

Klimawandelanpassung von Seehäfen

Skript zum Vorhaben PortKLIMA



Containerterminal Hafen Bremerhaven

Bremen, 28. Oktober 2021

Hochschule Bremen

Prof. Dr.-Ing Bärbel Koppe (seit 09/2020 Hochschule Wismar)

Dipl. – Ing. Lena Lankenau

Neustadtswall 30, 28199 Bremen

baerbel.koppe@hs-wismar.de

Inhalt

1	Einführung.....	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2	Beteiligte Seehäfen	2
1.2.1	Nordseehäfen	3
1.2.2	Bremen/ Bremerhaven	4
1.2.3	Cuxhaven.....	5
1.2.4	Hamburg	6
1.3	Ostseehäfen.....	7
1.3.1	Lübeck	7
1.3.2	Rostock.....	8
1.3.3	Wismar.....	8
2	Grundlagen des Klimawandels	10
2.1	Begriff: Klima.....	10
2.2	Treibhauseffekt	10
2.3	Klimasystem.....	12
2.4	Klimamodelle.....	13
2.5	Klimaszenarien.....	15
2.6	Modellkette.....	18
2.7	Änderungssignal	20
2.8	Änderung von Bemessungsparametern	22
2.9	Klimaskepsis - 'Climategate'	23
2.10	Auswirkungen des Klimawandels	24
2.11	Seehäfen und Klimaschutz.....	26
3	Anpassung von Seehäfen an den Klimawandel.....	33
3.1	PIANC-Leitfaden: 'Anpassung an den Klimawandel – Planung für Häfen und Wasserstraßen'	33
3.1.1	Stufe 1: Problemstellung und Zielsetzung	34
3.1.2	Stufe 2: Klimainformationen	38
3.1.3	Stufe 3: Verwundbarkeiten und Risiken.....	40
3.1.4	Stufe 4: Anpassungsoptionen.....	46

4	Anpassung von deutschen Seehäfen an den Klimawandel	53
4.1	Bestehende sowie zukünftige Gefährdung und Chancen für Seehäfen in Deutschland infolge des Klimawandels	53
4.2	Relevante Zeithorizonte und deren Bedeutung für Anpassungsmaßnahmen	57
4.3	Regionale Auswirkungen des Klimawandels	59
4.3.1	Mittlerer Meeresspiegel	59
4.3.2	Windverhältnisse	65
4.3.3	Wellen und Seegang	67
4.3.4	Windstau	81
4.3.5	Astronomische Tide	85
4.3.6	Lufttemperatur	88
4.3.7	Niederschlag	89
4.3.8	Hoch- und Niedrigwasser	91
4.3.9	Wassertemperatur und -chemie	91
4.4	Verwundbarkeit und Anpassung von Anlagen und hafenbezogenen Tätigkeiten	92
4.4.1	Bedeutung des Klimawandels für die Anpassung von Regelwerken	92
4.4.2	Wasserstand und Seegang	94
4.4.3	Lufttemperatur	116
4.4.4	Windeinwirkungen	119
4.4.5	Starkniederschlag	129
4.4.6	Eislasten auf wasserbauliche Anlagen	134
4.4.7	Luft- und Wasserchemie	135
4.4.8	Bewertung der Vulnerabilität von Anlagen und hafenbezogenen Tätigkeiten	137
4.4.9	Empfehlungen zur Anpassung von deutschen Seehäfen an den Klimawandel...	140
5	Literaturverzeichnis	146

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der im Projekt PortKLIMA beteiligten Seehäfen	2
Abbildung 2: Klimadiagramm Hamburg	10
Abbildung 3: (a) Natürlicher und (b) anthropogener (durch den Menschen verursachter) Treibhauseffekt	11
Abbildung 4: Verlauf von globaler Temperatur, CO ₂ -Konzentration und Sonnenaktivität seit 1880(nach Herd 2020).....	12
Abbildung 5: Das Klimasystem und die Wechselwirkungen seiner Komponenten (nach Worldoceanreview 2020).....	13
Abbildung 6: Die Abbildung skizziert Aufbau und Funktionsweise eines Klimamodells (nach Spektrum 2020).....	13
Abbildung 7: Beobachtete und mit Klimamodellen simulierte globale Erwärmung im 20. Jahrhundert mit und ohne anthropogene Antriebskräfte (nach IPCC 2013/ 2014)	15
Abbildung 8: Einfluss verschiedener Unsicherheitsquellen bei Klimaprojektionen (nach IPCC 2013).....	15
Abbildung 9: Anthropogener Strahlungsantrieb der RCP- und SRES-Szenarien (nach IPCC 2013).....	17
Abbildung 10: Modellkette vom globalen Klimamodell zum Wirkmodell (nach Linke 2017)...	19
Abbildung 11: Bandbreite möglicher zukünftiger Änderungen infolge der vorhandenen Unsicherheiten innerhalb der Modellkette (nach LfU Bayern 2020)	20
Abbildung 12: Änderungssignal einer klimatischen Größe. Links: Robuste Änderung, rechts: Keine robuste Änderung (nach LfU Bayern 2020).	21
Abbildung 13: Änderungssignal einer klimatischen Größe. Links: Differenz aus zwei Zeitscheiben, rechts: Linearer Trend (nach LfU Bayern 2020).....	22
Abbildung 14: Links: Je nach Beobachtungszeitraum finden sich verschiedene Trends innerhalb der Zeitreihe. Rechts: Die Zeitreihe weist eine dekadische Variabilität auf (nach Jacob 2014).	22
Abbildung 15: Die 4 Stufen des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	33
Abbildung 16: Stufe 1 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	34
Abbildung 17: Stufe 2 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	38

Abbildung 18: Stufe 3 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	41
Abbildung 19: Abfolge einer Verwundbarkeitsanalyse (PIANC 2020, eigene Übersetzung)..	42
Abbildung 20: Bewertungsschema - Änderung der Gefährdung (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	43
Abbildung 21: Stufe 4 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	47
Abbildung 22: Klimaparameter und Auswirkungen auf Seehäfen. Die bisher beobachteten Auswirkungen auf deutsche Seehäfen sind durch die Kästen hervorgehoben (Abbildung nach PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	53
Abbildung 23: Beeinflussung des Meeresspiegels durch klimatische und nicht-klimatische Prozesse (IPCC 2019).....	61
Abbildung 24: Beobachtete und mit Modellen berechnete Änderung des mittleren Meeresspiegels am Pegel Cuxhaven (nach IPCC 2019).	62
Abbildung 25: Änderung des Wiederkehrintervalls extremer Wasserstände durch den Meeresspiegelanstieg. Links: Generell, rechts: Pegel Cuxhaven, 2081-2100 im Vergleich zu 1986-2005 (IPCC 2019).	64
Abbildung 26: Bezeichnung, anregende Kraft und relative Amplitude von Meereswellen, klassifiziert nach Munk (Kraaiennest, Wikipedia Wasserwellen)	67
Abbildung 27: Definition von Wellenhöhe, Wellenlänge, Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und Wellenperiode bzw. Frequenz	68
Abbildung 28: Grafische Ermittlung der signifikanten Wellenhöhe (H_s) und der Peakperiode (T_p) nach dem SPM für eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s und Fetchlängen von 50 km und 500 km.	70
Abbildung 29: Prozentuale Änderung der signifikanten Wellenhöhe im Tiefwasser aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeit (U) von 5% bzw. 10% für unterschiedliche Fetchlängen (x) von 50, 300 bzw. 500 km.....	71
Abbildung 30: Prozentuale Änderung der signifikanten Wellenhöhe im Übergangsbereich aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeit (U) von 5% bzw. 10% für unterschiedliche Wassertiefen (d) und Fetchlängen (x) von 50, 300 bzw. 500 km.	74
Abbildung 31: Berechnete signifikante Wellenhöhen im betrachteten Windfeld mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten und maximalen Meeresspiegelanstiegen.....	76
Abbildung 32: Verlauf der signifikante Wellenhöhe beim Einlaufen des Seegangs an die Küste mit abnehmender Wassertiefe zzgl. den jeweiligen Meeresspiegelanstieg	78

Abbildung 33: Relative Änderung der signifikanten Wellenhöhe im Wismarer Hafen infolge eines Meeresspiegelanstiegs (oben) bzw. eines Meeresspiegelanstiegs und der Zunahme der Windgeschwindigkeit (unten).....	81
Abbildung 34: Windstau für verschiedenen mittlere Wassertiefen und Windgeschwindigkeiten (Fetch: 100 km).	83
Abbildung 35: In die deutsche Bucht einlaufende Tidewellen sowie die entstehenden amphidromischen Punkte (Amphidromisches System der Nordsee, Wikipedia).	86
Abbildung 36: Erforderliches Steingewichte nach Hudson in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk für den IST-Zustand und den maximalen Meeresspiegelanstiegen.....	95
Abbildung 37: Erforderliches Steingewicht nach Van der Meer in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk für den IST-Zustand und den maximalen Meeresspiegelanstiegen.....	96
Abbildung 38: Erforderliches Steingewicht nach Van der Meer in Abhängigkeit von den berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk für das Klimaszenario RCP8.5 max und einer Anzahl der einwirkenden Wellen.....	97
Abbildung 39: Erforderliches Steingewicht nach Hudson und nach Van der Meer in Abhängigkeit von der berechneten signifikanten Wellenhöhe am Bauwerk mit einem maximalen Meeresspiegelanstieg	98
Abbildung 40: Wellenauflauf am Wellenbrecher nach EurOtop (2018) im IST-Zustand in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk.....	100
Abbildung 41: Wellenauflauf am Molenbauwerk nach EurOtop (2018) mit maximalen Meeresspiegelanstieg des RCP8.5-Szenarios (1,10 m) in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk.....	101
Abbildung 42: Vergleich der Wellenüberlaufzeiten vom IST-Zustand gegenüber den Klimaszenarien Die rote Linie zeigt den Beginn von Erosionen auf der Binnenböschung bei 10 l/s/m	102
Abbildung 43: Vergleich der Wellenüberlaufzeiten vom IST-Zustand gegenüber den Klimaszenarien. Die rote Linie zeigt die kritische Wellenüberlaufzeit von 100 l/s/m	103
Abbildung 44: Hochwassergefahrenkarte einer Hafenfläche inklusive eines Anstiegs des Meeresspiegels (Baumgärtner 2020).....	104
Abbildung 45: Links: Exemplarische Bewertung der Auswirkungen einer Klimagefahr (in der Abbildung als Verwundbarkeit bezeichnet) für ein Hafengelände..	104

Abbildung 46: Berechnungsschema des Designwertansatzes der Wellenüberlaufrate einer vertikalen/ zusammengesetzten vertikalen Wand nach EurOtop (2018)106

Abbildung 47: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand für ein 20-, 50- und 100- jährliches Tidehochwasser im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 1$ l/s/m108

Abbildung 48: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien mit einer statistischen Wiederkehr von 20 Jahren im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 1$ l/s/m.....109

