

Anhang 5 Entwicklung der Wetterextreme unter dem Einfluss des Klimawandels

Wetterextreme wie Hitze- und Kältewellen, Hochwasser, Tornados oder Schneestürme sind Teil des normalen Wetters, zeigen aber besonders starke Abweichungen vom Durchschnitt und sind mit einem hohen Schadpotenzial für Menschen, Umwelt und Wirtschaft verbunden.

Wetterereignisse, die wir auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungen als extrem einstufen, werden sich durch die klimawandelbedingten Verschiebungen z. B. der Temperatur in ihrer Häufigkeit und ihrem Ausmaß verändern. Gegenwärtig verändert sich das arktische Klimasystem drastisch und sehr schnell. In der Folge kommt es zu einer Abschwächung der Intensität des Jetstream (Strahlstroms). Dadurch wird es vermutlich häufiger zu länger andauernden Kaltluft-einbrüchen aus nördlichen Richtungen bzw. zu Warmlufteinschüben aus südlichen Gebieten kommen, was insbesondere in Europa und Nordamerika zu Wetterextremen führen kann. Sogenannte Omega-Wetterlagen können wahrscheinlich infolge der Schwächung des Jetstreams über vergleichsweise lange Zeiträume stabil bleiben und zu länger andauernden abnormen Temperaturen, langen Regen- oder Trockenperioden führen (vgl. LOZÁN *et al.* 2018a, S 11 f.)

Temperaturextreme, insbesondere Hitzewellen

Es gilt als sicher, dass in Europa seit den 1950er-Jahren die Anzahl der warmen Tage und Nächste angestiegen und die der kalten Tage und Nächste geringer geworden ist. Außerdem gilt als gesichert, dass in den meisten Regionen Europas in den letzten Dekaden überproportional viele Hitzewellen aufgetreten sind. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extremer Hitzetage hat sich erhöht (DEUTSCHLÄNDER & MÄCHEL 2017, S. 48).

Insbesondere seit der Jahrtausendwende hat die Zahl der großen Hitzewellen in Europa deutlich zugenommen (MUTHERS & MATZARKIS 2018, S. 84). Von den zwölf stärksten europäischen Hitzewellen fallen sieben in die Jahre 2000–2018 (LOZÁN *et al.* 2018a). Definiert man Hitzewellen als eine mindestens 5 Tage andauernde Überschreitung der gemittelten Tagesmaximaltemperatur von 30 °C, dann zeigen Untersuchungen von MUTHERS & MATZARKIS (2018, S. 86 f.), dass es nicht nur in Südeuropa, sondern auch im Bereich der gemäßigten Klimate Deutschlands einen großflächig positiven Trend gibt, auch wenn dieser nicht überall statistisch signifikant ist. Dabei wird für die Region Stade für den Zeitraum 19981–2010 eine Zunahme von 0,5–2,5 Tage/10 Jahre angegeben. Deutlicher fällt der Trend aus, wenn nicht 30 °C als absolute Schwelle für die Definition einer Hitzewelle herangezogen wird, sondern als relative Schwelle das Überschreiten des 95. Perzentils der Tagesmaximaltemperatur. In diesem Fall ergibt sich für die Region Stade ein Trend von 2,5–4,5 zusätzlichen Tagen pro 10 Jahre.

Nach Angaben des DWD & EWK (2020, S. 6 f.) traten in Deutschland ab dem Jahr 2000 neun der zehn wärmsten Jahre seit 1981 auf, dabei waren die Jahre 2014, 2018 und 2019 um mehr als 2,5 °C wärmer als der Durchschnitt der Jahre 1881–1910. In Hamburg gab es 2020 acht heiße Tage in Folge. Vor 1994 gab es dort keine heißen Tage, seit 1994 schon sechs Mal 14-tägige Hitzeperioden mit mittleren Tagesmaximum der Lufttemperatur von mindestens 30 °C.

