

# Klimawandelanpassung von See- und Binnenhäfen in Deutschland – Erste Erkenntnisse der AG KlimaHafen

Prof. Dr.-Ing. B. Koppe, Hochschule Wismar, Wismar  
Dipl.-Ing. L. Lankenau, bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven  
im Namen der HTG-Arbeitsgruppe KlimaHafen

*Die ersten in der HTG-Arbeitsgruppe KlimaHafen gesammelten Erkenntnisse zur klimawandelbezogenen Verwundbarkeit der Hafensupra- und -infrastruktur sowie des Betriebs deutscher Häfen können wie folgt zusammengefasst werden:*

- *Verändertes Wasserdargebot (Hoch- und Niedrigwasser) im Binnenland sowie eine Zunahme mittlerer Wasserstände und Seegangsintensität an den Küsten.*
- *Sturmfluten werden zukünftig höher auflaufen und die Dauer hoher Wasserstände wird sich verlängern.*
- *In Folge der globalen Erwärmung kommt es zu regionalen Verlagerungen oder zu einer Zu- bzw. Abnahme von extremen Wetterereignissen wie Hitzewellen oder strengen Frösten.*
- *Die zukünftige Entwicklung der Niederschlagsverhältnisse in Deutschland ist unsicher. Es ist tendenziell mit einer Zunahme der Niederschlagsmenge in den Wintermonaten und einer Abnahme in den Sommermonaten zu rechnen.*
- *Aktuell können für die Windintensität keine Trendaussagen aus Modellrechnungen im Rahmen des Klimawandels abgeleitet werden, da die Ergebnisse stark von Modell zu Modell variieren.*

## 1. Hintergrund

Im Januar 2022 wurde in der Hafentechnischen Gesellschaft HTG die Arbeitsgruppe 'Klimawandelanpassung von See- und Binnenhäfen in Deutschland' (kurz: KlimaHafen) mit dem Ziel gegründet, nationale Empfehlungen zum Thema zu erarbeiten. Die HTG-Arbeitsgruppe setzt sich zur Adressierung der unterschiedlichen zu behandelnden Aspekte aus Fachleuten der Disziplinen Meteorologie, Ozeanographie und Hydrologie sowie Planung, Bau und Betrieb von See- und Binnenhäfen zusammen. Die Fertigstellung der Empfehlungen der Arbeitsgruppe KlimaHafen ist für das 1. Quartal 2025 geplant.

Die folgenden Themen werden in der HTG-Arbeitsgruppe KlimaHafen mit speziellem Bezug auf deutsche See- und Binnenhäfen im Detail behandelt:

1. Grundlagen des Themenfelds Klimawandel inklusive Diskussion der systemimmanenten Unsicherheiten
2. Forschungsstand zu den Folgen des Klimawandels in Deutschland
3. Relevanz klimatischer Änderungen für die Hafengewirtschaft
4. Klimawandelbezogene Verwundbarkeit deutscher Häfen und Anpassungsoptionen
5. Entwicklung hafengerechter Anpassungsstrategien
6. Fallstudien zur Klimawandelanpassung von See- und Binnenhäfen

Der vorliegende Text enthält einen Zwischenstand der bisher in der Arbeitsgruppe erzielten Ergebnisse, wobei in erster Linie auf die Grundlagen des Klimawandels und auf den Klimawandel in Deutschland eingegangen wird.

## 2. Relevante Klimaparameter und Klimaprozesse für die deutsche Hafenwirtschaft

Die deutschen Seehäfen mit ihrer Lage an der Schnittstelle von Meer und Land werden in besonderer Weise von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein (Abb. 1). Hierzu zählen neben dem Meeresspiegelanstieg und dessen Auswirkung auf die Tide- und Morphodynamik die Zunahme von extremen Temperatur- und Niederschlagsereignissen sowie mögliche Änderungen der Sturmintensität bzw. Sturmaktivität und der Wasserchemie.

Auch in den deutschen Binnenhäfen mit ihrer Lage an großen europäischen Flüssen werden Klimawandelprozesse zunehmend Planung und Betrieb beeinflussen. Insbesondere zu nennen sind hier eine Zunahme von Extremwetterlagen und –perioden, ein verändertes Wasserdargebot in den Häfen (Niedrigwasser, Hochwasser), eine veränderte Gewässermorphologie an den Ein- und Ausfahrten sowie veränderte Abladeverhältnisse.