Abbildung 49: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien mit einer statistischen Widerkehr von 20 Jahren im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 1$ l/s/m und $q_{zul} = 20$ l/s/m.....109

Abbildung 50: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien mit einer statistischen Wiederkehr von 100 Jahren im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 20$ l/s/m110

Abbildung 51: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien mit einer statistischen Wiederkehr von 20 Jahren im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 1$ l/s/m, $q_{zul} = 20$ l/s/m und $q_{zul} = 200$ l/s/m.....111

Abbildung 52: Links: Hochwasserschutzwand am Burchardkai in Hamburg (Alexander Hoernigk (2011), Wikipedia); rechts: Wellenkammer der Stromkaje am Containerterminal in Bremerhaven.....112

Abbildung 53: IST-Zustand für die Sensitivitätsuntersuchung bzgl. des Wasserüberdrucks in Richtung der Wasserseite. Links: Nicht-Tidegebiet, rechts: Tidegebiet.....114

Abbildung 54: Änderung der Einwirkung, für eine kombinierte Spundwand unter Annahme eines infolge des Klimawandels zunehmenden Meeresspiegels und einer Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite für ein Nicht-Tidegebiet.....114

Abbildung 55: Änderung der Einwirkung für eine kombinierte Spundwand unter Annahme eines infolge des Klimawandels zunehmenden Meeresspiegels und einer Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite für ein Tidegebiet.....115

Abbildung 56: Windzonenkarte für Deutschland (Störfix 2005)120

Abbildung 57. Änderung von Q_{voll} bei Wahl des nächst größeren Nenndurchmessers.....133

Abbildung 58: GIS-gestützte topographische Starkregenanalyse einer Terminalfläche (Baumgärtner 2020)134

Abbildung 59: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. der aktuellen Berücksichtigung des Themas Klimawandelanpassung in der Unternehmenskultur141

Abbildung 60: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. der zukünftigen Einbindung des Themas Klimawandelanpassung im Unternehmen bzw. Aufgabenbereich	141
Abbildung 61: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. des zur Verfügung stehenden Zeithorizonts zur ausreichenden Integration des Themas Klimawandelanpassung in die Unternehmenskultur	142
Abbildung 62: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. der größten Herausforderungen im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel.....	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Recherchierte Klimaschutzmaßnahmen in am Projekt beteiligten Seehäfen sowie weitere Maßnahmen in Seehäfen weltweit (w)	30
Tabelle 2: Wirtschaftliche Lebensdauer von Umschlagsgeräten.....	31
Tabelle 3: Beispielhaftes Bewertungsschema von Anlage etc. (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	36
Tabelle 4: Relevante Klimaparameter und -prozesse für Port Botany und Port Kembla, Australien (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	38
Tabelle 5: Überblick über die Methoden der Datenanalyse (PIANC 2020, eigene Übersetzung)	40
Tabelle 6: Exemplarisches Ergebnis einer Verwundbarkeitsanalyse (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	44
Tabelle 7: Risikomatrix (PIANC 2020, eigene Übersetzung).....	46
Tabelle 8: Allgemeine Anpassungsmaßnahmen, um die Widerstandsfähigkeit von Anlagen etc. zu stärken (PIANC 2020, verändert, eigene Übersetzung).....	48
Tabelle 9: Bewertungskriterien für die Auswahl von Anpassungsmaßnahmen (PIANC 2020, eigene Übersetzung)	49
Tabelle 10: Beispiel eines Anpassungspfades (PIANC 2020, verändert, eigene Übersetzung)	51
Tabelle 11: Entwicklung der nach Empfehlungen des Arbeitsausschusses Uferneufassungen (EAU) anzusetzenden charakteristischen Pollerzuglasten in Abhängigkeit der Wasserverdrängung eines Schiffs (Turban 2019).....	55
Tabelle 12: Durchschnittliche wirtschaftliche Lebensdauer von Anlagen in Seehäfen.	58

Tabelle 13: Entscheidungsmatrix zur Bewertung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen (Norpoth et al. 2020)	59
Tabelle 14: Mögliche Änderung des mittlerer globalen sowie des regionalen Meeresspiegels relativ zum Zeitraum 1986-2005 auf Basis des IPCC-SROCC (IPCC 2019).	63
Tabelle 15: Mögliche Änderung von Wind und Wind bezogenen Kenntagen für Nord- und Ostsee relativ zum Zeitraum 1961-1990 (Daten: Helmholtz-Zentrum Hereon 2021a).	66
Tabelle 16: Einteilung von Tiefwasser-, Übergangs- und Flachwasserbereich	68
Tabelle 17: Sensitivitätsstudie zum potentiellen Einfluss klimatischer Änderungen auf Wellenparameter	73
Tabelle 18: Überblick der betrachteten projizierten Meeresspiegelanstiege der Klimaszenarie	75
Tabelle 19: Einflussgrößen bzw. Kombination von Einflussgrößen und deren Wirkung auf die Höhe von Sturmflutwasserständen entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems (Seiffert et al. 2014)	85
Tabelle 20: Mögliche Änderung von Temperatur und Temperatur bezogenen Kenntagen für Nord- und Ostsee relativ zum Zeitraum 1961-1990.	88
Tabelle 21: Mögliche Änderung von Niederschlag und Niederschlag bezogenen Kenntagen für Nord- und Ostsee relativ zum Zeitraum 1961-1990	89
Tabelle 22: Ermittelte Tidehochwasserstände nach den betrachteten Szenarien und Wiederkehrintervallen am Pegel Bremerhaven.....	107
Tabelle 23: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Tidegebiet und die Änderung des erforderlichen Widerstandsmoments W_{erf} bei sich im Rahmen des Klimawandels ändernden Bemessungsparametern.	115
Tabelle 24: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Tidegebiet und die Änderung der optimalen Ankerlänge bzw. Ankerkraft bei sich im Rahmen des Klimawandels ändernden Bemessungsparametern.	116
Tabelle 25: Einfluss der Zunahme der Basiswindgeschwindigkeit um +5% bzw. +10% auf den Böengeschwindigkeitsdruck nach DIN EN 1991.	122
Tabelle 26: Vergleich unterschiedlicher Bemessungsansätze nach DIN EN 1991-1-4 und DIN 1055-4:1986-08 für den Böengeschwindigkeitsdruck	122
Tabelle 27: Windlastkomponenten W (t: tangential, l: longitudinal) pro m^2 auf ein vertäutes Schiff in Abhängigkeit der Windrichtung ($\alpha = 90^\circ, 80^\circ, 30^\circ, 0^\circ$) sowie bei einer Änderung der maßgebenden Windgeschwindigkeit (v_b) nach Eurocode	124

Tabelle 28: Tangentiale Windlastkomponenten W_t für Bug (W_{tb}) bzw. Heck (W_{th}) für die Windrichtung $\alpha = 90^\circ$ und eine Windangriffsfläche von $A = 20.000 \text{ m}^2$ bei einer Änderung der maßgebenden Windgeschwindigkeit nach Eurocode.	125
Tabelle 29: Gegenüberstellung von Windgeschwindigkeiten für unterschiedliche Zeitspannen, welche der Berechnung von Windlasten auf Schiffe nach EAU 2004, 2012 und 2020 zugrunde gelegt werden sowie Windgeschwindigkeiten, welche von OCIMF und IACS für die Vertäuung von Schiffen zugrunde gelegt werden.....	126
Tabelle 30: Entwicklung der nach EAU anzusetzenden charakteristischen Werte und der Bemessungswerte für die Pollerzuglast in Abhängigkeit der Wasserverdrängung eines Schiffs (Turban 2019)	127
Tabelle 31: Kritische Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit für den Betrieb von Seehäfen (Gaythwaite 2004, verändert, eigene Übersetzung).....	128
Tabelle 32: Starkniederschlagshöhen aus KOSTRA 2010R (DWD 2020) und KOSTRA 1997 (Bartels 1997) für die Dauerstufe 15 Minuten und die Jährlichkeit 5 bzw. 100 Jahre für unterschiedliche Küstenstandorte.....	131
Tabelle 33: Starkniederschlagshöhen nach Reinhold (1940) für die Dauerstufe 15 Minuten und die Jährlichkeit 1, 5 bzw. 100 Jahre sowie unterschiedliche Küstenstandorte bzw. -regionen	131
Tabelle 34: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse bzgl. einer Änderung der Eisdruckfestigkeit bzw. mechanischen Eisdruckkraft infolge einer Abnahme der Salinität und einer Abnahme der Lufttemperatur bzw. Eistemperatur.....	135
Tabelle 35: Exemplarisches Ergebnis einer übergeordneten Verwundbarkeitsanalyse für Seehäfen in Deutschland in Anlehnung an PIANC (2020) für die nahe und ferne Zukunft des Klimaschutz- und Moderaten-Szenarios sowie die nahe Zukunft des Weiter-wie-bisher-Szenarios	138
Tabelle 36: Ergebnis einer übergeordneten Verwundbarkeitsanalyse für Seehäfen in Deutschland in Anlehnung an PIANC (2020) für die ferne Zukunft und das Weiter-wie-bisher-Szenario.....	139
Tabelle 37: Klimaparameter, deren Änderungswahrscheinlichkeit und Empfehlungen zur Anpassung	145

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Weltweit werden etwa 80 Volumenprozent des Fernhandels über den Seeweg getätigt (OECD/ITF 2017). Damit nehmen Seehäfen eine wichtige Rolle als Knotenpunkte im Güterumschlag ein und sind in den jeweiligen Regionen ein wichtiger Motor für Wirtschaft und Beschäftigung. Seit Anfang der 1990er Jahre veröffentlicht der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) etwa alle 5 bis 8 Jahre Sachstandsberichte, in denen er auf die Beeinflussung des Klimasystems durch den Menschen aufgrund des seit der Industrialisierung im 18. Jahrhundert erfolgenden Ausstoßes der anthropogenen Treibhausgase (THG) und den daraus zu erwartenden Folgen aufmerksam macht. Durch ihre Lage an der Küste sind die Seehäfen in besonderer Weise vom bevorstehenden Meeresspiegelanstieg aufgrund des Klimawandels betroffen. Ihre Funktionalität ist auch durch weitere Folgen des Klimawandels, wie z.B. die Zunahme von Extremwetterereignissen, bedroht.

Damit Seehäfen auch zukünftig den wirtschaftlichen wie den umweltbedingten Anforderungen gerüstet sind, ist ihre Verwundbarkeit gegenüber dem Klimawandel frühzeitig zu analysieren sowie Maßnahmen zur Erhöhung ihrer Resilienz in Hafenmanagement und Hafenplanung sind zu berücksichtigen. Da hier wirtschaftliche und zeitliche Aspekte eine Rolle spielen, ist es wichtig, die Gefahren und Risiken durch die Folgen des Klimawandels zu kennen, um Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren.

