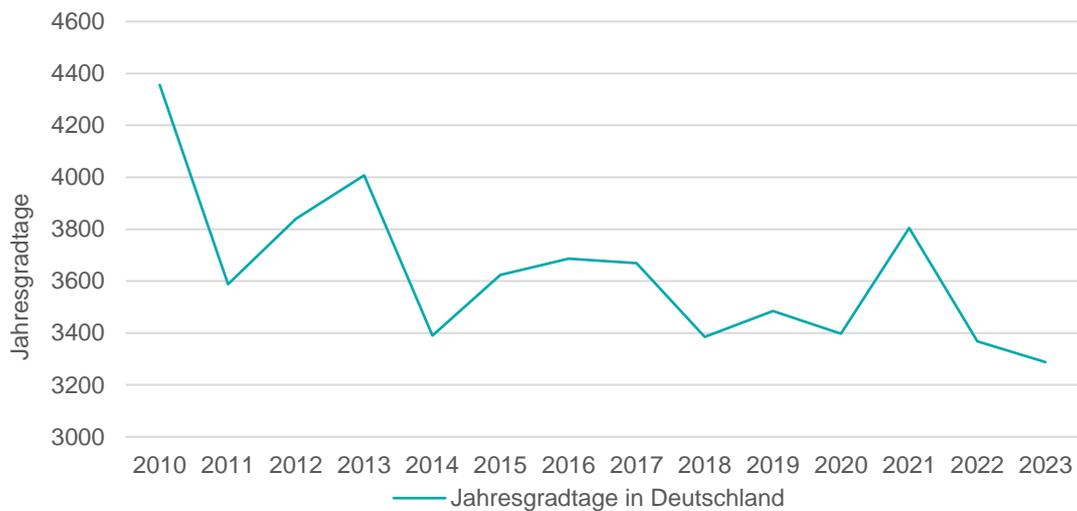
Quelle: DWD 2023, eigene Darstellung

Hinzugefügt wurde ein gleitender Durchschnitt der letzten 30 Jahre, welcher einen Anstieg der Temperatur über den beobachteten Zeitraum erkennen lässt. Die Weltorganisation für Meteorologie (WMO) empfiehlt bei solch langfristigen Auswertungen zur Erfassung von Klimaveränderungen, Mittelwerte über einen Zeitraum von 30 Jahren zu bilden. Des Weiteren wurde ein gleitender Durchschnitt um einen Trend bis zum Jahr 2050 erweitert. Dieser zeigt einen stetigen Anstieg des Jahresmittels der Temperatur. Auffällig ist, dass seit 1990 nur 4 (von 33) Jahreswerte unter dem gleitenden Durchschnitt lagen. Das PIK prognostiziert eine Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 2031 bis 2060 von 10,5 °C, was den abgebildeten Trend widerspiegelt.

3| Jahresgradtage

In Abbildung 5 sind die Jahresgradtage als Mittel für Deutschland in dem Zeitraum von 2010 bis 2023 abgebildet. Hierfür wurde ein Mittelwert aller monatlichen „Gradtage“ jeder Wetterstation in Deutschland gebildet und diese für das entsprechende Jahr aufsummiert. Ein Gradtag berechnet sich durch die Differenz zwischen Raumtemperatur und der Tagesmitteltemperatur (Grad Celsius). Die Raumtemperatur ist bei 20 °C festgelegt. Es werden nur die Tage gezählt, an denen das Tagesmittel der Außentemperatur niedriger als 15 °C liegt, da dies als Heiztag definiert ist. Ein höherer Wert der Jahresgradtage kann potenziell einem höheren jährlichen Heizenergiebedarf entsprechen.

Abbildung 5: Jahresgradtage von Deutschland im Zeitraum von 2010 bis 2023



Quelle: DWD 2023, eigene Darstellung

In dem abgebildeten Zeitraum lässt sich eine abnehmende Tendenz der Jahresgradtage beobachten. Im Jahr 2010 lag der Wert des Jahresgradtag bei 4315. Dieser Wert wurde seitdem nicht mehr erreicht. Allein das Jahr 2013 mit einem Wert von 3979 und 2021 mit einem Wert von 3773 stechen heraus.

4| Starkregenereignisse

Abbildung 6 zeigt, an wie vielen Tagen in einem Jahr mindestens an einer Wetterstation in Deutschland die Warnstufe „Extrem heftiger Starkregen“ gemessen wurde. Der Schwellenwert dieser Warnstufe liegt bei >40 mm Niederschlagshöhe in einer Stunde, was 40 l/m² in einer Stunde entspricht und vom Deutschen Wetterdienst definiert ist. Zu erkennen ist, dass die Beobachtungen von extremen Starkregen vor allem seit 2004 zugenommen haben und die Spitze im Jahr 2014 liegt, in dem an 23 Tagen ein Starkregen dieser Stärke beobachtet wurde. Im Zeitraum 2015 bis 2023 schwankt das Ausmaß der Tage, an denen ein Starkregen dieser Stufe beobachtet wurde. Dementsprechend wurden 2015 neun Tage und 2017, 2020 sowie 2022 elf Tage mit einem heftigen Starkregen gezählt, wohingegen 2018, 2019, 2021 und 2023 immer mindestens fünfzehn Tage mit einem solchen Starkregen gezählt wurden.