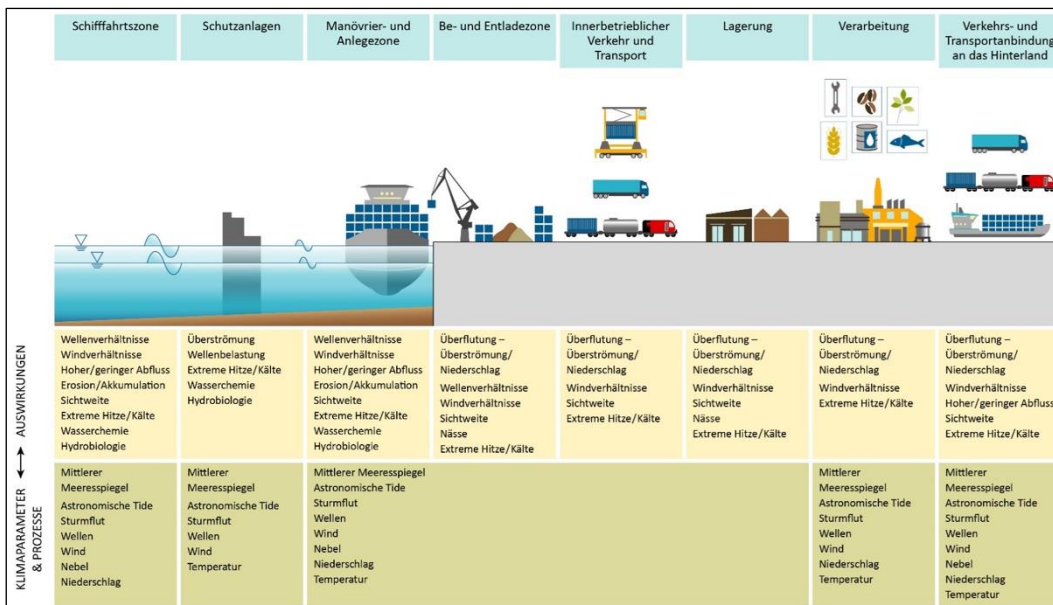


Abb. 1: Für Seehäfen relevante Klimaparameter und Klimaprozesse und deren Auswirkungen

## 3. Grundlagen des Klimawandels

In so genannten Sachstandberichten formuliert das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) seit 1988 in regelmäßigen Abständen über den aktuellen Wissensstand bezüglich des Klimawandels, um Informationen zur Entwicklung einer faktenbasierten Klimapolitik bereitzustellen. Die nachfolgende Kurzdefinition der Grundlagen soll an dieser Stelle lediglich eine kurze Übersicht dieses umfangreichen Themas darstellen. Das Klima ist definiert als eine Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen hinreichend langen Zeitraum an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren. Es bestehen vielfältige Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und der Hydrosphäre (Ozeane,

Flüsse, Seen), der Biosphäre (Fauna, Flora), der Lithosphäre (feste, unbelebte Erde) und der Kryosphäre (Eis, Gletscher, Permafrost). Die Gesamtheit dieser Komponenten wird Klimasystem genannt.

Gemäß den Empfehlungen der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) ist es üblich, zur Erfassung des Klimas und seiner Änderungen einen Zeitraum von 30 Jahren zu verwenden, um den Einfluss der natürlichen Variabilität bei der statistischen Betrachtung des Klimas auszuklammern. Der jüngste Referenzzeitraum umfasst die Jahre 1991 – 2020. Für die Bewertung des Klimawandels wird weiterhin die WMO-Referenzperiode 1961 – 1990 verwendet und mit Messdaten der jüngeren Vergangenheit verglichen.

Das Klima der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft ist variabel. Aus der Erdgeschichte sind Eis- und Warmzeiten bekannt. Der Hauptantrieb des Klimasystems der Erde ist die eintreffende Sonnenstrahlung. Diese wird in der Atmosphäre und im Erdboden in Wärmestrahlung umgewandelt und sorgt für eine globale Mitteltemperatur der bodennahen Luftschicht von etwa  $-18\text{ °C}$ <sup>1</sup>. Der Treibhauseffekt, der im Wesentlichen durch die natürlich vorkommenden Treibhausgase (insbesondere Wasserdampf) verursacht wird, erwärmt die Erdoberfläche im globalen Mittel auf  $15\text{ °C}$  und ermöglicht damit das Leben auf der Erde. Dieses natürliche Gleichgewicht wird durch die Emission anthropogener Treibhausgase gestört. Der anthropogene Treibhauseffekt führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Atmosphäre. Welche Auswirkung die Zunahme der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen auf das Klima hat, ist im Detail nicht ganz einfach zu beantworten. Da es keine einfachen Ursache-Wirkungsketten im Klimasystem gibt, hat die Änderung eines Parameters (zum Beispiel der Globalstrahlung) die Änderung vieler anderer Parameter (zum Beispiel Temperatur, Luftdruck, Verdunstung, Bewölkung) zur Folge. Darüber hinaus kommt es zu positiven und negativen Rückkopplungen (Verstärkungen und Abschwächungen der Wirkungen von Prozessen). Deshalb ist es notwendig, umfangreiche computergestützte Klimamodelle einzusetzen und mit Hilfe hochleistungsfähiger Super-Computer mögliche künftige Klimaänderungen zu prognostizieren.

Klimaänderungen können natürlichen oder menschlichen Ursprungs sein. Die vom Menschen verursachten Eingriffe in die Zusammensetzung der Atmosphäre und Landnutzung wirken sich auf das gesamte Ökosystem aus. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist eine deutliche Erwärmung der oberflächennahen Luftschichten der Kontinente und Ozeane zu verzeichnen. Die Temperaturentwicklung wird als eindeutig und wissenschaftlich abgesichert sowie in den Folgen als sehr gravierend bewertet. Abb. 2 zeigt die Abweichung der globalen Temperatur vom 100-jährigen Mittel (1901-2000) für den Zeitraum 1880 bis 2018. Aussagen zu Niederschlägen und zum Wind zeigen eine größere Variabilität und sind weniger eindeutig.

Die Erderwärmung verändert die gesamte atmosphärische Zirkulation. In den letzten Jahrzehnten zeigen sich die Folgen der Klimaänderung unter anderem in der Zunahme von heißen Temperatur-extremen, im Anstieg des globalen Meeresspiegels, in der Veränderung der Niederschlagsverteilung und in der Verschiebung von Vegetationszonen.