Das Projekt PortKLIMA 'Entwicklung und pilothafte Umsetzung von Bildungsmodulen zur Einbindung der Anpassung an den Klimawandel in Planung, Bau und Betrieb von Seehäfen in Deutschland' (Projektlaufzeit 2018-2021) wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert und von der bremenports GmbH & Co. KG finanziell unterstützt. Ziel des Projekts PortKLIMA ist es, mögliche zukünftige klimawandelbezogene Gefährdungen von Seehäfen in Deutschland zu identifizieren sowie Maßnahmen und Strategien unter Berücksichtigung der Bandbreite zukünftiger Unsicherheiten zur Anpassung der Seehäfen an die Folgen des Klimawandels aufzuzeigen. Die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse werden in Form von Informationsmaterialien für die berufliche Fort- und Weiterbildung sowie die studentische Lehre festgehalten, um so deren Implementierung in die planerische Praxis zu sichern. Das

vorliegende Skript fasst die Ergebnisse des Projekts für die studentische Lehre zusammen. Für Informationen zu den Grundlagen des Hafenbaus wird auf Lehrbücher bzw. grundlegende Literatur zum Thema, wie beispielsweise Thoresen (2018), Gaythwaite (2016), Arbeitsausschuss Ufereinfassungen (2020) und Brinkmann (2005) verwiesen.

1.2 Beteiligte Seehäfen

Die konkrete Zusammenarbeit mit deutschen Seehäfen ermöglichte die direkte Einbindung von Kenntnissen und Erfahrungen der Praxispartner. Ideelle Kooperationspartner im Projekt PortKLIMA sind die Hafenmanagement-Gesellschaften der folgenden sieben Seehäfen an der deutschen Nord- und Ostseeküste: Brake, Bremerhaven, Cuxhaven, Hamburg, Lübeck, Rostock und Wismar. Die Lage der Häfen ist in Abbildung 1 dargestellt. Die beteiligten Häfen unterscheiden sich vor allem in Größe bzw. Umschlagsvolumen, Art der Umschlagsgüter und den naturräumlichen Bedingungen. Die Häfen werden somit auch von Schiffen unterschiedlicher Art und Abmessungen angelaufen. Die Hafenmanagement-Gesellschaften verantworten in der Regel die Hafeninfrastruktur, d.h. Kaimauern, Wasserflächen im Hafengebiet sowie Landflächen und Schienen bzw. Straßen. Die Verantwortung für die Hafensuprastruktur, z.B. Kräne, Flächenbefestigung und –entwässerung, Fahrzeuge bzw. Fördergeräte sowie Hallen und Lagerflächen, verantworten hingegen in der Regel die Betreiber des jeweiligen Terminals.



Abbildung 1: Lage der im Projekt PortKLIMA beteiligten Seehäfen

Die Seewege der Nordsee sind von besonderer Relevanz für den Überseeverkehr, wohingegen die Seewege der Ostsee stark durch den Verkehr der Ostseeanrainer geprägt

sind. Aufgrund der unterschiedlichen Bedeutung der Seewege in Nord- bzw. Ostsee finden sich zwischen den Häfen an Nord- bzw. Ostsee einige Unterschiede hinsichtlich der Umschlagsgüter. So spielt beispielsweise der Containerumschlag, welcher insbesondere in den beiden größten deutschen Universalhäfen Hamburg und Bremen/ Bremerhaven eine große Rolle einnimmt, an der deutschen Ostseeküste eine eher untergeordnete Rolle. Brake und Cuxhaven, welche zu den kleineren Häfen an der Nordseeküste zählen, sind hingegen stärker auf bestimmte Güter spezialisiert bzw. vom regionalen Hinterland beeinflusst. Für die Häfen an der deutschen Ostseeküste spielt zudem der Fähr- und Roll-on/ Roll-off-Verkehr (RoRo-Verkehr) eine wichtige Rolle.

Durch ihre unterschiedliche Lage an der deutschen Nord- und Ostseeküste sind die Häfen zudem unterschiedlichen Wind- und Windstauinflüssen ausgesetzt. Die Häfen an der Ostsee sind außerdem nicht in maßgeblicher Weise von den Gezeiten beeinflusst.

1.2.1 Nordseehäfen

1.2.1.1 Brake

Brake liegt etwa 26 km flussaufwärts der Mündung der Weser in die Nordsee. Eigentümerin und verantwortlich für das Hafenmanagement des Seehafens Brake ist die sich im Besitz des Landes Niedersachsen befindliche Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG, die neben dem Seehafen Brake vierzehn weitere Standorte an der deutschen Nordseeküste bzw. den tidebeeinflussten Unterläufen von Weser und Elbe betreibt. Im Gegensatz zu den großen europäischen Universalhäfen handelt es sich beim Seehafen Brake um einen multifunktionalen Spezialhafen. Neben zwei an der Weser gelegenen Stromkajen mit einer Länge von rund 2,5 km und acht Schiffs Liegeplätzen verfügt Brake über einen Binnenhafen. Die Wassertiefen an den Stromkajen erlauben das Abfertigen von Seeschiffen, im Binnenhafen können hingegen lediglich Küstenmotor- und Binnenschiffe abgefertigt werden. Die nördliche Stromkaje, der Niedersachsenkai, ist für Schwerlast geeignet. Dort stehen zwei Liegeplätze für Großschiffe zur Verfügung. Umschlagsgüter sind neben Futtermittel und Getreide Forstprodukte (Zellulose, Holz), Eisen, Stahl, greiferfähige Massengüter, Schwefel, pflanzliche Öle und Projektladungen. Beim Agrarumschlag und der Einfuhr von Zellulose zählt der Seehafen Brake zu den führenden europäischen Seehäfen. Der Gesamtumschlag belief sich 2020 auf 6,5 Mio. t wovon 5,5 Mio. t auf den Seeumschlag und 1,0 Mio. t auf den Binnenumschlag entfallen. Der Seehafen kann derzeit von Schiffen mit einem Tiefgang bis 11,9 m angelaufen werden, eine Vertiefung auf 12,8 m ist geplant. Der Hafen verfügt über ein

Gleisnetz von 33 km, eine Hafenfläche (Land und Wasser) von 255 ha sowie eine Erweiterungsfläche von 77 ha, und er hat 2.200 Schiffsanläufe pro Jahr (Stand 2020). Ein Teil des Hafens liegt außerhalb des Landesschutzdeichs und wird durch zusätzliche Hochwasserschutzanlagen vor Überflutung geschützt.¹

Niedersachsen Ports verfolgt mit seiner 'Hafen+' Strategie das Ziel, die direkten Treibhausgas-Emissionen im Vergleich zu 2017 um 25% zu verringern.²

1.2.2 Bremen/ Bremerhaven

Die Hafenmanagement-Gesellschaft bremenports GmbH & Co. KG verwaltet die sich im Besitz der Stadtgemeinde Bremen befindlichen Häfen in Bremen-Stadt und Bremerhaven. Der Hafen Bremen-Stadt ist der südlichste Seehafen Deutschlands und liegt an der Unterweser, der Hafen Bremerhaven hingegen liegt nordseeneah direkt an der Außenweser. Durch ihre ungleiche Lage an der Weser unterscheiden sich die beiden Häfen stark in ihren Umschlagsgütern und Umschlagsvolumen. Der Zwillingshafen Bremen/ Bremerhaven zählt zu einem der wichtigsten Universalhäfen Europas und spielt eine wichtige Rolle im Transshipment, d.h. dem Umladen von Gütern auf Feederschiffe zum Weitertransport. Zu den Umschlagsgütern gehören Container, Autos, Stück- und Massengüter, Gefahrgut sowie Projektladung. Zudem verfügt der Hafen Bremerhaven über ein Kreuzfahrtterminal und wickelt in großem Stil temperaturregulierte Lebensmittel (Kühl- und Tiefkühlware) ab. Bremerhaven ist Europas zweitgrößter Hafen für Automobil³- und siebtgrößter Hafen für Containerumschlag⁴. Der Hafen Bremen-Stadt ist überwiegend auf Massenstückgut sowie Massengut - insbesondere Erz und Kohle - spezialisiert. Im Jahr 2019 standen in den Häfen 14 Liegeplätze für Großcontainerschiffe zur Verfügung, erfolgten 6.650 Schiffsanläufe, davon 2.393 Containerschiffe, 1.390 Stückgutschiffe sowie 1.338 Roll-on/ Roll-off- bzw. Autoschiffe, und es wurden 2.166.382 Automobile, 4.857.000 TEU Container und insgesamt 69,42 Mio. t Güter, davon 12,14 Mio. t in Bremen und 57,29 Mio. t in Bremerhaven sowie 246.995 (Kreuzfahrt-) Passagiere abgefertigt.⁵

¹ https://www.nports.de/media/Haefen/Brake/NPorts_Imagebroschuere_Seehafen_Brake.pdf.

² <https://www.nports.de/nachhaltigkeit/hafen/>.

³ https://bremenports.de/wp-content/uploads/2017/03/2019_Hafenspiegel_.pdf.

⁴ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/255147/umfrage/haefen-in-europa-nach-containerumschlag/>

⁵ https://bremenports.de/wp-content/uploads/2017/03/2019_Hafenspiegel_.pdf.

Insgesamt verwaltet die Hafenmanagement-Gesellschaft bremenports rund 38 km Kajen, davon in Bremerhaven eine rund 5 km lange Stromkaje, 33 km Böschungen, 99 km Straßenanlagen, 192 km Hafeneisenbahn- und Industriestammgleise sowie 16 km Deiche und Hochwasserschutzwände. Die Größe der Fläche mit hafenaffiner Nutzung beträgt 3.120 ha (2.596 ha Landflächen und 524 ha Wasserflächen). Die Anzahl der Seeschiffsliegeplätze beläuft sich auf 92. Die maximal möglichen Schiffstiefgänge sind 10,35 m (ausgehend) bzw. 10,70 m (einkommend) in Bremen und 14,50 m (tideabhängig) in Bremerhaven. Zu den weiteren Hafenanlagen zählen 5 Schleusen, 4 bewegliche Brücken, 9 Hafenpump- und Schöpfwerke, 64 Pontonanlagen sowie 388 Dalben. (Stand 01/ 2021).⁶ Seit 2002 ist bremenports zudem für die Unterhaltung der Hochwasserschutzlinie Bremerhavens zuständig.⁷

Mit der Nachhaltigkeitsstrategie 'greenports' verfolgt die Hafenmanagement-Gesellschaft das Ziel, den maritimen Umweltschutz voranzutreiben.⁸

1.2.3 Cuxhaven

Cuxhaven ist neben Brake ein weiterer Standort der Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG. Der Hafen liegt an der Elbmündung in die Nordsee in unmittelbarer Nähe zum Nord-Ostsee-Kanal. Seine Stärken liegen zum einen in der Abfertigung von RoRo-Schiffen, wobei unterschiedlichste Fahrzeuge sowie Container und Stückgut umgeschlagen werden, und zum anderen in der Belieferung von Offshore-Windparks. Der Gesamtgüterumschlag belief sich 2020 auf 2,3 Mio. t und es erfolgten 1.100 Schiffsanläufe. An der Kaje entlang der Elbe können 240 m lange Seeschiffe bei einer verfügbaren Wassertiefe von bis zu 15,4 m abgefertigt werden. Insgesamt verfügt der Hafen über 10 km Kaianlagen, 17,7 km Gleisnetz, eine Fläche (Land und Wasser) von 376 ha und einer verfügbaren Erweiterungsfläche von 8 ha (Stand 2020). Die Offshore-Basis des Hafens ist für Schwerlast geeignet und verfügt über zwei Liegeplätze für Jack-up-Schiffe. In den tidefreien Hafenbecken des Hafens werden sowohl Fisch als auch Stück- und Massengut umgeschlagen. Außerdem wird die Versorgung der Inseln Helgoland und Neuwerk von Cuxhaven aus sichergestellt.⁹

⁶ https://bremenports.de/wp-content/uploads/2021/05/2020_Hafenspiegel-DE.pdf.