Abbildung 6: Anzahl der Tage, an denen an mindestens einer Wetterstation in Deutschland eine Niederschlagshöhe von 40 mm pro Stunde oder mehr gemessen wurde, 1995 bis 2023



Quelle: DWD 2023, eigene Darstellung

5| Tage mit Bodenfeuchte <30 % nFK

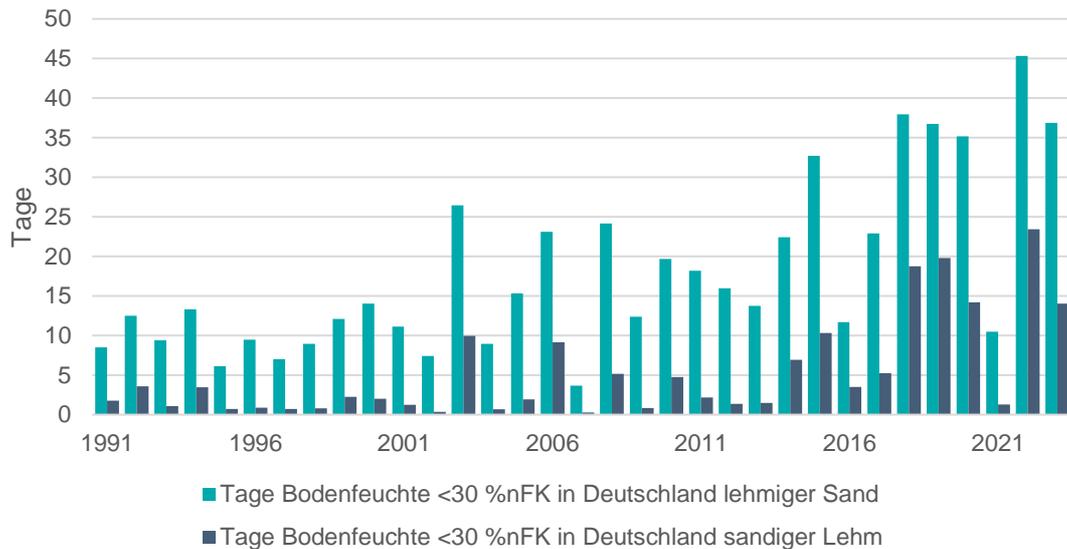
Um Trockenheit abzubilden, kann der Indikator Bodenfeuchte, welcher in Prozent der nutzbaren Feldkapazität (%nFK) angegeben wird, herangezogen werden. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist ein Begriff, der den maximalen Wassergehalt eines Bodens beschreibt, den Pflanzen effizient nutzen können. Sie stellt den Anteil des Bodenwassers dar, der von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden kann. Die nFK wird in Prozent ausgedrückt und variiert je nach Bodentyp. Bei einer Bodenfeuchte von 30–40 %nFK nimmt die Photosynthese-Leistung und somit das Wachstum der Pflanze stark ab und wird hier als kritische Schwelle definiert.

Abbildung 7 bildet die mittlere Anzahl der Tage mit Bodenfeuchtwerten unter 30 %nFK für die Kultur Winterweizen ab. Miteinbezogen wurden nur die Monate März bis Juli, da dies die Hauptwachstumszeit des Winterweizens ist. Ein großer Einfluss auf die Bodenfeuchte hat die Art des Bodens, weshalb die Bodenfeuchte auf lehmigem Sand (leichterer Boden) und die Bodenfeuchte auf sandigem Lehm (schwererer Boden) dargestellt ist. Ein schwerer Boden kann mehr Wasser zwischenspeichern und somit Trockenperioden besser überbrücken.

Bei beiden Indikatoren ist zu erkennen, dass die mittlere Anzahl der Tage, an denen der kritische Schwellenwert von <30 %nFK in Deutschland unterschritten wurde, in dem betrachteten Zeitraum von 1991 bis 2023 zugenommen hat.

Da der lehmige Sandboden das Wasser weniger gut speichern kann als der sandige Lehmboden, wird die Schwelle von <30 %nFK bei leichten Böden häufiger unterschritten als bei schwereren (UBA 2015).

Abbildung 7: Mittlere Anzahl der Tage mit Bodenfeuchtwerten <30 %nFK auf lehmigem Sand- und sandigem Lehmboden in Deutschland, 1991 bis 2023



Quelle: DWD 2023, eigene Darstellung

6| Zukünftige Klimaentwicklung

Klimaprojektionen, u. a. des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2023), liefern auf Basis von Szenarien und zahlreichen Annahmen Einschätzungen zur Entwicklung des Klimas in weiter Zukunft. Den Modellrahmen gibt das World Climate Research Programme (WCRP) vor. Es liefert auch die Basis der Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Die Ergebnisse stellen keine Wettervorhersagen dar und geben keinen Aufschluss über den exakten Zeitpunkt und Ort von Extremwetterereignissen. Vielmehr lassen sich aus den Rechenergebnissen nur Tendenzen zu Extremwetterereignissen ableiten.

Das hier verwendete Modell ist kein Klimamodell und wird auch nicht direkt mit den physischen Ergebnissen aus den Klimamodellen verknüpft (vgl. Stöver et al. 2022). Vielmehr werden aus den zukünftig zu erwartenden Extremwetterereignissen Narrative zu den wirtschaftlichen Konsequenzen entwickelt und daraus Szenariogrößen abgeleitet, wodurch die Auswirkung des Klimawandels auf wirtschaftliche und sozioökonomische Größen abgeschätzt werden kann.

Nach Lange et al. (2020) nimmt die Fläche, die jährlich Extremwetterereignissen ausgesetzt ist, bei einer globalen Erwärmung von 2 Grad weltweit um mehr als das Fünffache zu. Diese Zunahme wird vor allem von Dürren und Hitzewellen getrieben, aber auch andere Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen, Feuer oder Zyklone tragen dazu bei. In IPCC (2021, S. 9) wird festgestellt, dass die Häufigkeit von global auftretenden Hitzewellen und Dürren sehr wahrscheinlich („high confidence“) zunimmt und mit mittlerer Sicherheit („medium confidence“) die Zahl der Feuerwetter („fire weather“) in einigen Regionen aller bewohnten Kontinente sowie der Überschwemmungen an einigen Orten steigt.