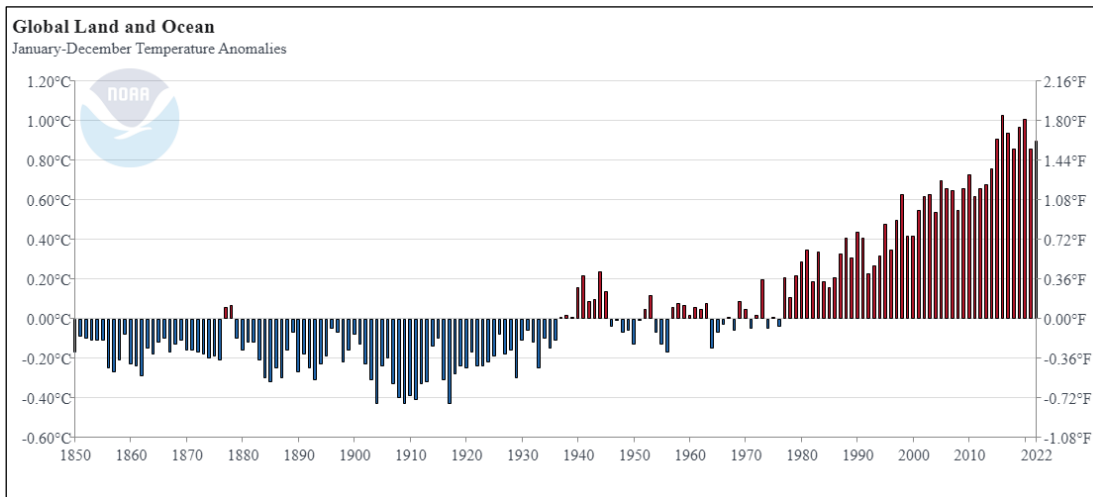
Der untere Teil der Atmosphäre, in der das Wettergeschehen stattfindet, reagiert sehr schnell in einem Zeitraum von Minuten bis Tagen auf Veränderungen und weist die größte Variabilität auf.

---

<sup>1</sup> [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel\\_node.htm](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.htm)

Der tiefe Ozean, die Eisschilde und der Boden sind trägere Komponenten des Klimasystems und reagieren mit Verzögerungen von Jahrhunderten bis hin zu Jahrtausenden.

Es ist nicht möglich, den Einfluss des Menschen auf das Klima der nächsten Jahre und Jahrzehnte exakt zu beschreiben. Möglich sind aber Annahmen über den wahrscheinlichen Verlauf der Einflussnahme. Diese Annahmen werden in der Wissenschaft Szenarien genannt. In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl denkbarer Szenarien entwickelt, die einen mehr oder minder starken Einfluss des Menschen auf das Klima beschreiben.



**Abb. 2: Abweichung der globalen Mitteltemperatur<sup>2</sup>**

Unter dem Begriff Klimaszenario versteht man die plausible Beschreibung der zukünftigen Entwicklung des Klimas, basierend auf kohärenten und in sich konsistenten Annahmen wesentlicher Einflussfaktoren (IPCC, 2018). Solche wesentlichen Einflussfaktoren für das Klima sind z.B. das Wachstum der menschlichen Bevölkerung, das Wirtschaftswachstum und der technische Fortschritt, die alle wiederum Einfluss auf die Netto-Emission von Treibhausgasen und damit deren Konzentration in der Erdatmosphäre haben. Auf der Grundlage solcher Klimaszenarien werden dann Klimaprojektionen erstellt. Die Klimaprojektionen geben Auskunft über die potenzielle zukünftige Entwicklung verschiedener meteorologischer Parameter, wie z.B. Temperatur oder Niederschlag, in Abhängigkeit von den Annahmen des jeweiligen Szenarios. Klimaprojektionen werden in der Regel mithilfe von Klimamodellen erstellt. Bei Klimaprojektionen handelt es sich um 'Was-wäre-wenn'-Simulationen. Sie stellen keine Vorhersagen dar, sondern sind nur unter den getroffenen Annahmen, z.B. der Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration, gültig.

In den aktuell verfügbaren Klimaprojektionen werden die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) definierten RCP-Szenarien (IPCC 2013) und SSP-Szenarien (IPCC 2021) verwendet. Die RCP-Klimaszenarien leiten den Strahlungsantrieb der zunehmenden Treibhausgaskonzentration nicht aus sozio-ökonomischen Faktoren ab, sondern legen bestimmte Änderungen des Strahlungsantriebs bis 2100 gegenüber dem vorindustriellen Antrieb fest. Die SSP-Klimaszenarien stellen die globalen gesellschaftlichen, demographischen und ökonomischen Veränderungen in den Mittelpunkt. Generell unterschieden werden können die Hochemissionsszenarien entsprechend SSP5

<sup>2</sup> <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>

bzw. RCP8.5 sowie die Niedrigemissionsszenarien SSP1 und RCP2.6 (Abb. 3). Der aktuelle globale Ausstoß des Treibhausgases CO<sub>2</sub> lässt zumindest für die nahe Zukunft einen Verlauf zwischen dem SSP5- und dem SSP3-Szenario erwarten.