⁷ http://www.dvr-bremen.de/Deichverband/web/download/hochwasser_in_bremen.pdf.

⁸ <https://bremenports.de/greenports/>.

⁹ https://www.nports.de/media/Haefen/Cuxhaven/NPorts_Imagebroschuere_Seehafen_Cuxhaven.pdf.

1.2.4 Hamburg

Betreiber des Hafens der Freien und Hansestadt Hamburg ist die Hamburg Port Authority (HPA), eine Anstalt des Öffentlichen Rechts aus einem Zusammenschluss aller hafenbezogenen Hamburger Behörden.¹⁰ Neben dem Betrieb des Hafens ist die HPA für die wirtschaftliche Entwicklung und Sicherheit im Hafen, die wasser- und landseitige Infrastruktur und das Immobilienmanagement zuständig.¹¹ Der Hamburger Hafen ist der größte deutsche Universalhafen mit einem Gesamtumschlag von 126 Mio. t, wovon rund 8,5 Mio. TEU Container umgeschlagen werden (Stand 02/ 2021). Es können quasi alle Güterarten umgeschlagen und alle Schiffstypen abgefertigt werden.¹²

Darüber hinaus ist der Hamburger Hafen der drittgrößte europäische Seehafen und der zweitgrößte Binnenhafen Deutschlands. Er verfügt über 280 Liegeplätze für Seeschiffe, mehrere Kreuzfahrtterminals, 43 km Kaimauern, rund 300 km Eisenbahnnetz, 142 km Straßennetz, 12 km Strand, etwa 120 Brücken und weist eine Fläche von rund 7.000 ha auf. 2019 erfolgten 1.005 Anläufe von Seeschiffen, welche länger als 330 m und/ oder breiter als 45 m waren.¹³

Zu den Brücken zählen verschiedene Klapp-, Hub- und Rollbrücken. Die HPA ist neben dem Betrieb und der Wartung auch für den Um- bzw. Neubau der Brücken verantwortlich. In den Verantwortlichkeitsbereich der HPA fallen zudem 4 Schleusen und das Sperrwerk an der Estemündung in die Elbe.¹⁴

Nach Abschluss der Elbvertiefung im Jahr 2021 können Schiffe mit einem maximalen Tiefgang von 14,8 m (ausgehend) und 15,9 m (eingehend) bzw. 13,8 m (tideunabhängig) den Hamburger Hafen erreichen.¹⁵ Transshipment spielt auch in Hamburg eine wichtige Rolle für den Weitertransport der Waren, insbesondere in den Ostseeraum über den Nord-Ostsee-Kanal. Insgesamt erfolgten 2019 etwa 8.000 Schiffsanläufe.¹⁶

¹⁰ <https://www.hamburg.de/fb/weitere-auftraggeber/2845402/art-hpa/>.

¹¹ <https://www.hamburg-port-authority.de/de/hpa-360/>.

¹² <https://www.hafen-hamburg.de/de/geschichte>.

¹³ https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/HPA_Geschaeftsbericht_2019_web.pdf.

¹⁴ <https://www.hamburg-port-authority.de/de/strasse/bruecken-und-schleusen>.

¹⁵ <https://www.hafen-hamburg.de/de/special/fahrinnenanpassung/>.

¹⁶ <https://www.hafen-hamburg.de/de/statistiken/schiffsankuenfte/>.

Der Hamburger Hafen liegt größtenteils vor dem öffentlichen Hochwasserschutz. Ab vorhergesagten Sturmflutwasserständen über +4,5 m ü. NHN warnt der Sturmflutwarndienst (WADI) der HPA. Private Betriebe, die vor dem öffentlichen Hochwasserschutz liegen, müssen selbst für den eigenen Hochwasserschutz sorgen. Da im Hafen kein vollumfassender Hochwasserschutz besteht, müssen bei Sturmfluthöhen ab +5,0 m ü. NHN Teile des Hafens gesperrt und geräumt werden.¹⁷

Die HPA setzt mit ihren 'smartPort' - Konzepten 'smartPORT energy', zur Etablierung der Nutzung von Erneuerbaren Energien, Senkung von Emissionen und Steigerung der Energieeffizienz, und 'smartPORT logistics', zur intelligenten Steuerung der Verkehrs- und Warenflüsse, auf ein zukunftsweisendes Management des Hafens.¹⁸

1.3 Ostseehäfen

1.3.1 Lübeck

Die Hafenmanagement-Gesellschaft der öffentlichen Häfen der Hansestadt Lübeck ist die Lübeck Port Authority (LPA), in welcher die städtischen Hafenzuständigkeiten gebündelt sind. Der Lübecker Hafen konkurriert mit dem Seehafen Rostock um die Position des größten deutschen Ostseehafens, der Gesamtumschlag lag 2019 jedoch knapp hinter dem des Rostocker Hafens.¹⁹ Die Schwerpunkte des Hafens liegen in der Abfertigung von RoRo-Schiffen und Fähren²⁰ sowie im Umschlag von Forstprodukten (Papier und Zellulose) aus der schwedischen und finnischen Papierindustrie²¹. Ein weiteres Standbein ist das Abfertigen von Kreuzfahrtschiffen.²² Der Hafen verfügt über mehrere öffentliche und städtische Terminals der LPA sowie weitere Terminals privater Betreiber, welche entlang der Trave von der Mündung der Trave in die Ostsee (Travemünde) bis zur Altstadt Lübecks liegen²³ - die Altstadt Lübecks liegt etwa 17 km im Landesinneren. 2018 erfolgten 4.150 Schiffsanläufe, wurden insgesamt

¹⁷ https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/Broschuere_Sturmflutschutz_Ansicht.pdf.

¹⁸ https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/HPA_Imagefolder_WEB_PDF.pdf.

¹⁹ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239221/umfrage/groesste-haefen-in-deutschland-nach-queterumschlag/>

²⁰ <https://www.lhg.com/index.php?id=4>.

²¹ <https://www.lhg.com/index.php?id=5>.

²² <https://www.lhg.com/index.php?id=156>.

²³ http://lpa.luebeck.de/files/41006_Hansestadt_Luebeck_RZ2_19_21.pdf.

25,1 Mio. t Güter, davon 150.758 TEU Container, umgeschlagen und 0,4 Mio. Passagiere abgefertigt.²⁴

1.3.2 Rostock

Eigentümerin des Rostocker Hafens ist die ROSTOCK PORT GmbH, deren Gesellschafter die Hansestadt Rostock (74,9 %) und das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern (25,1 %) sind.²⁵ Rostock war im Jahr 2018 der größte deutsche Ostseehafen mit einem Gesamtumschlag von 25,6 Mio. t.²⁶ Hauptaugenmerk liegt auf der Abfertigung von RoRo- und Fährschiffen. 2020 fielen von den 7.573 Schiffsanläufen 5.672 auf Fähr- und RoRo-Schiffe.²⁷ Mit einem Passagieraufkommen von 2,5 Mio. im Jahr 2018 war der Rostocker Hafen der größte Passagierhafen Deutschlands und unter den fünfzehn größten Passagierhäfen der Ostsee.²⁸ Neben Fährschiffen spielen Kreuzfahrtschiffe eine wichtige Rolle im Passagieraufkommen, was durch 190 Anläufe von Kreuzfahrtschiffen im Jahr 2017 deutlich wird.²⁹ Rund 3 Mio. t Flüssiggut und 5,9 Mio. t Schüttgut wurden 2019 verzeichnet, so dass diese Güterarten ebenfalls einen erheblichen Anteil am Gesamtumschlag des Hafens ausmachen.³⁰ Der Hafen Rostock liegt geschützt in der lagunenartigen Erweiterung der Unterwarnow, dem Breitling, kurz vor deren Mündung in die Ostsee und verfügt über 11 km Kaje und 47 Liegeplätzen mit einem Tiefgang von 5 m – 13 m.³¹

1.3.3 Wismar

Der Seehafen Wismar liegt an der Südspitze der Wismarbucht. Gesellschafter der Hafeneigentümerin - der Seehafen Wismar GmbH - sind die Hansestadt Wismar (90 %) und das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern (10 %). Das jährliche Umschlagsvolumen beträgt

²⁴ <https://www.ihk-schleswig-holstein.de/blueprint/servlet/resource/blob/1374040/5a66759168ec7c30770fb9d95000536c/fachbroschuere-verkehrsmarkt-ostsee-data.pdf>.

²⁵ <https://www.rostock-port.de/hafen-rostock/rostock-port/das-unternehmen.html>.

²⁶ <https://www.ihk-schleswig-holstein.de/blueprint/servlet/resource/blob/1374040/5a66759168ec7c30770fb9d95000536c/fachbroschuere-verkehrsmarkt-ostsee-data.pdf>.

²⁷ <https://www.rostock-port.de/hafen-rostock/daten-fakten.html>.

²⁸ <https://www.ihk-schleswig-holstein.de/blueprint/servlet/resource/blob/1374040/5a66759168ec7c30770fb9d95000536c/fachbroschuere-verkehrsmarkt-ostsee-data.pdf>.

²⁹ <https://www.rostock-port.de/kreuzschiffahrt/anlaeufer/statistiken.html>.

³⁰ <https://www.rostock-port.de/hafen-rostock/statistiken/schuettgut>.

³¹ <https://www.rostock-port.de/schiffsverkehr/liegeplaetze-nutzungsparameter>.

etwa 8 Mio. t.³² Der Seehafen Wismar bietet als Universalhafen die Möglichkeit Schütt- und Massengüter, aber auch Stück- und Flüssiggüter, RoRo-Güter und Container sowie Projektladungen umzuschlagen. Zu den Hauptgütern gehören Agrarprodukte, Baustoffe, Holz- und Forstprodukte sowie Metalle. Zudem steht ein Kreuzfahrtterminal zur Verfügung.³³ Der Hafen verfügt über rund 2,8 km Kaje, 17 Liegeplätze und 2 Dalbenliegeplätze, eine Fläche von 70,7 ha (60,7 ha Landfläche) und ein Gleisnetz von 23,6 km. Es können Schiffe mit maximal 240 m Länge und einem Tiefgang von 8,5 m abgefertigt werden.³⁴

³² https://www.hafen-wismar.de/de/seehafen_wismar/infrastruktur_und_ausstattung/zahlen_fakten.