Die Extremwetterereignisse, welche sich nach derzeitigem Kenntnisstand mit dem Klimawandel in Deutschland in Verbindung bringen lassen, sind Starkregen, Hochwasser,

Hitzewellen und Dürren (Trenczek et al. 2022b). Für Deutschland werden hinsichtlich der Extremwetterereignisse zukünftig folgende Trends erwartet (Brienen et al. 2020):

- Zunahme der Häufigkeit und Anstieg der Intensität von **Hitzewellen**
- Bestehende Trends zu **Niedrigwasserereignissen** verstärken sich voraussichtlich
- Deutliche Zunahme der Häufigkeit und der Intensität von **Starkregen**

Auf Basis der Klimaprojektionen für Deutschland ist also davon auszugehen, dass die Zahl der Extremwetterereignisse in Deutschland zunimmt – mit einer jeweils weiter steigenden Intensität der Schäden. Dies ist umso mehr der Fall, wenn Anpassungsmaßnahmen ausbleiben.

2.2 Die Annahmen zu den Effekten des Klimawandels

Die Auswahl der Klimawirkungen und die Identifikation der jeweiligen Eingriffsstellen im Modell beruht auf der Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KWRA) 2021 (Kahlenborn et al. 2021). Sie liefert eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassungsstrategie in Deutschland und analysiert sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels für Deutschland als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren. Die KWRA 2021 umfasst 13 übergeordnete Handlungsfelder, welche den fünf Clustern „Land“, „Wasser“, „Infrastruktur“, „Wirtschaft“ und „Gesundheit“ zugeordnet sind, sowie 102 einzelne Klimawirkungen. Die Klimawirkungen werden hinsichtlich des Risikos, das durch Klimawandel für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts und das Ende des Jahrhunderts entsteht, bewertet. Für die 29 größten Klimarisiken wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und abgeschätzt, wie hoch die Wirkung der Anpassungsmöglichkeiten bis zur Mitte des Jahrhunderts auf die Klimarisiken ist. Durch die Bewertung ist es möglich, die Handlungsfelder mit den höchsten Risiken zu identifizieren, die jeweiligen Anpassungsmöglichkeiten zu bewerten und so die größten Handlungserfordernisse zu identifizieren (Kahlenborn et al. 2021).

Die Auswahl der im Modell abgebildeten Klimawirkungen und die Grundannahmen zur Szenario-Erstellung ist in Wolter et al. (2023) detailliert beschrieben. Die ausgewählten Handlungsfelder und die zugehörigen Klimawirkungen sind in Tabelle 1 detailliert dargestellt.

Tabelle 1: Im Klimaszenario berücksichtigte Handlungsfelder und die jeweiligen Klimawirkungen

Handlungsfeld	Klimaereignis und Klimawirkung
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Auslöser: Extremwetterereignisse (v. a. Hitze und Dürre, aber auch Starkregen und Überschwemmungen) Klimawirkung: höherer Einsatz und Bedarf von Wasser, Grundwasserqualität, Funktionsfähigkeit von Netzen und Kläranlagen
Landwirtschaft	Auslöser: weltweite Extremwetterereignisse (Starkregen, Überschwemmungen, Hitze und Dürre, Stürme) Klimawirkung: Ertragsverluste in der Landwirtschaft

Wald- und Forstwirtschaft	Auslöser: weltweite Extremwetterereignisse (Starkregen, Überschwemmungen, Hitze und Dürre, Stürme) Klimawirkung: geringere Erträge in der Wald- und Forstwirtschaft
Fischerei	Auslöser: Anstieg bzw. hohe Schwankungen der Meerestemperatur Klimawirkung: Artensterben, Fischkrankheiten, Algen, verändertes Laichverhalten
Schifffahrt (Industrie und Gewerbe)	Auslöser: Hitze und Dürre Klimawirkung: geringere Schiffbarkeit, Beeinträchtigung des Warenverkehrs
Versicherungen und Rückstellungen (Industrie und Gewerbe, private Haushalte)	Auslöser: Starkregen, Hochwasser, Sturmflut, Überschwemmungen Klimawirkung: Beschädigung und Zerstörung von Gebäuden, Siedlungen und Infrastruktur
Menschliche Gesundheit	Auslöser: Hitze Klimawirkung: Belastung der menschlichen Gesundheit und des Gesundheitssystems

Quelle: eigene Darstellung und Auswertung auf Basis der KWRA 2021

Bei der Beschreibung der einzelnen gesetzten Annahmen für das Klimaszenario ist im Folgenden zu beachten, dass es keine Referenzstudie oder anderweitige Erkenntnisse gibt. Die Annahmen werden möglichst genau beschrieben, damit sie falsifiziert werden können. Plausible Werte zu finden ist herausfordernd. Die oben dargestellten Abwägungen zu den Schäden insgesamt werden als Justierung herangezogen, sodass die einzelnen Schadenswirkungen vor allem untereinander abgewogen werden.

1| Wasserwirtschaft: Es wird angenommen, dass der anteilige Verbrauch von Wasser für die Leistungserstellung in der Wirtschaft bis 2050 aufgrund von Hitze und Dürre zusätzlich um 10 % steigt. Zur Einordnung der Annahmen wird der volkswirtschaftliche Anteil des preisbereinigten Einsatzes von „Wasser, Dienstleistungen der Wasserversorgung“ an der preisbereinigten gesamtwirtschaftlichen Produktion auf Basis der Input-Output-Rechnungen des Statistischen Bundesamtes für die Jahre 2010 bis 2019 herangezogen. Bereits in der Vergangenheit stieg der Anteil jährlich um 2,1 % und in den kommenden 30 Jahren kommt durch die Annahme eine Wachstumssteigerung von 0,3 % pro Jahr hinzu. Diese grundsätzliche Bedarfssteigerung von Wasser deckt sich mit den Ergebnissen von Egerer et al. (2023), Bender et al. (2021) sowie Fliß et al. (2021).