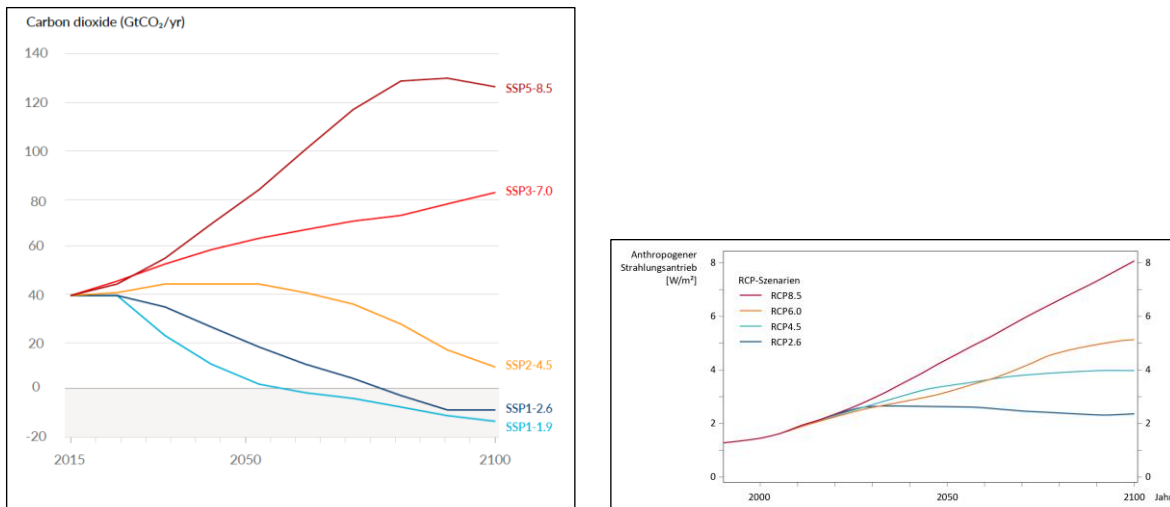


Abb. 3: SSP- und RCP-Klimaszenarien (IPCC 2021; nach IPCC 2013)

## 4. Klimawandel in Deutschland

### 4.1 Atmosphäre

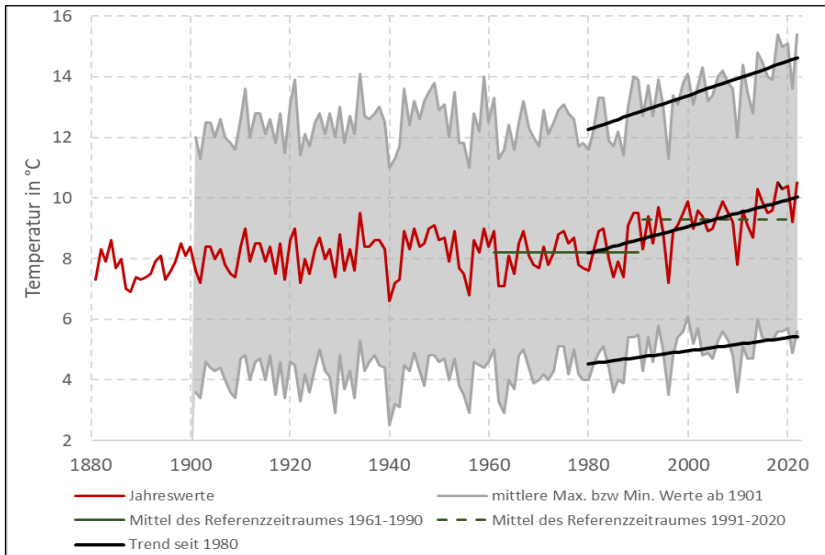
Deutschland liegt in der gemäßigten Klimazone, wobei der Norden des Landes stark maritim geprägt ist, der Osten und Süden hingegen einem kontinentaleren Einfluss unterliegt. Die Temperatur zeigt einen ausgeprägten Jahresgang, der Niederschlag ist ganzjährig vorhanden. Die Witterung wird durch den Wechsel von Hoch- und Tiefdruckgebieten bestimmt.

#### 4.1.1 Temperatur

In Abb. 4 ist die Temperaturentwicklung in Deutschland seit 1881 dargestellt. Ab etwa der Mitte der 1980er Jahre zeigt sich ein deutlicher Aufwärtstrend. Vierzehn der zwanzig wärmsten Jahre liegen im 21. Jahrhundert. Die bisher wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1881 waren 2018 und 2022 mit 10,5°C<sup>3</sup>. Vergleicht man den aktuellen Referenzzeitraum 1991-2020 mit dem vorangegangenen Referenzzeitraum 1961-1990, so hat sich die mittlere Jahrestemperatur in Deutschland von 8,2°C um 1,1 K auf 9,3°C erhöht. Bei den mittleren Extremwerten der Temperatur zeigen die Maxima einen stärkeren Aufwärtstrend als die Minima.

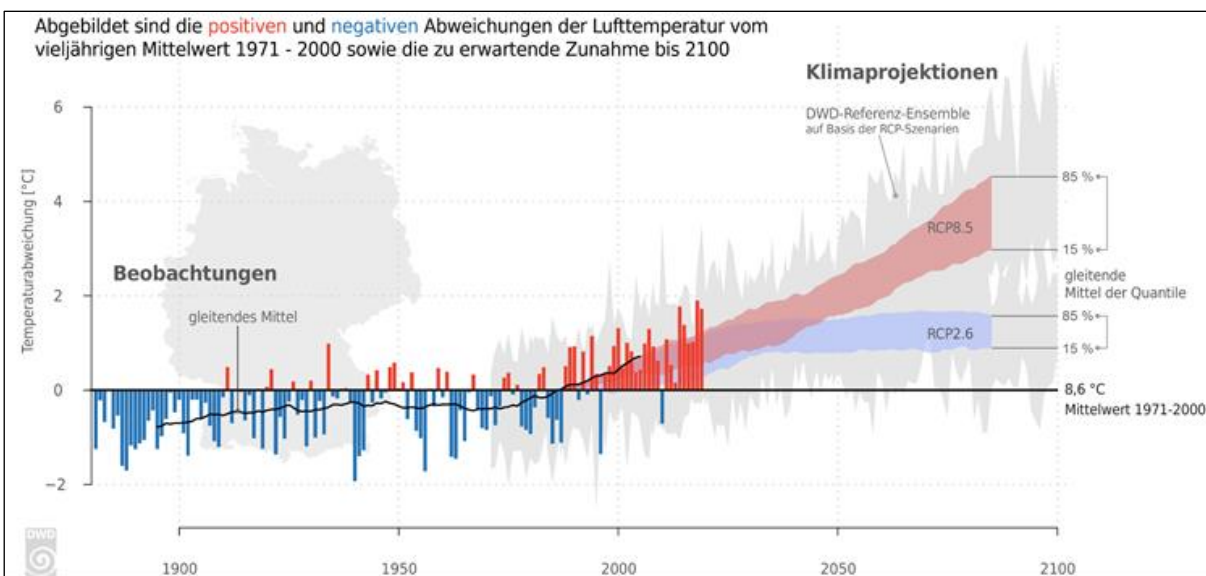
Eine weitere Erhöhung der Jahresmitteltemperatur in Deutschland ist zu erwarten. Dabei zeigt sich vor allem beim Blick in die fernere Zukunft eine starke Abhängigkeit vom gewählten Szenario (Abb. 5). Basierend auf dem Klimaschutz-Szenario ist eine Erhöhung der Lufttemperatur um 1,1 °C (Bezugszeitraum 1971-2000) bis 2100 zu erwarten. Unter den Bedingungen des Weiter-wie-bisher-Szenarios beträgt die Erwärmung im Mittel etwa 3,9 °C. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,8 und 5,2 °C (DWD, 2022).