³³ <https://www.hafen-wismar.de/de/hafenlogistik>.

³⁴ https://www.hafen-wismar.de/de/seehafen_wismar/infrastruktur_und_ausstattung/zahlen_fakten.

2 Grundlagen des Klimawandels

2.1 Begriff: Klima

Klima ist die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, i.d.R. über einen Zeitraum von 30 Jahren. Wetter ist hingegen der fühlbare Zustand der Atmosphäre zu einem Zeitpunkt an einem Ort. Während Wetter täglichen Schwankungen unterliegt, beschreibt Klima dessen langfristiges Mittel (vgl. Abbildung 2). Das Klima wird beispielsweise anhand von Mittel- und Extremwerten, Häufigkeiten und Jährlichkeiten beschrieben. Die natürliche innere Variabilität des Wetters ist auf dessen chaotische Charakteristik zurückzuführen. Änderungen im Klima werden aufgrund der langen Zeitskalen erst nach längeren Zeiträumen ersichtlich.

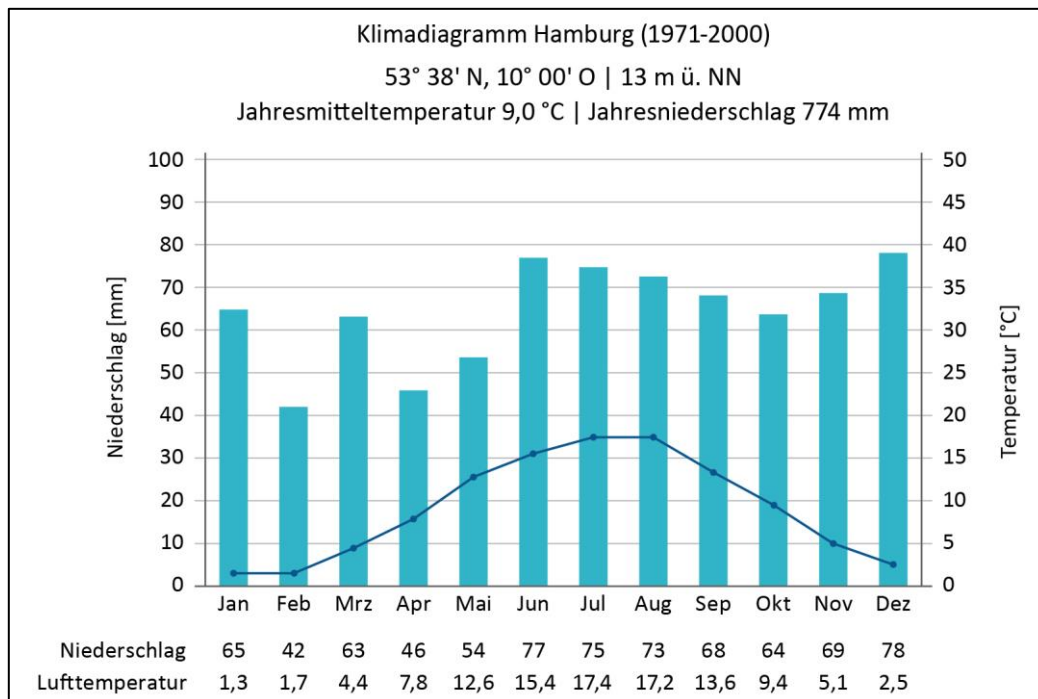


Abbildung 2: Klimadiagramm Hamburg³⁵

2.2 Treibhauseffekt

Die sogenannten Treibhausgase (THG) wie beispielsweise Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid (CO₂) sorgen dafür, dass die Atmosphäre der Erde um etwa 33°C erwärmt wird – man spricht vom natürlichen Treibhauseffekt, ohne den die globale

³⁵ Nach http://deacademic.com/pictures/dewiki/75/Klima_Hamburg.PNG

Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche etwa -18°C betragen würde.³⁶ Die in der Luft enthaltenen THG lassen aufgrund ihrer Molekülstruktur die kurzwellige Sonnenstrahlung ungehindert durch, halten jedoch die von der Erde wieder emittierte langwellige Wärmestrahlung zurück, wodurch Erdoberfläche und Atmosphäre zusätzlich erwärmt werden (vgl. Abbildung 3). Der Name Treibhauseffekt ist auf das Zurückhalten der Wärme, ähnlich wie in einem Treibhaus, zurückzuführen. Durch die menschliche Aktivität werden die THG-Konzentrationen in der Atmosphäre seit der Industrialisierung kontinuierlich erhöht, man spricht daher auch vom anthropogenen Treibhauseffekt. Die Hauptquelle des anthropogenen CO_2 , die Verbrennung fossiler Rohstoffe, kann anhand von Isotopenanalysen nachgewiesen werden (IPCC 2007). Die Wirkung des wichtigsten natürlichen THG - des Wasserdampfs - wird beim anthropogenen Treibhauseffekt indirekt berücksichtigt: Durch die Erwärmung der Atmosphäre kann diese mehr Wasserdampf aufnehmen, wodurch sie sich zusätzlich erwärmt und wiederum mehr Wasserdampf aufnehmen kann. Diese positive Rückkopplung wird bei Berechnungen des Treibhauspotentials der anthropogenen THG-Emissionen einbezogen. Der vom Menschen direkt verursachte Anteil des Wasserdampfs durch z.B. die Verbrennung fossiler Rohstoffe ist hingegen global betrachtet vernachlässigbar.

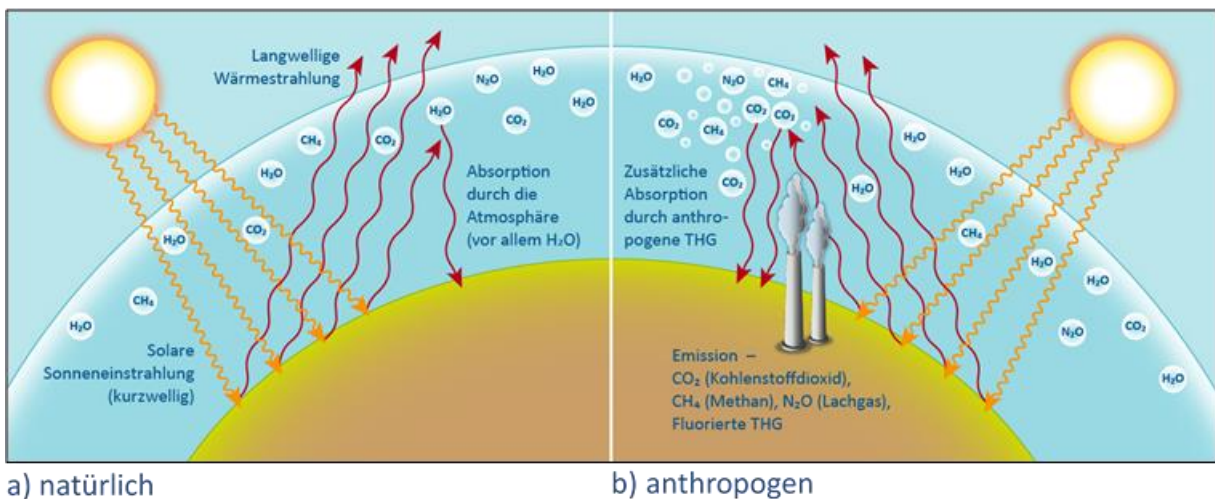


Abbildung 3: (a) Natürlicher und (b) anthropogener (durch den Menschen verursachter) Treibhauseffekt

Der zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) zieht in seinem sechsten Sachstandsbericht (IPCC 2021) den Schluss: 'Es ist unbestreitbar, dass der Mensch die Atmosphäre, die Ozeane und das Land

³⁶ <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Treibhauseffekt>

erwärmt hat. Weitreichende und rasche Veränderungen in der Atmosphäre, den Ozeanen, der Kryosphäre und der Biosphäre sind eingetreten.' Abbildung 4 zeigt deutlich, wie die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre seit der Industrialisierung im 18. Jahrhundert zugenommen hat. Der Anstieg der globalen Lufttemperatur korreliert eng mit dem Anstieg des Treibhausgases.

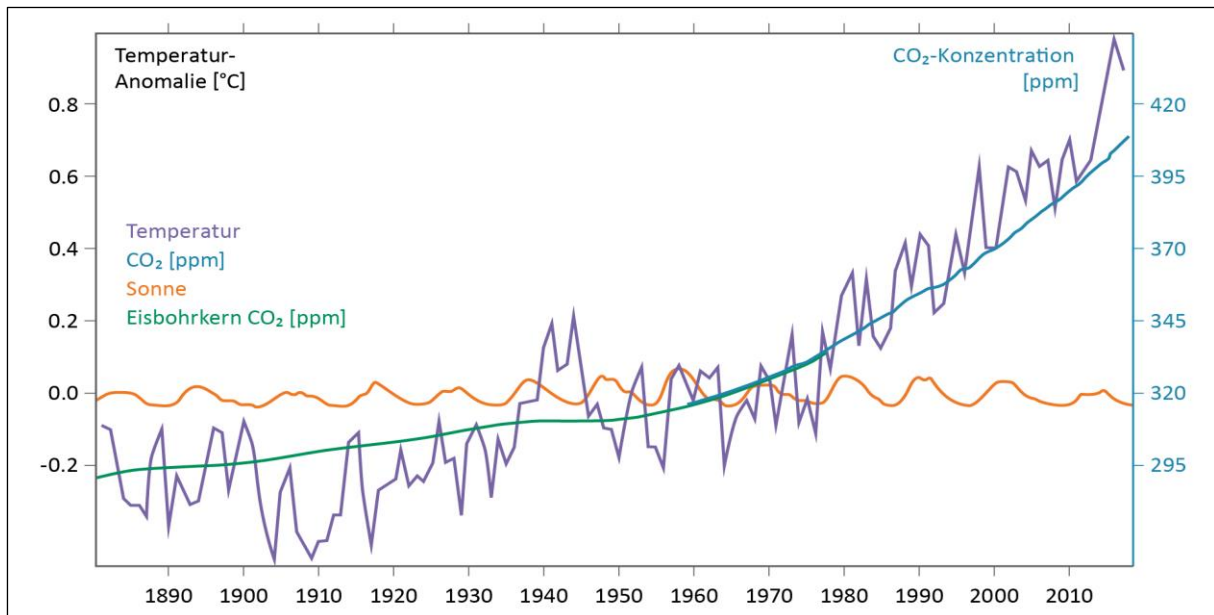


Abbildung 4: Verlauf von globaler Temperatur, CO₂-Konzentration und Sonnenaktivität seit 1880 (nach Herd 2020)

2.3 Klimasystem

Das globale Klimasystem besteht aus fünf Komponenten, die in Wechselwirkung miteinander stehen (Abbildung 5): Atmosphäre, Ozeane, Landoberfläche, Biosphäre, Kryosphäre (Eis & Schnee). Beispielsweise werden durch die ozeanischen Strömungen mit dem Wassertransport auch große Wärmemengen transportiert, so dass in kälteren Regionen die untere Atmosphäre erwärmt wird. Die ozeanischen Strömungen selbst werden dabei von den atmosphärischen Windsystemen beeinflusst. Eis und Schnee werden bei kalten Temperaturen gebildet, wodurch wiederum die Lufttemperatur beeinflusst wird, da Eis- und Schneedecken stark die Reflexion der Sonnenstrahlung beeinflussen. Durch Kipppunkte (engl. tipping point) im Klimasystem kann eine nicht mehr aufzuhaltende und nicht umkehrbare Erwärmung von bis zu mehreren Grad Celsius erfolgen. Ein Beispiel für einen Kipppunkt ist das Abschmelzen des grönländischen Eisschildes. Hierdurch würde die kühlende Wirkung durch die fehlende Reflexion der weißen Eisdecke verloren gehen und die Atmosphäre würde sich stark aufheizen.