Es wird allerdings nicht nur angenommen, dass mehr Leistungen der Wasserwirtschaft nachgefragt werden, sondern auch, dass die Wasserwirtschaft die Art und Weise ihrer Leistungserstellung verändert. Mit den Temperaturen steigen auch die Anforderungen an die Wasserbereitstellung und -aufbereitung (Bender et al. 2021). Um die Wasserqualität auch zukünftig gewährleisten zu können, werden Anpassungen an den Leitungen und der Wasserbereitstellung vorgenommen. Genauer nehmen der Einsatz von Strom, Baumaßnahmen und Verwaltung sowie Ingenieurleistung bis 2050 um 45 bzw. 30 % für Letztere zu. Im Ergebnis wird also nicht nur mehr Wasser eingesetzt, sondern das auch

zu höheren Herstellungspreisen. Von einem zusätzlichen Eingriff bei der Preissetzung der Wasserwirtschaft – z. B. zur Verbesserung der Ertragslage der Unternehmen der Wasserwirtschaft angesichts der knappen Ressource Wasser – wurde abgesehen.

Zur **Einordnung**: Die Wasserwirtschaft hatte 2023 einen geschätzten Produktionswert in Höhe von ca. 14 Mrd. Euro (StBA 2023; eigene Berechnungen auf Basis von INFORGE). Die Kostensteigerungen verursachen einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von gut 10 Mrd. Euro. Im Jahr 2050 fällt das preisbereinigte BIP also um 0,03 % niedriger aus. Die Anzahl der Arbeitsplätze nimmt bis 2050 langsam zu und liegt dann um ca. 6500 Stellen höher.

2| Landwirtschaft: Es ist zu erwarten, dass sich durch global auftretende unterschiedliche Extremwetterereignisse (Hitze, Dürre, Starkregen) die Erträge in der Landwirtschaft weltweit verringern (Batten et al. 2020; Peter et al. 2020; Winne & Peersman 2021). Dadurch entstehen weltweit Knappheiten, die zu Importpreissteigerungen für Agrarprodukte zwischen 3 und 37% führen können (Peter et al. 2020; Ren et al. 2018; Wang et al. 2018). Es wird angenommen, dass die Importpreise für Landwirtschaftsprodukte bis 2050 um 20 % steigen. Zum Vergleich: Der Preisanstieg in den Jahren 1991 bis 2021 beträgt 25 % – den russischen Angriffskrieg in der Ukraine nicht beachtend. Es wird also von deutlichen Verknappungen ausgegangen. Da Nahrungsmittelprodukte in der Produktion unmittelbar nachgelagert sind, wird für importierte Nahrungsmittelprodukte ein Aufschlag von 5 % unterstellt. Er ist geringer, da Agrarrohstoffe nur zu einem geringen Teil in die Leistungserstellung der Nahrungsmittelindustrie eingehen. Arbeitseinsatz, Maschineneinsatz und andere Leistungen kommen hinzu. In Deutschland beträgt der anteilige Input von Agrarrohstoffen an der Produktion der Nahrungsmittelindustrie zwischen 20 und 25 %. Zudem wird angenommen, dass die Notwendigkeit zu importieren trotz der Preissteigerungen für importierte Produkte unverändert bleibt. Entsprechend werden die Mengenreaktionen auf die Preissteigerungen kompensiert. Die Importumsätze steigen dadurch um 10 % stärker. Ferner werden die Agrarflächen in Deutschland durch Flächenkonkurrenz zwischen Industrie, Haushalten, Bauern und Natur knapper, d. h. die Kosten für Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens werden teurer, wenn es um die Suche, Vermittlung und Verwaltung von Liegenschaften geht. Unterstellt wird eine zusätzliche Steigerung von 50 % bis 2050. Zum Vergleich: In den letzten zehn Jahren stiegen die Herstellungspreise des Grundstücks- und Wohnungswesens um 20 %.

Zur **Einordnung**: Die Landwirtschaft hatte 2023 einen geschätzten Produktionswert in Höhe von ca. 70 Mrd. Euro (StBA 2023; eigene Berechnungen auf Basis von INFORGE). Die Kostensteigerungen verursachen einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von fast 180 Mrd. Euro. Im Jahr 2050 fällt das preisbereinigte BIP also um 0,4 % niedriger aus. Die Anzahl der Arbeitsplätze reduziert sich 2050 um insgesamt gut 56 000. Die deutlich höheren indirekten Wirkungen sind auf die Position der Landwirtschaft in den Wertschöpfungsketten (Rohstofflieferant) und die Folgen von Preissteigerungen auf die Konsumausgaben der privaten Haushalte zurückzuführen.

3| Forstwirtschaft: Auch in der Forstwirtschaft wird erwartet, dass die Wälder überall auf der Welt vom Klimawandel betroffen sind. Durch Stürme, Trockenheit etc. geht der

Ertrag in der Forstwirtschaft global zurück und führt weltweit zu einem knapper werdenden Angebot mit steigenden Preisen. Zwar werden als Anpassungsmaßnahme bei Wiederaufforstung Umwandlungen in den Wäldern vorgenommen, wodurch sich die Angebotsmenge und Preise langfristig stabilisieren, allerdings müssen vorher die Buchen und Fichten (zu früh) geschlagen und neue klimaresistente Bäume gezogen werden. Diese Umwandlung vollzieht sich sehr langwierig, sodass Jahre bis zu einer Stabilisierung der Holzmengen und damit der Preise vergehen werden. Entsprechend werden auch hier mittelfristig Aufschläge auf die Importpreise für den Rohstoff (+30 % bis 2050) und verarbeitete Holzprodukte (+8 % bis 2050) angenommen. Wieder wird berücksichtigt, dass der Einfluss auf die verarbeiteten Produkte geringer ist, da zur Produktion weitere Kostenkomponenten hinzukommen. Die Holzwirtschaft steht wie die Landwirtschaft in Flächenkonkurrenz. Die Folge ist auch hier ein deutlicher Aufschlag auf die bezogenen Leistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens (+50 % bis 2050). Auch kommt hinzu, dass der Schädlingsbefall (Stichwort „Borkenkäfer“) vor allem bei der weit verbreiteten Baumart Fichte vermehrt aufgrund der Trockenheit im Sommer zu beobachten sein wird. Entsprechend werden viele Bestände abgeschrieben werden müssen – also nicht mehr oder nicht mehr vollumfänglich einer ökonomischen Verwertung zu Verfügung stehen. Ohne Gegenmaßnahmen werden sich die Abschreibungen daher voraussichtlich verdoppeln.