<sup>3</sup> <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=480164#buehneTop>

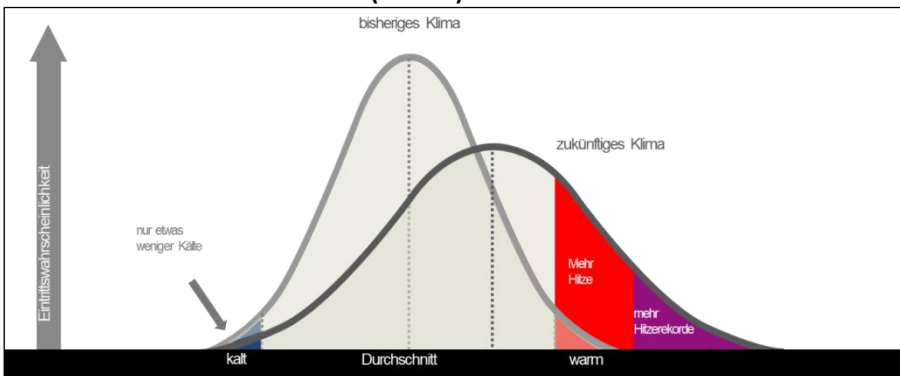


**Abb. 4: Zeitreihe der Jahresmittel der Temperatur (Flächenmittel aus Stationsmessungen in 2 m Höhe) von 1881–2022 (Datengrundlage: Climate Data Center DWD)**

In Folge der globalen Erwärmung treten starke Veränderungen bei extremen Wetterereignissen auf. So kommt es zu regionalen Verlagerungen oder zu einer Zu- bzw. Abnahme von extremen Wetterereignissen wie Hitzewellen oder strengen Frösten. Es ist davon auszugehen, dass sich die globale Erwärmung mit den hier beschriebenen Auswirkungen in den kommenden Dekaden fortsetzen und damit verschärfen wird. Dieses bewirkt eine zunehmende Neigung zu Tagen mit hohen Temperaturen bei gleichzeitiger Abnahme der Neigung zu Tagen mit niedrigen Temperaturen (Abb. 6). Neue Temperaturrekorde werden wahrscheinlicher. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es im Rahmen der natürlichen Variabilität weiterhin auch kalte Winter, kühle Sommer und die Gefahr von Spätfrösten geben wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für diese drei genannten Ereignisse nimmt jedoch in Folge der globalen Erwärmung ab.



**Abb. 5: Entwicklung der Temperatur in Deutschland bis ins Jahr 2100 unter dem Niedrigemissionsszenario (RCP2.6) und dem Hochemissionsszenario (RCP8.5)<sup>4</sup>**