Für die Zukunft ist nach DEUTSCHLÄNDER & MÄCHEL (2017, S. 51) noch eine deutliche Verschärfung dieser Entwicklung zu erwarten, dabei könnten noch deutlich höhere Temperaturspitzenwerte erreicht werden als bisher. Auch wenn die Küsten und der Westen Deutschlands wegen der Nähe zu den Meeren nicht so gefährdet sind wie Ost- und Süddeutschland könnte die Anzahl von Hitzewellen bis zum Ende des Jahrhunderts auch in Norddeutschland um bis zu fünf Ereignisse pro Jahr zunehmen. DWD & EWK (2020, S. 7) erwarten bei einem weiterhin ungebremsten Treibhausgasausstoß im Zeitraum 2031–2060 eine weitere Zunahme der heißen Tage in Norddeutschland um 5–10 Tage. LOZÁN *et al.* (2018a, S. 13) gehen davon aus, dass bei fortgesetzten Emissionen Hitzewellen wie in den letzten Jahren zum Ende des 21. Jahrhundert Normalität sind.

Trockenperioden bzw. Dürren

Perioden mit extremer Trockenheit sind nicht auf die Sommermonate beschränkt, sondern können auch im Frühjahr und Herbst auftreten. Sie werden wesentlich durch die Stabilität von Hochdruckwetterlagen über Mitteleuropa bestimmt. Sind diese von längerer Dauer, verdunstet mehr Wasser aus dem Boden, als durch Regen zugeführt wird (GLADE *et al.* 2017, S. 112).

Dürren sind klimatologische Extremereignisse, die grundsätzlich in jedem Klima auftreten können. Sie entwickeln sich in der Regel langsam und betreffen meist ausgedehnte Gebiete. In früheren Jahrhunderten traten in Mitteleuropa einzelne schwere Dürren mit großer räumlicher Ausdehnung auf. In den letzten Jahrzehnten war Europa wiederholt von schweren Dürren betroffen (VOGT *et al.* 2018, S. 119 f.).

Nach VOGT *et al.* (2018, S. 121 f.) ist die Frage, ob sich seit Beginn des 20. Jahrhunderts für Europa ein Trend bezüglich der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Dürreereignissen belegen lässt, viel diskutiert. Sie gehen von einem Trend für ein zunehmendes Dürreerisiko im südlichen Europa und einem abnehmenden Risiko für das nördliche Europa aus. In Mitteleuropa sehen sie hingegen keinen eindeutigen Trend, verweisen aber darauf, dass der entscheidende Faktor für einen positiven Trend die Temperaturzunahme ist.

Die Anzahl von Tagen mit niedriger Bodenfeuchte hat nach Angaben von DWD & EWK (2020, S. 10) in Deutschland seit 1961 bereits deutlich zugenommen. Die trockenen Jahr 2018/19 gelten nach Einschätzung des Umweltbundesamt als beispiellos für die vergangenen 250 Jahre. Setzt sich der Klimawandel ungebremst fort, dann rechnen DWD & EWK (2020, S. 10) mit einer starken Zunahme der Trockenheit.

Länger anhaltende Trockenheit wirkt sich auch auf die Wasserführung von Flüssen und damit ihre Schiffbarkeit aus. Trifft sie mit starken östlichen Winden zusammen, kann das auch in der Tideelbe zu Beeinträchtigungen der Schifffahrt führen (CLAUßEN & STORCH 2011, S. 142).