Zur **Einordnung**: Die Forstwirtschaft hatte 2023 einen geschätzten Produktionswert in Höhe von ca. 5 Mrd. Euro (StBA 2023; eigene Berechnungen auf Basis von INFORGE). Die Kostensteigerungen verursachen einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von ca. 40 Mrd. Euro. Im Jahr 2050 fällt das preisbereinigte BIP also um 0,1 % niedriger aus. Die Anzahl der Arbeitsplätze liegt 2050 um insgesamt fast 1000 niedriger. Die deutlich höheren indirekten Wirkungen sind auf die Position der Forstwirtschaft in den Wertschöpfungsketten (Rohstofflieferant) zurückzuführen.

4| Fischerei: Fisch und Fischereiprodukte werden in Deutschland zum überwiegenden Teil importiert. Daher wird hier nur die international knapper werdende Ressource „Fisch“ teurer. Der Importpreis steigt bis 2050 25 % stärker als ohne Klimawandel zu erwarten gewesen wäre.

Zur **Einordnung**: Die Fischerei hatte 2023 einen geschätzten Produktionswert in Höhe von ca. 0,5 Mrd. Euro (StBA 2023; eigene Berechnungen auf Basis von INFORGE). Die Kostensteigerungen verursachen hier einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von knapp 1 Mrd. Euro. Die Auswirkungen auf das BIP fallen insgesamt eher gering aus. Im Jahr 2050 fällt das preisbereinigte BIP um 0,004 % niedriger aus und die Anzahl der Arbeitsplätze reduziert sich 2050 um insgesamt ca. 600.

5| Schifffahrt: Die Schifffahrt wird im Sommer immer häufiger mit Niedrigwasser konfrontiert sein (Voß et al. 2021; Nilson et al. 2020; Hänsel et al. 2020), sodass die eingegangenen Lieferverpflichtungen nicht eingehalten werden können. Dies hat zur Folge, dass die Schifffahrt zunehmend Leistungen des Großhandels in Anspruch nimmt, woraufhin sich ihre Leistungen verteuern. Es wird unterstellt, dass sich die bezogenen Großhandelsleistungen verdreifachen.

Zur **Einordnung**: Die Schifffahrt hatte 2023 einen geschätzten Produktionswert in Höhe von ca. 44 Mrd. Euro (StBA 2023; eigene Berechnungen auf Basis von INFORGE). Die Kostensteigerungen verursachen einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von fast 10 Mrd. Euro. Im Jahr 2050 fällt das preisbereinigte BIP also um 0,02 % niedriger aus. Die Anzahl der Arbeitsplätze reduziert sich 2050 um insgesamt fast 6000.

6| Gesundheit: Hitze verursacht insbesondere bei älteren Menschen gesundheitliche Belastungen (Hsiang et al. 2017), welche u. a. durch vermehrte Krankenhauseinweisungen zu höheren Gesundheitsausgaben führen (Barrage 2023; Hübler et al. 2008; Hübler 2014; Karlsson & Ziebarth 2018; Limaye et al. 2019; Schmuker 2021). Um die zusätzlichen Kosten durch Hitzetage im Gesundheitswesen abzubilden, wurden die Gesundheitsausgaben pro Kopf, Altersgruppe und Geschlecht heraufgesetzt. Für Frauen im Alter von 65 bis 80 Jahren beträgt der Zuschlag bis 2050 0,00155 %, bei Frauen älter als 80 Jahre 0,00061 %, bei Männern im Alter 65 bis 80 Jahre 0,00142 % und bei Männern älter als 80 Jahre 0,00072 %. Dadurch entstehen im Gesundheitssystem zusätzliche Ausgaben, die der Staat durch Einsparmaßnahmen für andere Leistungen kompensiert.

Zur **Einordnung**: Das Gesundheitswesen hatte 2023 einen geschätzten Produktionswert in Höhe von gut 310 Mrd. Euro (StBA 2023; eigene Berechnungen auf Basis von INFORGE). Die Kostensteigerungen verursachen hier einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von fast 2 Mrd. Euro. Die Auswirkungen auf das BIP fallen insgesamt eher gering aus – im Jahr 2050 liegt es preisbereinigt um 0,003 % niedriger. Die Anzahl der Arbeitsplätze verändert sich fast nicht: insgesamt fallen nicht einmal 600 Stellen weg.

7| Versicherungen und Rückstellungen: Die Volkswirtschaft insgesamt bildet Rücklagen, um die kommenden Schäden zu kompensieren. Diese werden dem Wirtschaftskreislauf entzogen. Damit dies auch buchungstechnisch erfolgen kann, verdoppelt die Versicherungswirtschaft ihre Abschreibungen bis zum Jahr 2050, wodurch die Abschreibungen im Jahr 2050 um mehr als 5 Mrd. Euro steigen. Das Grundstücks- und Wohnungswesen muss nun ebenfalls häufiger Abschreibungen hinnehmen, welche bis 2050 um 2 % steigen. Dies ist auch als eine Reduktion der Lebensdauer aller Gebäude um zwei Jahre interpretierbar. Ferner legen die privaten Haushalte kumuliert ca. 15 Mrd. Euro zurück, um auf Gebäudeschäden vorbereitet zu sein. Schließlich erhöhen auch die Unternehmen ihre Abschreibungen bis 2050 um 0,3 %.

Zur **Einordnung**: Höhere Versicherungsprämien, Rückstellungen und Rücklagen verursachen einen kumulierten ökonomischen Schaden bis 2050 in Höhe von gut 140 Mrd. Euro. Im Jahr 2050 fällt das preisbereinigte BIP also um 0,3 % niedriger aus. Die Anzahl der Arbeitsplätze reduziert sich 2050 um insgesamt ca. 34 000.