**Abb. 6: Theoretische Darstellung der Veränderung der Häufigkeiten von Temperaturen mit dem Klimawandel**

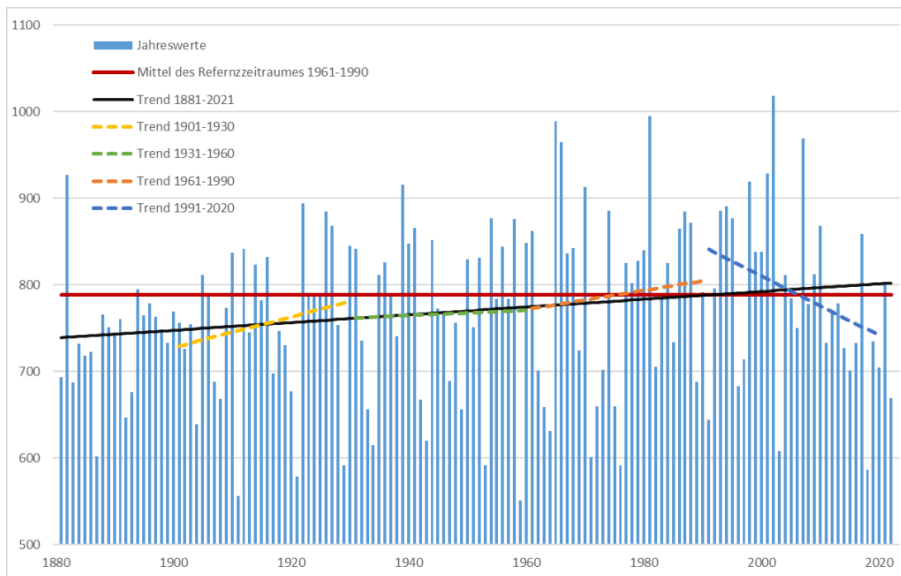
#### 4.1.2 Niederschlag

Der durchschnittliche Jahresniederschlag in Deutschland beträgt rund  $791 \text{ l/m}^2$ <sup>5</sup>. Dabei zeigen sich regional deutliche Unterschiede. Die Alpen sowie der Schwarzwald bilden mit über  $1.600 \text{ l/m}^2$  im Jahr die niederschlagsreichsten Regionen. Im Kontrast dazu stehen weite Teile Sachsen-Anhalts und Brandenburgs mit weniger als  $600 \text{ l/m}^2$ . Allgemein lässt sich sagen, dass die Niederschlagsmenge von Nordwesten nach Südosten mit steigender Kontinentalität abnimmt, aber gleichzeitig in den Mittelgebirgen und den Alpen mit der Höhe zunimmt. Die Sommermonate sind dabei etwas niederschlagsreicher als die Wintermonate.

Jahreswerte der Niederschlagssummen für Deutschland seit 1881 sind in Abb. 7 dargestellt, wobei eine ausgeprägte Jahr-zu-Jahr-Variabilität zu erkennen ist. Die Werte schwanken zwischen  $551 \text{ l/m}^2$  im Jahr 1959 und  $1018 \text{ l/m}^2$  im Jahr 2002. Für den gesamten Zeitraum 1881 bis 2021 ist ein leichter Aufwärtstrend zu erkennen. Betrachtet man den letzten Referenzzeitraum 1991-2020 ist dagegen ein deutlich abnehmender Trend zu beobachten.

<sup>4</sup> [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html)

<sup>5</sup> <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html?nn=480164#buehneTop>



**Abb. 7: Zeitreihe der Jahressummen des Niederschlags für Deutschland (Flächenmittel aus Stationsmessungen) von 1881–2022 mit linearen Trends über unterschiedliche Zeitspannen (Datenbasis: Climate Data Center DWD)**

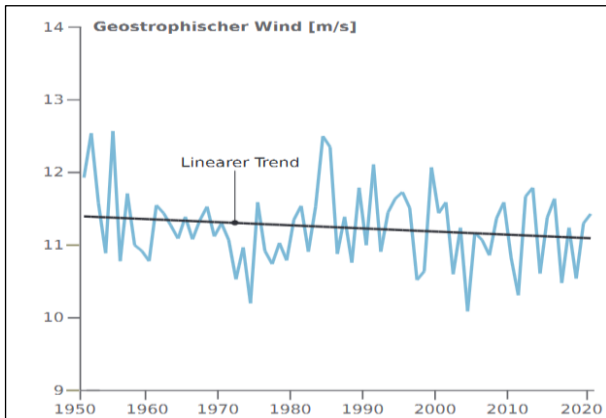
Die zukünftige Entwicklung der Niederschlagsverhältnisse in Deutschland ist unsicher. Im kurzfristigen Planungshorizont (2031-2060) ist nicht mit einer maßgebenden Zunahme des mittleren Jahresniederschlags zu rechnen, der Unterschied zwischen den Szenarien ist gering. Im langfristigen Planungshorizont zeigt sich eine große Bandbreite an möglichen Veränderungen, insbesondere für das Weiter-wie-bisher Szenario (RCP 8.5). Sowohl eine Abnahme von 15% als auch eine Zunahme von 19% ist möglich. Dabei zeigt sich tendenziell eine Zunahme in den Wintermonaten und eine Abnahme in den Sommermonaten (DWD, 2022).

#### 4.1.3 Wind

Die Windverhältnisse an einem Ort werden im Wesentlichen von der allgemeinen Luftdruckverteilung bestimmt. Je nach Großwetterlage können Winde aus allen Himmelsrichtungen wehen. Die in Deutschland vorherrschende Windrichtung ist West. Das Geländere relief sowie Vegetation, Bebauung und Untergrund haben allerdings einen erheblichen Einfluss auf Windrichtung und Windgeschwindigkeit. So können sich bei Wetterlagen mit nur geringen horizontalen Luftdruckunterschieden lokale Windsysteme ausbilden wie der Land-See-Wind oder der Berg-Tal-Wind. In engen Tälern und Schluchten erhöhen Tunnel-Effekte die Windgeschwindigkeit.

Die größte Herausforderung der Windmessung ist die Empfindlichkeit der Messstation gegenüber Änderungen in der Umgebung. Um den Einfluss des Untergrundes möglichst gering zu halten, wird der Wind im Gegensatz zu den anderen meteorologischen Größen in 10 m über Grund gemessen. Lange homogene Messreihen vom Wind stehen dennoch kaum zur Verfügung, und eine statistische Auswertung der Windgeschwindigkeit über die letzten 100 Jahre ist schwierig. Eine Möglichkeit, Aussagen über die Entwicklung der mittleren Windgeschwindigkeit über die letzten Jahrzehnte abzuleiten, ist die Betrachtung des geostrophischen Windes. Dieser wird aus den Luftdruckdifferenzen berechnet und ist eng mit dem 'wahren Wind' gekoppelt. In Abb. 8 ist der geostrophische Wind, berechnet aus den bodennahen Luftdruckdaten der Stationen Hamburg, Emden und List auf Sylt dargestellt. Erkennbar ist ein leichter Abwärtstrend, allerdings sind die jährlichen Schwankungen deutlich größer als der Trend.