Auch GLADE *et al.* (2017, S. 113) erwarten eine steigende Zahl von Hitzewellen und eine längere Dauer von Trockenphasen für Europa, in Mitteleuropa vor allem bei unverminderten Treibhausgasemissionen (RCP8.5). Sie weisen darauf hin, dass extreme Trockenheit auch die Waldbrandgefahr erhöht, dass die Anzahl von Tagen mit hoher Warnstufe in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen hat und extrem hohe Waldbrandgefahren in kürzeren Intervallen auftraten. Neben

direkten Folgen, wie Schäden an der Vegetation, Einschränkungen der Wasserversorgung oder der Binnenschifffahrt durch Wassermangel, werden als indirekte Wirkungen neben der zunehmenden Brandgefahr auch Beeinträchtigungen der Wasserqualität und Produktionseinschränkungen bei wasserabhängigen Industrien genannt (vgl. z. B. VOGT *et al.* 2018, S. 120).

Stark- und Dauerregen

Für das Niederschlagsgeschehen sind die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean von großer Bedeutung, denn die meisten Regenfälle in Europa entstehen durch das rasche Heranführen warmer und feuchter Meeresluft in sogenannten atmosphärischen Flüssen. (HOHAGEMANN & ROCKEL 208, S. 161). Eine Folge der Erwärmung der Meere ist eine stärkere Verdunstung, die zu einer Intensivierung der Niederschlagsereignisse beiträgt. Welche Regionen davon betroffen sind, hängt von der atmosphärischen Zirkulation ab, die durch die Schwächung des Jetstreams beeinflusst wird. Zeitreihen zeigen, dass die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen in Mitteleuropa zunimmt (LOZÁN *et al.* 2018a, S. 15). Starkregen kann zu schnell ansteigenden Wasserständen und Überschwemmungen führen, die häufig auch mit Bodenerosion verbunden sind (UBA 2019, S. 24).

Der DWD unterscheidet kurzzeitigen Starkregen mit hohen Niederschlägen in wenigen Stunden und Dauerregen mit ≥ 24 Stunden Dauer. Die Häufigkeit von Starkniederschlägen durch winterlichen Dauerregen hat in Deutschland in den vergangenen 65 Jahren bereits um rund 25 % zugenommen. Im Sommer sind in Mitteleuropa vorwiegend kurzzeitige Starkniederschläge relevant, über die es noch vergleichsweise wenige Erkenntnisse aber Anhaltspunkte für eine Zunahme der Intensität mit steigender Temperatur gibt (UBA 2019, S. 25; DWD & EWK 2020, S. 12).

Sommerliche Starkniederschläge weisen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität auf (KUNZ *et al.* 2017, S. 58). Während die räumliche Verteilung moderaten Starkregens stark an das Relief gebunden ist, können extreme kleinräumige Starkregen kurzer Dauer und mit hohem Schadpotenzial jedes Gebiet in Deutschland treffen (UBA 2019, S. 25 f.).

Gewitter

Gewitter sind häufig mit Ereignissen wie Blitzschlag, Hagel, Starkniederschlag und heftigen Windböen verbunden von denen ein beträchtliches Schadpotenzial ausgeht (MÖHRLEIN *et al.* 2018, S. 234). Sie entstehen auf verschiedenen Wegen, erfordern aber immer einige gleiche Voraussetzungen atmosphärischer Gegebenheiten: hauptsächlich große vertikale Temperaturunterschiede, ausreichende Feuchte sowie einen Auslöser, der für die Freisetzung der in der Atmosphäre gespeicherten Energie sorgt (MÖHRLEIN *et al.* 2018, S. 229).

Die Anzahl der Gewittertage pro Jahr ist gebietsabhängig. In Europa gibt es die meisten Gewittertage in Gebirgsregionen und in Osteuropa. In Norddeutschland ist die Anzahl der Gewittertage im Vergleich dazu deutlich geringer (MÖHRLEIN *et al.* 2018, S. 233 f.).

Eine Trendanalyse für 2007–2017 ergab für Südeuropa einen Anstieg und für Mitteleuropa eine Abnahme der Zahl der Gewittertag. Dabei gibt es aber dennoch räumliche Unterschiede. So ist für das norddeutsche Tiefland eine leichte Erhöhung der jährlichen Gewittertage, aber in den Mittelgebirgen eine Abnahme erkennbar (MÖHRLEIN *et al.* 2018, S. 233 f.).