2.3 Kosten des Klimawandels im Überblick

Zusammengenommen entsteht zwischen 2025 und 2050 aufsummiert ein Wertschöpfungsverlust (gemessen am preisbereinigten BIP) in Höhe von ca. 390 Mrd. Euro. Den größten Einfluss auf die Verluste nehmen, wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, die Klimawirkungen in den Bereichen Landwirtschaft und Versicherung. Dadurch, dass die

privaten Haushalte und ihre Einkommen bzw. ihr Konsumverhalten über Lebensmittelpreise, Versicherungen und Wohnungsmieten indirekt angesprochen werden, ergeben sich hier viele indirekte und induzierte (Einkommens-)Effekte, die wiederum Einfluss auf die gesamte Wirtschaftsstruktur nehmen. Somit sind auch Branchen vom Klimawandel betroffen, die nicht direkt einer Klimawirkung unterliegen.

Abbildung 8: Klimaschäden im Überblick (kumulierte Verluste im realen BIP von 2023 bis 2050 auf 10 gerundet)



Quelle: eigene Berechnung und Darstellung

3 Massnahmen zur Klimafolgenanpassung

3.1 Annahmen zur Klimafolgenanpassung im Einzelnen

1| Landwirtschaft: Es wird angenommen, dass die heimische Landwirtschaft durch die veranlassten Anpassungsmaßnahmen mehr produzieren kann, sodass die Hälfte der sonst unvermeidbaren Importe von Agrarrohstoffen trotz steigender Preise (+10 % bis 2050, s. o.) kompensiert werden kann. Dadurch kommt es 2050 zu einem Anstieg der nominalen Produktion um 3,9 %. Diese Verbesserung ist nicht ohne Investitionen (höheren Kapitaleinsatz) und höheren Arbeitseinsatz zu erreichen. Hierzu zählen Bewässerungssysteme, arbeitsintensivere Weisen der Produktion (z. B. Felder mit Zwischenbaumreihen) oder neue Methoden zur Verbesserung der Bodenqualität (Nährstoffe und Wasserspeicherfähigkeit). Die Maßnahmen werden so abstrahiert, dass die Verbesserung der Stückkosten und damit der Herstellungspreise aufgrund der höheren Produktionsmenge kompensiert werden. Im Ergebnis steigen die Ausrüstungen und Bauinvestitionen der Landwirtschaft um 5 % bis 2050. Der Arbeitseinsatz erhöht sich um 3 %. Es wird also zudem unterstellt, dass die Landwirtschaft kapitalintensiver wird.

2| Forstwirtschaft: Die Forstwirtschaft kann sich nicht so schnell an die Folgen des Klimawandels anpassen. Wir nehmen an, dass die Gegenmaßnahmen erst nach 2040 eine Wirkung zeigen. Die dramatisch steigenden Abschreibungen (s. o.) sinken danach bis 2050 um 5 %. Da weitere Erfolge der Gegenmaßnahmen außerhalb des Projektionszeitraums liegen, ist die Forstwirtschaft auch auf Unterstützungen zur Wiederaufforstung angewiesen. In den Jahren ab 2023 bis 2040, also bis zum Zeitpunkt, ab dem eine Verbesserung eintritt, werden jährlich Unterstützungsleistungen des Staates von 100 Mio. Euro gewährt. Ferner wird angenommen, dass mit dem Waldumbau auch ein höherer Planungsbedarf und Arbeitseinsatz einhergehen. Beide nehmen bis 2040 um 5 % zu. Der Planungsbedarf drückt sich in zusätzlich bezogenen Leistungen von „Architektur- und Ingenieurbüros sowie technischer Untersuchung“ aus. Die Annahme von einer Steigerung um 5 % führt dazu, dass die zusätzlichen Kosten durch die ökonomischen Verbesserungen der Forstwirtschaft im Zuge der Förderungen kompensiert werden.

3| Auflösung der Rückstellungen/Versicherungen: Die angenommenen Rückstellungen haben einen Wertschöpfungsverlust in Höhe von knapp 140 Mrd. Euro ausgelöst (s. o.) – sie werden nun aufgelöst. In dem Zuge steigen die Investitionen in Bauten bis 2050 um 8 % und in Ausrüstungsgüter um 2 %. Damit fallen die zusätzlichen Investitionen in Bauten und Ausrüstungen 2050 ungefähr gleich hoch aus. Gleichzeitig müssen die Abschreibungen der Versicherungen und der Wohnungswirtschaft geringer ausfallen, da die Gebäude und Anlagen nun besser für den Klimawandel gerüstet sind.

4| Planung und Forschung: Damit die Anpassungsmaßnahmen bei den Bauinvestitionen und den Anlageinvestitionen umgesetzt werden können und der Wissensstand zu den richtigen Maßnahmen wächst, wird angenommen, dass die bezogenen Planungsleistungen für das Baugewerbe und für die öffentliche Verwaltung bis 2040 um 10 % steigen und dann auf diesem höheren Niveau verbleiben. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass die Investitionen der öffentlichen Verwaltung in geistiges Eigentum (Forschung und Endwicklung, Software, Datenbanken) deutlich zulegen. Sie steigen bis

2040 auf 2 Mrd. Euro zusätzlich an und verbleiben dann ebenfalls auf diesem Niveau. Das ist gemessen am aktuellen Niveau eine Steigerung um 50 %.