**Abb. 8: Jahresmittel des geostrophischen Windes der Stationen Hamburg, Emden und List auf Sylt sowie linearer Trend über den Zeitraum 1950 bis 2020 (DWD, 2022)**

Die zeitlich und räumlich hochvariable Größe Wind ist generell schwer zu simulieren. Besonders die Böenparametrisierung stellt eine Herausforderung dar. Aktuell können keine Trendaussagen aus Modellrechnungen im Rahmen des Klimawandels abgeleitet werden, da die Ergebnisse stark von Modell zu Modell variieren (DWD, 2022).

## 4.2 Küstengewässer

### 4.2.1 Meeresoberflächentemperatur

Für die Ostsee wird bis zum Ende dieses Jahrhunderts, verglichen mit dem Referenzzeitraum 1976-2005, ein Temperaturanstieg von 1,1°C (RCP2.6) bis zu 3.2°C (RCP8.5) im Jahresmittel berechnet (HELCOM/Baltic Earth, 2021). Die für die Nordsee ermittelten Werte unterscheiden sich davon nur unwesentlich. Mit den Veränderungen der mittleren Temperaturen gehen starke Änderungen der Extremwerte einher. So zeigt sich in Klimaprojektionen für die Ostsee u.a. eine starke Zunahme mariner Hitzewellen bis zum Ende des Jahrhunderts und dies sowohl in Häufigkeit als auch in Intensität und Dauer.

### 4.2.2 Mittlerer Meeresspiegel und Sturmflutwasserstände

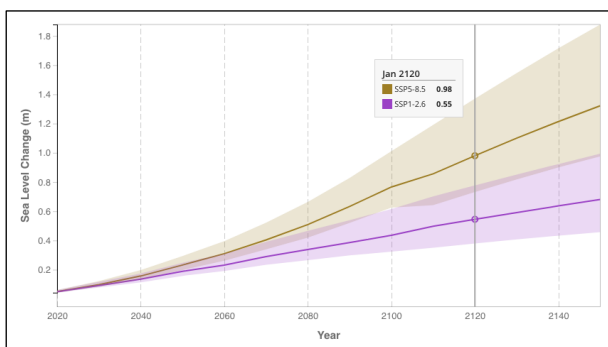
Eine Vielzahl von Prozessen bestimmen die Höhenänderungen des Meeresspiegels und des Meeresbodens, was unterschiedliche räumliche Muster der Meeresspiegelveränderung auf lokaler bis regionaler Ebene zur Folge hat. Sich ändernde Oberflächenwinde, die Ausdehnung des sich erwärmenden Ozeanwassers und zusätzliche Wassermassen von schmelzenden Landeismassen können die Meeresströmungen verändern, was wiederum zu von Ort zu Ort unterschiedlichen Veränderungen des Meeresspiegels führt. Vergangene und gegenwärtige Schwankungen in der Verteilung des Landeises wirken sich auf die Form und das Schwerfeld der Erde aus, die ebenfalls regionale Schwankungen des Meeresspiegels verursachen. Weitere Schwankungen des Meeresspiegels werden durch den Einfluss lokaler Prozesse wie Sedimentverdichtung und Tektonik verursacht. Die Kombination dieser Prozesse ergibt ein komplexes Muster der Gesamtveränderung des Meeresspiegels, das sich im Laufe der Zeit ändert, wenn sich der relative Beitrag der einzelnen Prozesse ändert. Die globale durchschnittliche Veränderung ist ein nützlicher Einzelwert, der den Beitrag klimatischer Prozesse wie Landeisschmelze und Ozeanerwärmung widerspiegelt und eine gute Schätzung der Meeresspiegelveränderung an vielen Küstenstandorten darstellt. Gleichzeitig können jedoch dort, wo die

verschiedenen regionalen Prozesse zu einem starken Signal führen, große Abweichungen vom globalen Durchschnittswert auftreten.

Die beobachteten Anstiege des mittleren Meeresspiegels im globalen Mittel liegen bei 1,4 mm/Jahr im Zeitraum 1901-1990 und bei 3,6 mm/Jahr im Zeitraum 2006-2015 (IPCC, 2019). In der Deutschen Bucht liegen die Anstiege im Zeitraum 1901-2008 bei 1,7 mm/Jahr (Wahl et al., 2011) und in der deutschen Ostsee bei 1,0 mm/Jahr für das 20. Jahrhundert (Weiße & Meinke, 2017) sowie in der südwestlichen Ostsee im Zeitraum 1900 bis 2015 bei 1,2 mm/a (Kelln, 2019). Für die deutschen Küsten ergeben sich somit aufgrund der lokal wirkenden Effekte geringfügige regionale und lokale Trendunterschiede, dennoch liegen die Trends im Bereich der Trendschätzer für den globalen mittleren Meeresspiegel (Kelln, 2019).

Der prognostizierte Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels unter Ansatz zweier SSP-Szenarien ist in Abb. 9 dargestellt. Hiernach ist bis 2120 unter Ansatz des Szenarios SSP5-8.5 ein Meeresspiegelanstieg von 0,99 m im Median prognostiziert.

Aufgrund der durch den Meeresspiegelanstieg erhöhten Wasserstände in Nord- und Ostsee fallen ebenfalls entlang der deutschen Küsten und in den Ästuaren die durch die Gezeiten beeinflussten Tidehoch- und Niedrigwasserstände unter mittleren Bedingungen sowie während einer Sturmflut höher aus. Im Mündungsbereich der Ästuarie wird der höchste Wasserstand während einer Sturmflut durch die Bedingungen in der Nordsee bestimmt, d.h. durch die astronomische Tide, den Windstau und den Meeresspiegelanstieg. In den mittleren und landwärtigen Abschnitten des Ästuars wird der höchste Wasserstand während der Sturmflut sowohl durch die Bedingungen in der Nordsee als auch durch den Abfluss aus dem Binnenbereich bestimmt. Eine Zunahme des lokalen Windes über dem Ästuar beeinflusst die höchsten Wasserstände während der Sturmflut im gesamten Ästuar (Rudolph, 2014).