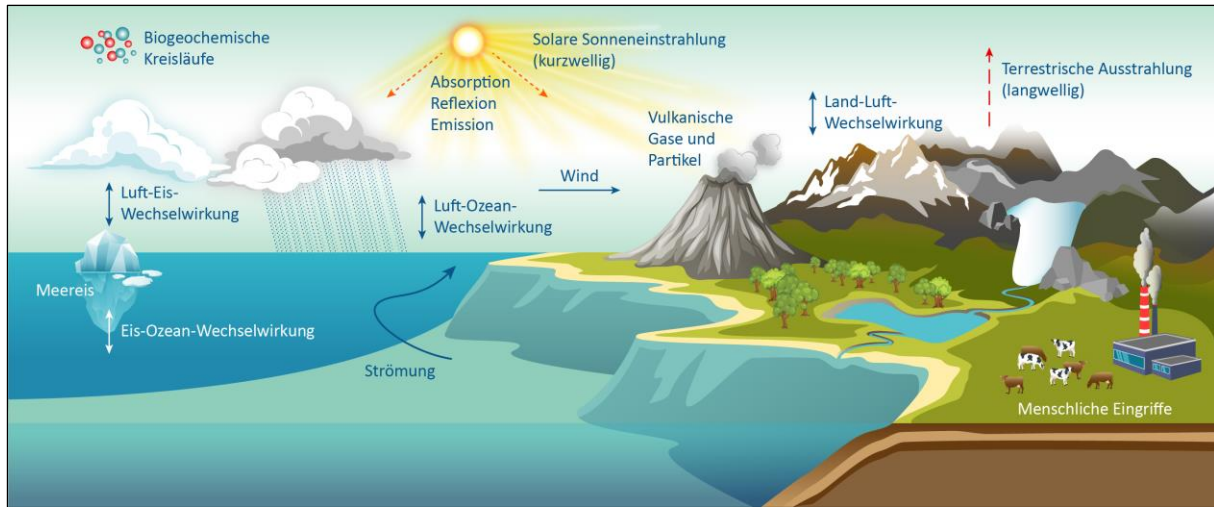


Abbildung 5: Das Klimasystem und die Wechselwirkungen seiner Komponenten (nach Worldoceanreview 2020)

2.4 Klimamodelle

Klimamodelle basieren auf physikalischen Gesetzen (Impuls-, Masse- und Energieerhalt) und Beobachtungen, mit deren Hilfe das Klimasystem abgebildet und dessen Veränderungen berechnet werden. Sie sind in der Lage, wichtige Aspekte des gegenwärtigen und des vergangenen Klimas wiederzugeben und dienen dazu, das Klimasystem und seine Veränderungen zu verstehen. Dabei wird die Erde in horizontale und vertikale Gitter unterteilt, an deren Knotenpunkten die klimatischen Eigenschaften³⁷ anhand unterschiedlicher Parameter beschrieben und anschließend deren Änderung berechnet wird (siehe

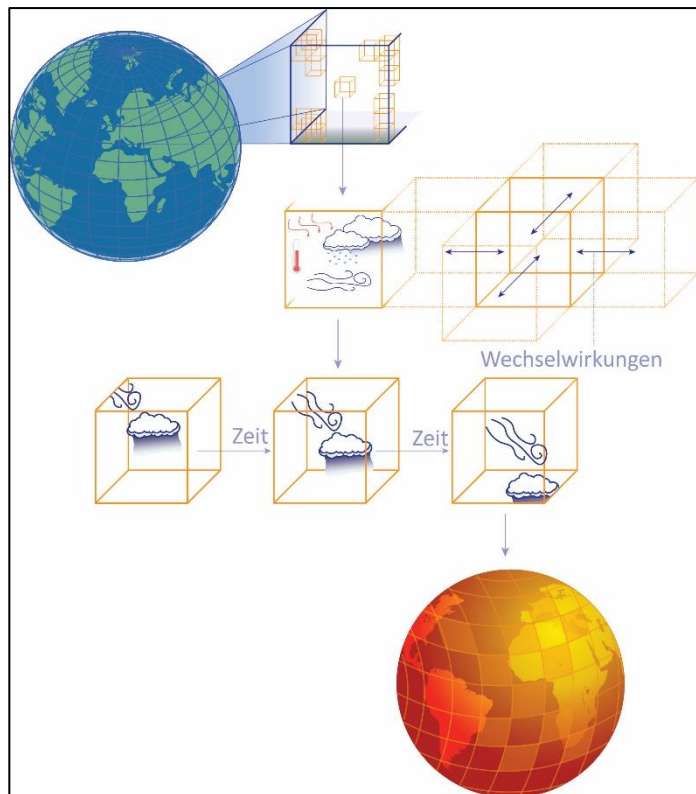


Abbildung 6: Die Abbildung skizziert Aufbau und Funktionsweise eines Klimamodells (nach Spektrum 2020)

Abbildung 6). Je höher die Auflösung der Knotenpunkte, umso besser kann das Klima an

einem Ort beschrieben werden, umso höher wird allerdings auch die erforderliche Rechenleistung, welche selbst auf modernen Supercomputern Monate bis Jahre beträgt.

Im Laufe der Zeit haben sich Klimamodelle immer weiter verbessert. Die Auflösung wurde verfeinert und die Modelle der unterschiedlichen Klimakomponenten (Atmosphäre, Ozean etc.) wurden miteinander gekoppelt, so dass Wechselwirkungen zwischen den Komponenten berücksichtigt werden können. Den Modellen müssen die Anfangsbedingungen, welche auf Beobachtungen des historischen Klimas beruhen, sowie Randbedingungen, wie die Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre, vorgegeben werden. Die auf Basis dieser Anfangs- und Randbedingungen stattfindenden Prozesse innerhalb des Klimasystems werden von den Modellen auf Basis der bekannten physikalischen Gesetze an den einzelnen Gitterpunkten bestimmt. Da die Anfangsbedingungen nie genau bekannt sind, werden mehrere Modellläufe mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen durchgeführt. Die Gesamtheit dieser Modellläufe wird Ensemble genannt. Zudem gibt es weltweit von verschiedenen Forschergruppen entwickelte Klimamodelle, welche im Wesentlichen dasselbe Verhalten zeigen. Werden mehrere Ensembles verschiedener Klimamodelle verwendet spricht man von Multi-Modell-Ensembles. Unabhängig davon ob ein Ensemble oder Multi-Modell-Ensemble vorliegt, Aussagen über zukünftige Änderungen des Klimas beinhalten also immer eine gewisse Bandbreite möglicher Änderungen. Häufig werden vereinfachend Mittelwert oder Median dieser Bandbreite angegeben, wodurch jedoch keine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit abzuleiten ist (Linke 2017).

Klimamodelle geben die beobachteten Veränderungen wieder, wenn der Einfluss des Menschen, d.h. die anthropogenen Treibhausgasemissionen, berücksichtigt wird (Abbildung 7). Daraus lassen sich zum einen die Verlässlichkeit der Klimamodelle ableiten und zum anderen der Einfluss der anthropogenen Treibhausgase auf das Klimasystem. Sowohl für Land- und Ozeanoberfläche sowie den Wärmegehalt des Ozeans zeigt sich die beobachtete Zunahme der Temperatur bzw. des Wärmegehalts nur unter Berücksichtigung menschlicher Einflüsse.

Die Projektion des zukünftigen Klimas weisen verschiedene Unsicherheitsquellen auf (Abbildung 8). Unsicherheiten aufgrund der internen Variabilität des Klimasystems, welche z.B. aufgrund von Wechselwirkungen in den Komponenten des Klimasystems oder zwischen dessen einzelnen Komponenten besteht – ein bekanntes Beispiel ist El Niño –, wird begegnet, indem die Anfangsbedingungen der Klimamodelle variiert werden. Modellunsicherheiten bestehen, weil es unterschiedliche Möglichkeiten gibt, wie das Klimasystem in den Modellen

abgebildet wird. Der Modellunsicherheit wird begegnet, indem unterschiedliche Modelle verschiedener Forschergruppen verwendet werden (Multi-Modell-Ensemble). Die größte Unsicherheit basiert jedoch auf der zukünftigen Entwicklung der THG-Emissionen. Die Menge zukünftiger THG-Emissionen hängt stark von der zukünftigen globalen Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung sowie der Klimapolitik ab. Da hier verschiedene Szenarien denkbar sind, spricht man auch von einer Szenario-Unsicherheit. Die daraus resultierende Bandbreite möglicher zukünftiger Änderungen stellt Planer von Anpassungsmaßnahmen vor die Herausforderung, geeignete Maßnahmen zu entwickeln und Fehlanpassungen zu vermeiden.