5| **Klimaresiliente Städte:** Gerade in den städtischen Räumen spielt Regenwassermanagement in Zukunft eine wichtige Rolle. Die Absorption von Regenwasser im Sinne einer Schwammstadt kann bei Starkregenereignissen schützen und Wasser für Trockenperioden zurückhalten. Im Modell wird angenommen, dass rund ein Viertel des jährlichen Niederschlags (also rund 200 l/m²) in Grünflächen wie Parkanlagen versickern sollte. Es wird geschätzt, dass rund 1% der Bodenfläche als metropolitane Siedlungsfläche einzustufen ist und somit bis 2040 rund 40 Milliarden Euro für das Regenwassermanagement investiert werden müssen. Zudem steigen die Investitionen für Dach- und Fassadenbegrünung sowie für Beschattungstechnik an Gebäuden, die die Auswirkung des Klimawandels in städtischen Räumen abmildern (Bernardt et al. 2024).

6| **Katastrophenvorsorge:** Trotz aller Gegenmaßnahmen ist davon auszugehen, dass die Gefahr von Extremwetterkatastrophen weiter zunimmt. Die Erhebungen des Technischen Hilfswerkes zeigen bereits für 2021, dass die Zahl der Einsatzstunden auf ein neues Rekordniveau von 3,7 Mio. Stunden gestiegen ist. Rund 2,6 Mio. davon wurden aufgrund des Hochwassereinsatzes im Juli 2021 und den darauffolgenden Aufräumarbeiten nötig (THW 2022). Daher wird das preisbereinigte Investitionsvolumen für Ausrüstungen, Bauten und sonstigen Anlagen für die Annahme im Modell kontinuierlich gesteigert. Im Jahr 2040 liegt das Investitionsvolumen für Bevölkerungsschutz dann rund 1,5 Mrd. Euro höher als ursprünglich erwartet.

4 Literatur

- Barrage, L. (2023): Fiscal Costs of Climate Change in the United States. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/cer-eth/cer-eth-dam/documents/working-papers/wp_23_380.pdf, abgerufen am 09.06.2023.
- Batten, S., Sowerbutts, R. & Tanaka, M. (2020): Climate Change: Macroeconomic Impact and Implications for Monetary Policy. DOI: 10.1007/978-3-030-38858-4_2.
- Bender, S., Groth, M. & Viktor, E. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Grundwassernutzung – Betroffenheiten, Handlungsbedarfe und Lösungsansätze. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (Grundwasser) 26 (1), S. 61–72. DOI: 10.1007/s00767-020-00465-9.
- Bernardt, F., Rausch-Berhie, F. & Wolter, M. I. (2024): Auswirkungen von Klimaanpassung auf den Arbeitsmarkt – eine Modellierung des zukünftigen maßnahmeninduzierten Arbeitskräftebedarfs. Climate Change 12/2024. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/auswirkungen-von-klimaanpassung-auf-den>, abgerufen am 28.03.2024.
- Brienen, S., Walter, A., Brendel, C., Fleischer, C., Ganske, A., Haller, M., Helms, M., Höpp, S., Jensen, C., Jochumsen, K., Möller, J., Krähemann, S., Nilson, E., Rauthe, M., Razafimaharo, C., Rudolph, E., Rybka, H., Schade, N. & Stanley, K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. <https://www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/TFSPTBerichte/SPT101.pdf>, abgerufen am 15.06.2023. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02.
- Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW) (2022): Jahresbericht 2021, Bonn. https://thw.de/SharedDocs/Downloads/DE/Hintergrund/Jahresberichte/jahresbericht_2021.pdf;jsessionid=7C34F38F5E1E157968E0E35AC7AFC7E7.1_cid377?__blob=publicationFile, abgerufen am 02.10.2023.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2023): Klimaprojektionen. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/klimaprojektionen_node.html, abgerufen am 28.03.2024.
- Egerer, S., Puente, A. F., Peichl, M., Rakovec, O., Samaniego, L. & Schneider, U. A. (2023): Limited potential of irrigation to prevent potato yield losses in Germany under climate change. Agricultural Systems 207 (103633), S. 1–13. DOI: 10.1016/j.agsy.2023.103633.
- European Environment Agency (EEA) (2024): European Climate Risk Assessment. EEA report 01/2024, Luxembourg. <https://www.eea.europa.eu/publications/european-climate-risk-assessment>, abgerufen am 10.04.2024. DOI: 10.2800/204249.
- Fleiß, R., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kopp, B., Neumann, J. & Posselt, M. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die

Wasserversorgung in Süddeutschland. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (Grundwasser) 26, 2021 (26), S. 33–45. DOI: 10.1007/s00767-021-00477-z.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) (2023): Datenservice zum Naturgefahrenreport 2023 – Tabellen, Grafiken, Karten, Berlin. naturgefahrenreport-datenservice-2023-download-data.pdf, abgerufen am 10.04.2024.

Hänsel, S., Hillebrand, G., Nilson, E., Rauthe, M., Lohrengel, A.-F., Meine, L., Herrmann, C., Brendel, C., Forbriger, M., Kirsten, J., Klose, M., Ork, J. P., Patzwahl, R. & Schade, N. (2020): Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI: 10.5675/EXPNHS2020.2020.03.

Hsiang, S., Kopp, R., Jina, A., Rising, J., Delgado, M., Mohan, S., 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 – Economics. *Science* (New York, N.Y.) 356 (6345), S. 1362–1369. DOI: 10.1126/science.aal4369.

Hübler, M. (2014): Sozio-ökonomische Bewertung von Gesundheitseffekten des Klimawandels in Deutschland. In: Lozán, J. L., Graßl, H., Jendritzky, G., Karbe, L. & Reise, K. (Hg.): Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken – Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Aufl., S. 299–306. https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/gesundheitsrisiken/warnsignal_klima-gesundheitsrisiken-kapitel-4_13.pdf, abgerufen am 10.04.2024.

Hübler, M., Klepper, G. & Peterson, S. (2008): Costs of climate change – the effects of rising temperatures on health and productivity in Germany. *Ecological Economics* 68 (1–2), S. 381–393. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.04.010.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. Masson-Delmotte, V. P., Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M. I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell, E. & Lonnoy, J. B. R. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge. DOI: 10.1017/9781009157896.