**Abb. 9: Prognostizierter Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels unter Ansatz der SSP-Szenarien SSP1-2.6 und SSP5-8.5 <sup>6</sup>**

Bei identischen meteorologischen Bedingungen erhöht sich durch einen Anstieg des Meeresspiegels der höchste Wasserstand während einer Sturmflut in etwa dem gleichen Maße wie der Meeresspiegelanstieg und der Scheitelpunkt des Hochwassers tritt einige Minuten früher ein. Hohe Wasserstände, an der deutschen Nordseeküste z. B. Wasserstände über NHN +3,00 m, dauern aufgrund eines maßgebenden Meeresspiegelanstiegs zudem bis zu mehrere Stunden länger an.

<sup>6</sup> <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?type=global>

Da nach aktuellem Kenntnisstand keine klimawandelbedingte Zunahme der Windgeschwindigkeiten bei Sturmfluten anzunehmen ist, ist davon auszugehen, dass Sturmfluten bei einem Bezug auf den Mittelwasserstand an den Küsten der Nord- und Ostsee zwar nicht häufiger auftreten werden, sie aber durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels auf einem anderen Höhenniveau stattfinden werden. Sturmfluten werden verglichen mit heute somit zukünftig höher auflaufen und die Dauer hoher Wasserstände wird sich verlängern.

## **5. Verwundbarkeit deutscher Häfen und Anpassung an den Klimawandel**

Auf Basis der Identifikation relevanter Klimaparameter und -prozesse und deren Änderungen soll im Rahmen der Erarbeitung der Empfehlungen die klimawandelbezogene Verwundbarkeit deutscher Häfen abgeleitet werden, um anschließend mögliche Anpassungsoptionen aufzuzeigen. Die folgenden Bereiche sollen berücksichtigt werden:

- **Hafeninfrastruktur:** Hafenzufahrt und Reede, Hafeneinfahrt (Anlagen, Navigation), hafeninterne Zufahrtskanäle/ Wendekreise/ Hafenbecken (Anlagen, Navigation), Kaianlagen/ Piers, Dalbenliegeplätze, Ponton- und Steganlagen, hafeninterner Hochwasserschutz, hafeninterne Verkehrsflächen, Hinterlandanbindungen, Elektrotechnik und Informationstechnologie sowie regenerative Energien
- **Hafensuprastruktur:** Oberflächen/ Beläge, Entwässerungssysteme, Lager, Umschlaggeräte, Büro- und Servicegebäude sowie produzierendes Gewerbe
- **Hafenbetrieb:** Hafenumschlag, Verkehr- und Fahrgastsicherheit, Steuerung des Zu- und Ablaufs von Gütern, Gefahrenabwehr sowie Sedimentmanagement

Die dargestellte Auflistung deckt den Großteil der für Funktionalität und Betrieb von Häfen erforderlichen Bereiche ab, stellt aber gleichzeitig umfangreiche Anforderungen an die Ausarbeitung der Empfehlungen.

## **6. Fazit**

Die 2022 gegründete HTG Arbeitsgruppe KlimaHafen hat das Ziel, Empfehlungen zum Thema Verwundbarkeit und Anpassung von deutschen Häfen im Rahmen des Klimawandels zu erarbeiten. Die interdisziplinäre Arbeitsgruppe aus Klimawissenschaftler/innen und Akteur/innen der Hafenwirtschaft bietet die Chance, die Expertise über die zu erwartenden Klimaänderungen und die daraus resultierende Verwundbarkeit deutscher Häfen zu verknüpfen, um anschließend Anpassungsoptionen an den Klimawandel aufzuzeigen. Mit dem abgesteckten Betrachtungsrahmen von Klimaänderungen, Folgen und Anpassungsoptionen für Hafeninfra- und Suprastruktur sowie Hafenbetrieb und darüber hinaus der Entwicklung einer hafengerechten Anpassungsstrategie und Fallstudien zur Klimawandelanpassung hat sich die Arbeitsgruppe ein ambitioniertes Ziel gesetzt, dessen Erreichen von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe ambitioniert verfolgt wird und das planmäßig im 1. Quartal 2025 erreicht sein soll.

## 7. Literaturverzeichnis

- DWD (2022): Nationaler Klimareport. 6. überarbeitete Auflage. Deutscher Wetterdienst
- HELCOM/Baltic Earth (2021): Climate Change in the Baltic Sea. 2021 Fact Sheet. Baltic Sea Environment Proceedings n°180
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergov. Panel on Climate Change. Cambridge University Press
- IPCC (2018): Annex I: Glossary. 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. Cambridge University Press
- IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate – Summary for Policymakers. Cambridge University Press
- IPCC (2021): Climate Change 2021 - The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergov. Panel on Climate Change. Cambridge University Press
- Kelln, J. (2019): Untersuchungen zu Änderungen und Einflussgrößen des mittleren Meeresspiegels in der südwestlichen Ostsee. Mitteilungen des Forschungsinstituts Wasser und Umwelt der Universität Siegen. Dissertation. <http://dx.doi.org/10.25819/ubsi/442>
- Rudolph, E. (2014): Storm Surges in the Elbe, Jade-Weser and Ems Estuaries. Die Küste, 81.
- Weiß und Meinke (2017): Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: Brasseur, Jacob und Schuck-Zöller: Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum
- Wahl et al. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. In: Ocean Dynamics 61