Nach Angaben von DWD & EWK (2020, S. 14) gibt es sowohl in Deutschland als auch in Europa bei den durch Gewitter verursachten Schadenssummen seit 1980 einen deutlichen Anstieg.

Hagel(-stürme)

Hagel bildet sich im Aufwindbereich organisierter Gewittersysteme, wenn sich eine Vielzahl unterkühlter Tröpfchen an die wenigen verfügbaren Eiskeime anlagern. Hagelkörner haben einen Durchmesser > 5 mm und können die Größe von Tennisbällen oder Grapefruits erreichen. Sie haben Fallgeschwindigkeiten von 30–150 km/h und verursachen durch die damit verbundene kinetische Energie beim Aufprall erhebliche Schäden (KUNZ *et al.* 2017, S. 236 f.; KUNZ *et al.* 2018, S. 61).

Aufgrund der speziellen atmosphärischen Bedingungen für die Entstehung von Hagel, kommt er in einem Gebiet nur recht selten vor. Da der Aufwindbereich von Gewittersystemen sowohl zeitlich als auch räumlich stark begrenzt ist, sind die von Hagel betroffenen Flächen meist auch nur sehr kleinräumig. Entsprechend lassen sich diese Ereignisse nicht direkt über Stationsmessungen beobachten. Daher beruhen Studien zum Hagel vorwiegend auf indirekten Beobachtungen und Rückschlüssen aus Fernerkundungsdaten (KUNZ *et al.* 2017, S. 237 f.; KUNZ *et al.* 2018, S. 61). Bezüglich der räumlichen Verbreitung gibt es Unterschiede. In Deutschland zeigen Untersuchungen eine Zunahme der Hageltage von Norden nach Süden sowie einige lokale Maxima über und stromab von Mittelgebirgen (KUNZ *et al.* 2017, S. 238 f.; KUNZ *et al.* 2018, S. 61).

Verschiedene Studien zeigen übereinstimmend, dass das Potenzial für die Entstehung von Gewitter und Hagel in Deutschland seit 1980 moderat zugenommen hat. Allerdings weisen langfristige Trendanalysen seit 1950 auch auf eine hohe jährliche und mehrjährige Variabilität. Ob der beobachtete Anstieg auf den Klimawandel oder die natürliche Variabilität zurückzuführen ist, ist noch unklar (KUNZ *et al.* 2018, S. 239 f.).

Erste Studien deuten darauf hin, dass durch den Klimawandel und die damit verbundene Erwärmung in Deutschland und Europa generell mehr und intensivere Hagelstürme zu erwarten sind. Hagelmodelle projizieren einen leichten Anstieg der Hagelwahrscheinlichkeit für 2021–2050, der für den Nordwesten und Süden Deutschlands statistisch signifikant ist. Zum Ende des Jahrhunderts (2071–2100) hat ein Ensemble von 14 Klimasimulationen robuste Änderungen in den meisten Regionen Süd-, Zentral-, Mittel- und Osteuropas ergeben (KUNZ *et al.* 2018, S. 240; LOZÁN *et al.* 2018a, S. 17).