Kahlenborn, W., Porst, Luise, Voß, M., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M., Wolf, M., Schönthaler, K. & Schausser, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Kurzfassung. Hg. v. Umweltbundesamt. *Climate Change* 26/2021.

Karlsson, M. & Ziebarth, N. R. (2018): Population health effects and health-related costs of extreme temperatures: Comprehensive evidence from Germany. *Journal of Environmental Economics and Management* 91, S. 93–117. DOI: 10.1016/j.jeem.2018.06.004.

- Lange, S., Volkholz, J., Geiger, T., Zhao, F., Vega, I., Veldkamp, T., Reyer, C. P. O., Warszawski, L., Huber, V., Jägermeyr, J., Schewe, J., Bresch, D. N., Büchner, M., Chang, J., Ciais, P., Dury, M., Emanuel, K., Folberth, C., Gerten, D., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hanasaki, N., Henrot, A.-J., Hickler, T., Honda, Y., Ito, A., Khabarov, N., Koutroulis, A., Liu, W., Müller, C., Nishina, K., Ostberg, S., Müller Schmied, H., Seneviratne, S. I., Stacke, T., Steinkamp, J., Thiery, W., Wada, Y., Willner, S., Yang, H., Yoshikawa, M., Yue, C. & Frieler, K. (2020): Projecting Exposure to Extreme Climate Impact Events Across Six Event Categories and Three Spatial Scales. *Earth's future* 8 (12). DOI: 10.1029/2020EF001616.
- Limaye, V. S., Max, W., Constible, J. & Knowlton, K. (2019): Estimating the Health-Related Costs of 10 Climate-Sensitive U.S. Events During 2012. *GeoHealth* 3 (9), S. 245–265. DOI: 10.1029/2019GH000202.
- Nilson, E., Astor, B., Fischer, H., Fleischer, C., Haurert, G., Helms, M., Hillebrand, G., Labadz, M., Mannfeld, M., Riedel, A., Schulz, D., Bergmann, L., Kikillus, A., Patzwahl, R., Rasquin, C., Schröder, M., Seiffert, R., Stachel, H., Wachler, B., Winkel, N., Höpp, S., Razafimaharo, C. & Rauthe, M. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. Unter Mitarbeit von Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Deutscher Wetterdienst (DWD). Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Koblenz. DOI: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07.
- Peter, M., Guyer, M., Füssler, J., Bednar-Friedl, B., Knittel, N., Gabriel, B., Schwarze, R. & Unger, M. von (2020): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland – Abschlussbericht: Analysen und Politikempfehlungen. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Ren, X., Weitzel, M., O'Neill, B. C., Lawrence, P., Meiyappan, P., Levis, S., Balistreri, E. J. & Dalton, M. (2018): Avoided economic impacts of climate change on agriculture: integrating a land surface model (CLM) with a global economic model (iPETS). *Climatic Change* 146 (3–4), S. 517–531. DOI: 10.1007/s10584-016-1791-1.
- Schmuker, C. (2021): Klimawandel: Extremtemperaturen gefährden die Gesundheit. Hg. v. Wissenschaftliches Institut der AOK (WIdO). *G+G Wissenschaft* 21(3). <https://www.wido.de/publikationen-produkte/ggw-gesundheit-gesellschaft-wissenschaft/ausgabe-3-2021/>, abgerufen am 22.05.2023.
- Statistisches Bundesamt (StBA) (2023): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Inlandsproduktberechnung. Detaillierte Jahresergebnisse 2022. Hg. v. Statistisches Bundesamt (StBA). Fachserie 18, Reihe 1.4.
- Stöver, B., Flaute, M. & Reuschel, S. (2022): Forschungsstand und Literatur zu den volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland – Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. GWS Research Report 2022/01, Osnabrück. <http://papers.gws-os.com/gws-researchreport22-1.pdf>.

- Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L. & Sandhövel, M. (2022a): Übersicht vergangener Extremweterschäden in Deutschland – Methodik und Erstellung einer Schadensübersicht. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_%C3%9Cbersicht%20vergangener%20Extremwetter-sch%C3%A4den_AP2_1.pdf, abgerufen am 10.04.2024.
- Trenczek, J., Lühr, O., Eiserbeck, L., Sandhövel, M. & Ibens, D. (2022b): Auswahlprozess zur Detailuntersuchung eines klimawandelbezogenen Extremereignisses – Methodisches Konzept und Anwendung. Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“. Hg. v. Prognos AG, Düsseldorf. https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_%20Auswahl_Untersuchungsereignisse_AP2_2.pdf.
- Umweltbundesamt (UBA) (2015): Monitoringbericht 2015 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel – Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Hg. v. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/monitoringbericht_2015_zur_deutschen_anpassungsstrategie_an_den_klimawandel.pdf, abgerufen am 10.04.2024.
- Voß, M., Kahlenborn, W., Porst, L., Dorsch, L., Nilson, E., Rudolph, E. & Lohrengel, A.-F. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland – Teilbericht 4: Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur. Hg. v. Umweltbundesamt. Climate Change 23/2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/kwra2021_teilbericht_4_cluster_infrastruktur_bf_211027_0.pdf, abgerufen am 10.04.2024.
- Wang, J., Vanga, S. K., Saxena, R., Orsat, V. & Raghavan, V. (2018): Effect of Climate Change on the Yield of Cereal Crops: A Review. *Climate* 6 (2), S. 41. DOI: 10.3390/cli6020041.
- Winne, J. de & Peersman, G. (2021): The adverse consequences of global harvest and weather disruptions on economic activity. *Nature Clim Change* 11 (8), S. 665–672. DOI: 10.1038/s41558-021-01102-w.
- Wolter, M. I., Bernardt, F., Daßler, J., Reuschel, S. & Stöver, B. (2023): Klimafolgen und Anpassung – 2023. Aus den Arbeiten zur Basisprojektion des INFORGE-Modells. GWS Research Report 2023/06, Osnabrück. <https://papers.gws-os.com/gws-researchreport23-6.pdf>.