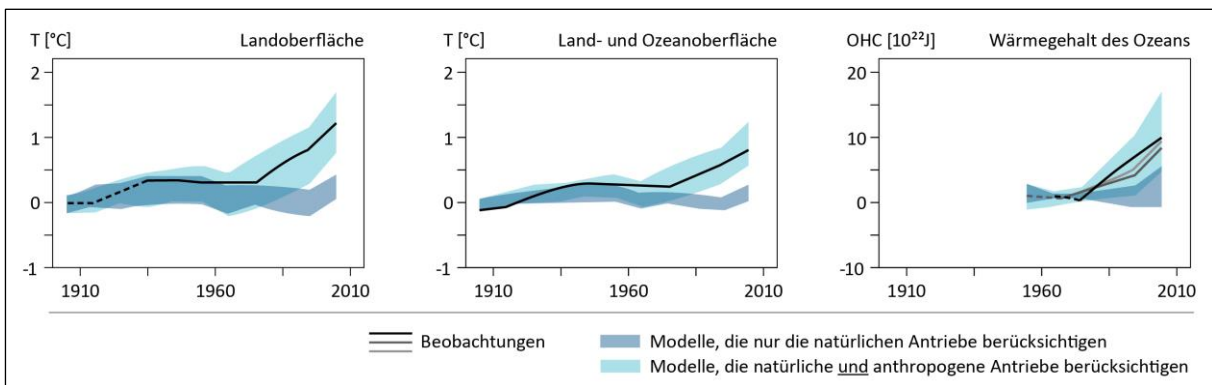


Abbildung 7: Beobachtete und mit Klimamodellen simulierte globale Erwärmung im 20. Jahrhundert mit und ohne anthropogene Antriebskräfte (nach IPCC 2013/ 2014)

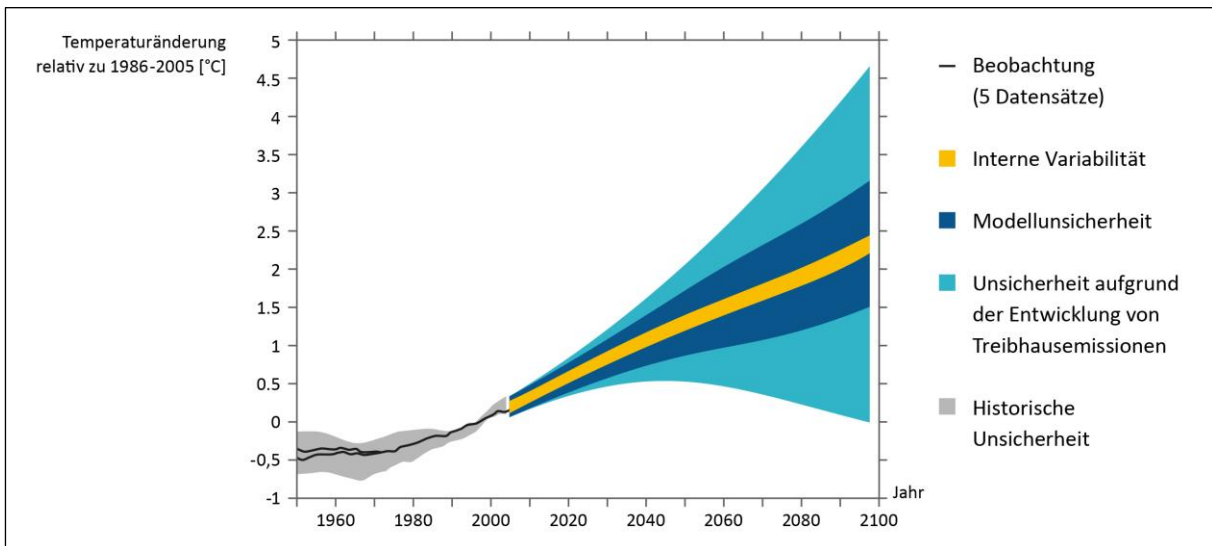


Abbildung 8: Einfluss verschiedener Unsicherheitsquellen bei Klimaprojektionen (nach IPCC 2013)

2.5 Klimaszenarien

Für Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas benötigt man realistische Szenarien der zukünftigen Erwärmung. Hierfür werden neben der voraussichtlichen

Bevölkerungsentwicklung auch Änderungen in Wirtschaft, Lebensstandard, Energie und Politik (Klimaschutz) berücksichtigt. Die unterschiedlichen Szenarien werden als Eingangsdaten von Klimamodellrechnungen verwendet.

Im dritten und vierten IPCC-Sachstandsbericht wurden die sogenannten SRES-Szenarien (Special Report on Emissions Scenarios, englisch für Sonderbericht über Emissions-Szenarien) genutzt, welche auf unterschiedlichen THG-Emissionsszenarien beruhen, aus denen die Erwärmung durch den Menschen mithilfe von Klimamodellen abgeleitet wurde.

Im fünften IPCC-Sachstandsbericht wurden die sogenannten RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways, englisch für repräsentative Konzentrationspfade) verwendet. Sie definieren, mit welchem zusätzlichen Strahlungsantrieb - der zusätzliche Strahlungsantrieb beschreibt die durch den Menschen verursachte Erwärmung - zu rechnen ist. Aus diesen Klimaszenarien werden dann bestimmte Emissionsszenarien abgeleitet, d.h. ihnen liegen keine direkten Emissionsszenarien zugrunde. Die RCP-Szenarien wurden aus mehreren Gründen eingeführt. Ein Vorteil ist, dass so beispielsweise Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden können.³⁸

Die RCP-Szenarien basieren auf den Ergebnissen verschiedener Forscher, wurden jedoch nicht vom IPCC entwickelt. Jedes RCP-Szenario ist repräsentativ für eine Vielzahl von Szenarien. Die RCP-Szenarien werden in ein Szenario mit nur sehr geringem Zuwachs des Strahlungsantriebs (RCP2.6), zwei Szenarien mit moderatem Anstieg des Strahlungsantriebs (RCP4.5 und RCP6.0), bis hin zu einem Szenario mit starkem Zuwachs des Strahlungsantriebs (RCP8.5) eingeteilt – die Zahl steht dabei jeweils für den Zuwachs des anthropogenen Strahlungsantriebs in $[W/m^2]$ im Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Wert.

Van Vuuren et al. (2011) beschreiben in ihrer Veröffentlichung den Entwicklungsprozess der RCP-Szenarien, wonach das Eintreffen des RCP2.6-Szenarios bedeutet, dass die globalen THG-Emissionen bis zum Jahr 2080 netto auf null heruntergefahren werden müssen; außerdem werden dabei Technologien zur Reduzierung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre berücksichtigt, so dass im Jahr 2100 eine THG-Konzentration von 400 ppm CO_2 -äq vorliegt. Die vorindustrielle CO_2 -Konzentration lag bei rund 280 ppm (IPCC 2013), während die aktuelle CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre bereits bei rund 415 ppm³⁹ liegt. Das

³⁸ <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html>

³⁹ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.

Eintreffen des RCP8.5-Szenarios bedeutet, dass kaum Maßnahmen zur Verringerung der THG-Emissionen umgesetzt werden, so dass die THG-Konzentration 2100 bei rund 1.370 ppm CO₂-äq liegt.

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der anthropogenen Strahlungsantriebe der RCP- und SRES-Szenarien. Van Vuuren et al. (2011) stellten fest, dass 20 Veröffentlichungen das RCP2.6-Szenario als realistisch ansehen, hingegen in 118 Veröffentlichungen das RCP4.5-Szenario und in 10 Veröffentlichungen das RCP6.0-Szenario als realistisch angesehen wird. In 40 Veröffentlichungen wird davon ausgegangen, dass die zukünftige Entwicklung dem RCP8.5-Szenario entspricht. Aktuelle Stimmen sagen allerdings, dass das RCP8.5-Szenario eher als Worst-Case-Szenario anzusehen ist, da in vielen Ländern der Welt bereits deutliche Maßnahmen zum Klimaschutz ergriffen werden (Hausfather und Peters 2020). Beim Eintreffen des RCP4.5-Szenarios ist am Ende des 21. Jahrhunderts mit einer Erwärmung seit der Industrialisierung von bis zu 2,6°C zu rechnen (2013/ 2014) .

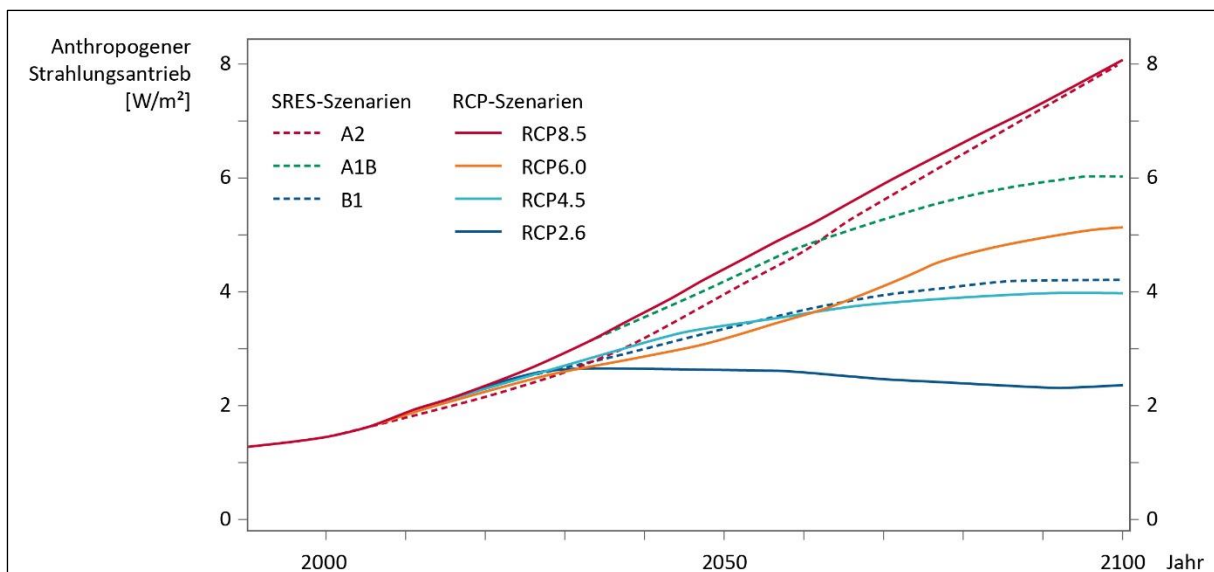


Abbildung 9: Anthropogener Strahlungsantrieb der RCP- und SRES-Szenarien (nach IPCC 2013)

Im sechsten IPCC-Sachstandsbericht werden die SSP-Szenarien (Shared Socioeconomic Pathways, englisch für gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade) zugrunde gelegt. Die neuen Szenarien wurden eingeführt, um das innerhalb der SRES- und RCP-Szenarien zugrunde gelegte Vorgehen - Treibhausgasemissionsszenarien bzw. anthropogener Strahlungsantrieb - zu kombinieren. Die SSP-Szenarien werden in fünf sozioökonomische Entwicklungspfade (SSP1 bis SSP5) unterteilt, in der von einer nachhaltigen sozioökonomischen Entwicklung (SSP1) bis hin zu einer fossilen Entwicklung (SSP5)

ausgegangen wird. Diese SSP-Basis-Szenarien folgen damit dem Prinzip der SRES-Szenarien. Für die Modellierung der Klimafolgen werden die SSP Basis-Szenarien mit unterschiedlichen, zusätzlich zu heute existierenden Klimaschutzmaßnahmen einzuführenden Klimaschutzszenarien (Shared Climate Policy Assumptions (SPA), englisch für gemeinsame Annahmen zur Klimapolitik) kombiniert. In der Folge ergeben sich wie bei den RCP-Szenarien, Verläufe des anthropogenen Strahlungsantriebs im 21. Jahrhundert. Mit Einführung der SSP-Szenarien werden weiterhin anthropogene Strahlungsantriebe am Ende des 21. Jahrhunderts ausgewiesen, wie sie bereits bei den RCP-Szenarien bestanden haben. Der anthropogene Strahlungsantrieb am Ende des 21. Jahrhunderts wird durch einen Zusatz, beispielsweise SSP1-2.6, das entspricht einem anthropogenen Strahlungsantrieb von 2.6 W/m^2 am Ende des 21. Jahrhunderts, kenntlich gemacht. Es bestehen also unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten der sozioökonomischen Basis-Szenarien (SSP) und der Szenarien mit neu zu implementierenden Klimaschutzmaßnahmen (SPA). Im sechsten IPCC-Sachstandsbericht werden die Szenarien SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 sowie SSP5-8.5 verwendet. Die zwei neu eingeführten Szenarien, SSP1-1.9 und SSP3-7.0, entsprechen einer Erwärmung am Ende des 21. Jahrhunderts von $1,5^\circ\text{C}$ bzw. $3,5^\circ\text{C}$. Das Szenario SSP1-1.9 deckt das $1,5^\circ$ -Ziel ab. Das Szenario SSP3-7.0 entspricht einem Szenario mit starker Erwärmung, welches sich jedoch aufgrund von absehbar verstärkt implementierten Klimaschutzmaßnahmen vom 'Weiter-wie-bisher'-Szenario (SSP5-8.5 bzw. RCP8.5), einem Szenario ohne weitere Klimaschutzmaßnahmen, unterscheidet.