Meeresspiegelanstieg

Gemäß Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (UBA 2015) beträgt der globale Meeresspiegelanstieg von 1901–2010 ca. 19 cm bzw. 1,7 mm/Jahr. Allerdings war er mit ca. 3,2 mm/Jahr in den letzten 20 Jahren deutlich höher. Nach den für den Sachstandsbericht 2013 vorliegenden Projektionen war bis Ende des 21. Jahrhunderts ein Meeresspiegelanstieg um weitere 26–55 cm beim niedrigsten Emissionsszenario und von 45–82 cm ohne Emissionseinschränkungen plausibel. Aber auch ein noch deutlich höherer Anstieg wurde nicht ausgeschlossen (UBA 2015, S. 66). Auch MEINKE (2020, S. 29 f.) und STORCH *et al.* (2018, S. 69) gehen noch von einem Anstieg bis Ende des Jahrhunderts in der Bandbreite von 30 bzw. 40 cm bis 80 cm aus. Auf der Basis des Sonderberichts über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (SROCC) vom September 2019 gibt der Monitoringbericht 2019 (UBA 2019, S. 62) die wahrscheinliche Bandbreite des globalen Meeresspiegelanstiegs von 2000–2100 mit deutlichen höheren Werten von 61–110 cm und einem Medianwert von 84 cm an.

In der Deutschen Bucht ist der Meeresspiegel nach MEINKE (2020, S. 29 f.) in den letzten 100 Jahren um ca. 15–20 cm angestiegen, d. h. der Anstieg liegt in der gleichen Größenordnung wie der globale Meeresspiegelanstieg. Sie verweist darauf, dass nach Studien in der Nordsee auch in Zukunft von einem Anstieg im Rahmen der Spannweite des globalen Anstiegs zu erwarten ist. Dabei ist jedoch nach STORCH *et al.* (2018, S. 60) von einer erheblichen räumlichen Variabilität des Anstiegs in der Deutschen Bucht auszugehen.

Am Pegel Cuxhaven wurden seit 1981 signifikant steigende Werte für die Tidehoch- und Tide-niedrigwasserstände festgestellt (UBA 2015, S. 67; STORCH *et al.* 2018, S. 70 f.). Mögliche Ursachen sind der Meeresspiegelanstieg, natürliche morphologische Veränderungen sowie Küstenschutz- und Ausbaumaßnahmen. Das gilt auch für Änderungen der hydrodynamischen Parameter in der Tideelbe. Dort hat sich zwischen 1952 und 2008 die Differenz des Tidemittelwassers von Cuxhaven bis St. Pauli von 50 cm auf 25 cm verringert. Die mittlere Flutdauer hat sich verlängert, die Ebbdauer entsprechend verkürzt.

Nach Simulationen – die die Elbvertiefung noch nicht berücksichtigen – verändern sich in der Tideelbe bei steigendem Meeresspiegel nicht nur die Wasserstände, sondern auch die Strömungsgeschwindigkeiten. Dabei wird das mittlere Tidehochwasser stärker angehoben als das mittlere Tideniedrigwasser, der Tidenhub also vergrößert. Voraussichtlich wird außerdem in den meisten Bereichen die Flutstromdominanz verstärkt. Es ist davon auszugehen, dass der Meeresspiegelanstieg die Tidedynamik verändert, was morphologische Veränderungen zur Folge hat, die wiederum Einfluss auf die Tidedynamik haben. Konkrete Aussagen zur zukünftigen Hydrodynamik der Tideelbe gibt es zurzeit noch nicht, sie würden langfristige morphodynamische Simulationen erfordern, die mit großen Unsicherheiten behaftet wären (STORCH *et al.* 2018, S. 73 f.).

Sturmfluten

Sturmfluten können zu Schäden an küstennahen Gebäuden und Infrastrukturen führen. Bei der Entstehung solch extremer Wasserstände wirken verschiedene Faktoren zusammen. Neben dem Windstau, der von Stärke und Richtung des Windes zur Küste abhängt, sind das unter anderem der Luftdruck, die astronomischen Gezeiten, der vom Wind erzeugte Seegang, der Meeresspiegel und die Gestalt der Küste. In der Nordsee können auch Fernwellen aus dem Nordatlantik beteiligt sein. Im Bereich der Ästuarie kommen als Einflussgrößen auch der Abfluss aus dem Binnenland und die Folgen wasserbaulicher Maßnahmen hinzu (vgl. CLAUBEN & STORCH 2011, S. 142; WEIßE & MEINKE 2017, S. 22 f.; BAW 2018, S. 23; WEISSE 2018, S. 78 ff.; UBA 2019, S. 64).

Wie in Anhang 4 beschrieben, unterliegen die Sturmaktivitäten in Norddeutschland starken Schwankungen und es ist nicht geklärt, ob der Klimawandel darauf bereits Einfluss hatte. Zudem haben die Klimaprojektionen unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf die Frage, ob Winterstürme bis zum Ende des 21. Jahrhunderts häufiger werden oder nicht. Fast alle Studien gehen aber von einer klimawandelbedingten Intensivierung der Stürme über dem Nordatlantik und Nordeuropa aus. Dabei verlagert sich der Storm Track meist polwärts oder dehnt sich ostwärts in Richtung Europa aus (FESER & TINZ 2018, S. 205; STORCH *et al.* 2018, S. 33).

Extreme Wasserstände an den Küsten haben sich weltweit in den vergangenen Jahrzehnten erhöht. Diese Erhöhung ist vorwiegend auf den Meeresspiegelanstieg zurückzuführen. Windbedingte Beiträge haben sich mit wenigen Ausnahmen nicht wesentlich verändert. Auch im Bereich der deutschen Nordsee laufen Sturmfluten gegenwärtig höher auf als noch vor ca. 100 Jahren, ohne dass sich die Windverhältnisse systematisch verändert haben. Dabei können aber aufgrund hydrodynamischer Wechselwirkungen zwischen Windstau und Meeresspiegelanstieg, Änderungen der Extremwasserstände lokal höher ausfallen als der Meeresspiegelanstieg allein (vgl. WEISSE 2018, S. 222 ff.).

Bezüglich des Seegangs, kommt der 5. Sachstandsbericht zu der Einschätzung, dass bisher beobachtete Trends im Wesentlichen auf natürliche Schwankungen zurückzuführen sind. So zeigen Untersuchungen für die Nordsee zwar eine erhebliche Variabilität von Jahr zu Jahr und über Jahrzehnte, aber bisher keine signifikante langfristige Veränderung (WEISSE 2018, S. 226).

Nach (CLAUBEN & STORCH 2011, S. 148) sowie (STORCH *et al.* 2018, S. 72) haben sich auch am Pegel Cuxhaven die extremen Wasserstände in der Tideelbe im Zeitraum 1843–2006 mit dem Meeresspiegelanstieg, aber nicht durch meteorologische Einflüsse erhöht. Am Pegel St. Pauli Hamburg ist es dagegen – insbesondere in den letzten 40 Jahren – sowohl zu einer Zunahme der Häufigkeit der Sturmflutereignisse als auch zu einer Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände gekommen, die über den Anstieg des relativen mittleren Meeresspiegels hinausgeht. Diese Unterschiede in der Entwicklung führen sie auf Deicherhöhungen, Strombaumaßnahmen, Fahrrinnenvertiefungen und Veränderungen der Hafenbecken zurück.

LOZÁN *et al.* (2018a, S. 15) und DWD & EWK (2020, S. 13) weisen darauf hin, dass das Hochwasserrisiko an Flüssen zugenommen hat, da sich die Zahl der Tage mit entsprechenden Großwetterlagen seit Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland deutlich erhöht hat. Insbesondere in den

letzten drei Dekaden war die Zahl der Ereignisse 2–3 Mal so hoch, wie Anfang des 20. Jahrhunderts. Um den Einfluss des Abflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Tideelbe abzuschätzen, hat die Bundesanstalt für Wasserbau Sturmflutszenarien mit verschiedenen Abflüssen von 2.200–3.700 m³/s untersucht. Dabei führten die unterschiedlichen Abflüsse im Abschnitt zwischen Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli zu Unterschieden im Bereich einiger Zentimeter, weiter stromauf stieg der Einfluss auf wenige Dezimeter (BAW 2018, S. 23).

Während starke Winde aus nordwestlichen Richtungen zu Sturmfluten in der Elbe führen können, kann es bei starken Winden aus östlichen Richtungen und niedrigem Oberwasserabfluss auch zu signifikant niedrigeren Wasserständen in der Tideelbe und damit zu Behinderungen der Schifffahrt kommen, wie zum Beispiel im Juli 1992 (CLAUBEN & STORCH 2011, S. 142).

Tornados

Tornados – auch Wind- oder Wasserhosen genannt, sind heftig drehende Wirbel, die sich von einer Mutterwolke bis zur Erdoberfläche ausdehnen. Dabei sind sie in der Regel kleinräumig, mit Ausdehnungen von einigen Metern bis zu einem halben oder selten auch über einem Kilometer. Und sie sind kurzlebig, mit einer Lebensdauer von einigen Sekunden bis zu mehr als einer Stunde. Ihre Zugbahnen können zwischen wenigen Metern und mehreren Dutzend Kilometern variieren. Diese kleinräumigen Stürme können Geschwindigkeiten von bis zu 500 km/h erreichen und dabei verheerende Schäden verursachen (LOZÁN *et al.* 2018b, S. 243 f.).

Unterschieden werden sechs Kategorien der Tornado nach ihrer Stärke: von sehr schwachen Tornados (F0), die nur leichte Schäden verursachen bis hin zu sehr verheerenden (F5), die zu völliger Zerstörung führen. Während in den USA in der Regel mehr als 1.000 Tornados pro Jahr beobachtet werden, treten in Europa jährlich schätzungsweise ca. 500–600 solcher Windhosen auf. Sie sind jedoch aufgrund ihrer Kleinräumigkeit und Kurzlebigkeit schwer zu erfassen, so dass von einer hohen Dunkelziffer auszugehen ist. In Deutschland werden 30–60 Tornados pro Jahr registriert. Meist (knapp 90 %) sind sie eher der Kategorie schwach (F1) zuzuordnen. Zwar sind verheerende Tornados (F4, F5) in Europa selten, aber auch in Deutschland möglich und in der Vergangenheit schon beobachtet worden (LOZÁN *et al.* 2018b, S. 245).

Tornados können das ganze Jahr auftreten, sind aber meistens eng mit der warmen Jahreszeit und der Gewitterhäufigkeit gekoppelt, wenn sich feuchtwarme Luftmassen bis nach Mitteleuropa ausbreiten (LOZÁN *et al.* 2018a, S. 17). Die Nordhälfte Deutschlands gehört nach LOZÁN *et al.* (2018b, Abb. 6.3-6 S. 246) zu einem Gebiet mit der höchsten Dichte von Tornados in Europa und Nordwestdeutschland und damit auch das Vorhaben liegt innerhalb des Gebietes mit der höchsten Dichte von stärkeren Tornados (≥ F2).

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts nehmen in Deutschland die Tornadomeldungen zu, was aber wahrscheinlich auf eine größere Aufmerksamkeit der Bevölkerung für dieses Thema zurückzuführen ist. Eine Zunahme der Tornados infolge des Klimawandels kann bis jetzt aufgrund der hohen Dunkelziffern in der Vergangenheit nicht nachgewiesen werden (LOZÁN *et al.* 2018a, S. 17; LOZÁN *et al.* 2018b, S. 248 f.; DWD 2020, S. 43).

Anleger für verflüssigte Gase Stade mit Südhafen-Erweiterung

Oldenburg, 08.06.2022

Gemäß nationalem Klimabericht (DWD 2020, S. 43) ist auf der Basis der vorliegenden regionalen Klimaprojektionen nicht abzuleiten, dass Tornados zukünftig in Deutschland häufiger auftreten werden. Aufgrund des zunehmenden Energiepotenzials könnte es aber zu einer Zunahme des Anteils stärkerer Tornados kommen.