2.6 Modellkette

Die Modellkette vom globalen Klimamodell zum Wirkmodell zeigt Abbildung 10. Globale Klimamodelle decken das Klimasystem der gesamten Erde ab, benötigen jedoch eine relativ große Rechenleistung. Regionale Klimamodelle decken hingegen nur einen Teil des Globus ab und bieten daher den Vorteil einer vergleichsweise höheren Auflösung mit vertretbarem Rechenaufwand. Die Ergebnisse der globalen Modelle dienen den regionalen Modellen an ihren Rändern als Eingangsgrößen. Weltweit werden verschiedene globale Modelle (auch globales Zirkulations-Modell, englisch GCM) und regionale Modelle (auch regionales Zirkulations-Modell, englisch RCM) von unterschiedlichen Forschergruppen betrieben. In Deutschland betreibt das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg zwei

globale Modelle (MPI-ESM⁴⁰, ICON-ESM⁴¹) und ein regionales Modell (REMO⁴²), der DWD und andere betreiben ebenfalls ein regionales Modell (CCLM⁴³). Streng genommen sind die globalen Zirkulations-Modelle die Vorläufer der neuesten Generation von Klimamodellen, den sogenannten Erdsystem-Modellen (ESM). Im Gegensatz zu den GCMs können ESMs die Rückkopplungen zwischen den einzelnen Klimakomponenten z.B. im Kohlenstoffkreislauf oder in den Eisschilden berücksichtigen. Die ESMs wurden bereits im fünften IPCC-Sachstandsbericht berücksichtigt. Globale sowie regionale Klimamodelle werden anhand von Beobachtungsdaten überprüft (validiert) um anschließend basierend auf Treibhausgas-Szenarien mögliche zukünftige Änderungssignale zu projizieren. Die Ergebnisse verschiedener Forschergruppen weltweit werden im Rahmen des Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP)⁴⁴ des World Climate Research Programms (WCRP)⁴⁵ koordiniert und ausgewertet und dienen den IPCC-Berichten als Grundlage.

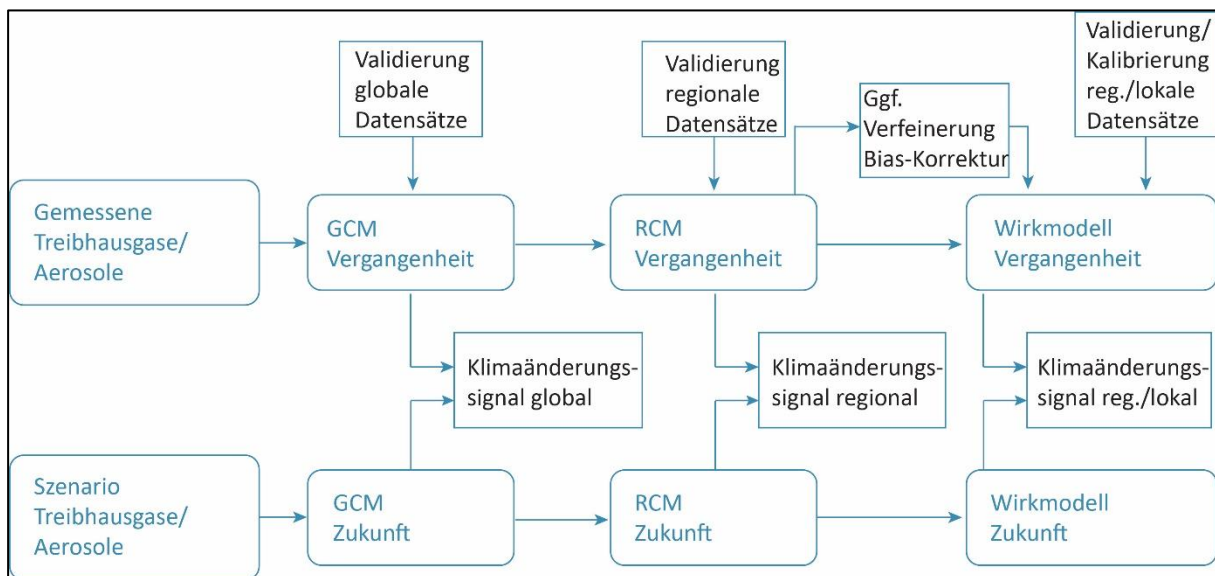


Abbildung 10: Modellkette vom globalen Klimamodell zum Wirkmodell (nach Linke 2017)

Klimamodelle erlauben zunächst nur Aussagen über klimatische Änderungen. Für Aussagen über die Auswirkungen der klimatischen Änderungen werden sogenannte Wirkmodelle (auch Impaktmodelle) mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen betrieben, um beispielsweise

⁴⁰ https://mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Forschung_aktuell/PDFs/120828_MPI-ESM_dt.pdf

⁴¹ <https://mpimet.mpg.de/en/science/modeling-with-icon>

⁴² <https://www.remo-rcm.de/059966/index.php.en>

⁴³ <https://wiki.coast.hzg.de/clmcom>

⁴⁴ <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>

⁴⁵ <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>

Aussagen über die Änderung des Abflusses oder der Wellenhöhe zu treffen. Klimamodelle können dazu neigen, die Beobachtungsdaten systematisch zu über- oder unterschätzen (BIAS). Diese Abweichungen können sich über lange Zeiträume zu relevanten Abweichungen addieren. Daher kann es ggf. notwendig sein, diesen systematischen Fehler anhand von Beobachtungsdaten zu korrigieren (BIAS-Korrektur). Alternativ können relative Änderungen betrachtet werden, die den systematischen Fehler gleichermaßen in der Vergangenheit wie auch in der Zukunft beinhalten. Die Güte der Ergebnisse von Wirkmodellen wird ebenso wie bei den Klimamodellen anhand von Beobachtungsdaten validiert. Grundsätzlich pflanzen sich die Unsicherheiten in der Modellkette Globalmodell-Regionalmodell-Wirkmodell fort (Abbildung 11). Damit anhand der Wirkmodelle ein aussagekräftiges Bild über mögliche zukünftige Änderungen gezeichnet werden kann, sind die jeweiligen Klimaszenarien differenziert zu betrachten und jeweils die Bandbreite der Ensembles zu berücksichtigen. Wegen des sich aus der Vielzahl an Modellläufen ergebenden hohen Rechenaufwands, stellt eine Anwendung von Wirkmodellen für die Ableitung konkreter Anpassungsmaßnahmen eine Herausforderung dar (Linke 2017).

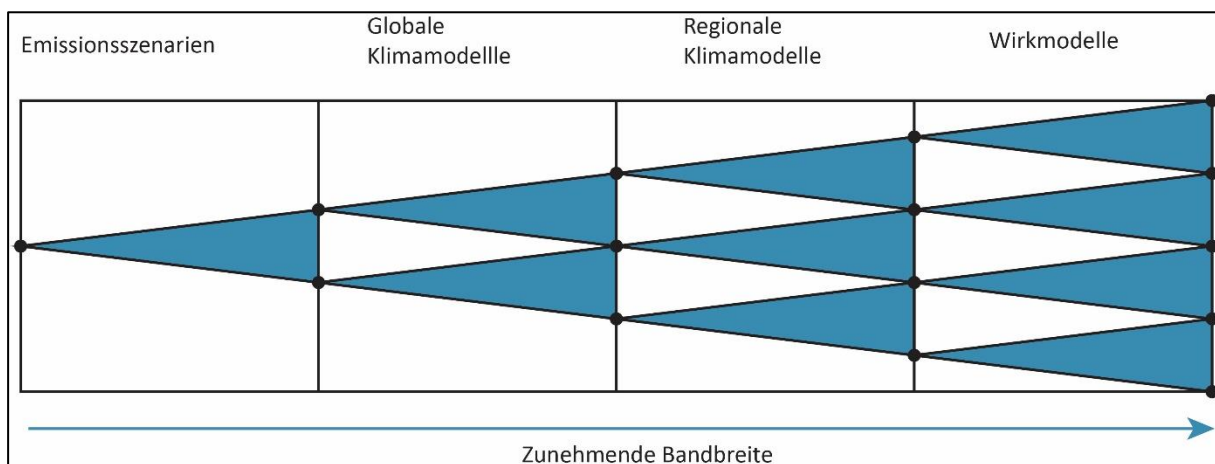


Abbildung 11: Bandbreite möglicher zukünftiger Änderungen infolge der vorhandenen Unsicherheiten innerhalb der Modellkette (nach LfU Bayern 2020)

2.7 Änderungssignal

Das Änderungssignal, d.h. die Größe der zukünftig zu erwartenden Änderung klimatischer Parameter, ist Ausgangspunkt für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. Neben der Herausforderung aufgrund unterschiedlicher Klimaszenarien und der Bandbreite möglicher Änderungssignale innerhalb der Modellkette besteht die Möglichkeit, dass das Klimasignal keine robuste Änderung zeigt (vgl. Abbildung 12). Ein robustes Änderungssignal setzt voraus, dass die Änderung signifikant ist, d.h. dass das Änderungssignal größer ist als die bisher zu

beobachtende natürliche Variabilität. Liegt das Änderungssignal innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite ist es somit nicht eindeutig als durch den Klimawandel verursachtes Signal zu detektieren. Zusätzlich zur Signifikanz müssen die Signale unterschiedlicher Modellläufe bzw. Modell-Ensembles in die gleiche Änderungsrichtung, d.h. Zu- oder Abnahme, zeigen. Eine solch einheitliche Änderungsrichtung innerhalb eines Ensembles ist nicht automatisch gegeben. Sind beide Voraussetzungen gegeben, d.h. Signifikanz und gleiche Änderungsrichtung, kann eine Änderung als robust angesehen werden.

Abbildung 13 zeigt zwei Vorgehensweisen, wie die Größe des Änderungssignals bestimmt werden kann. Häufig wird die Größe des Änderungssignals als Differenz des Mittelwerts aus zwei Zeitscheiben (beispielsweise 2071-2100 versus 1971-2000) beschrieben, wobei Zeitscheiben über einen Zeitraum von 30 Jahren eine Klimaperiode beinhalten. Einzelne Jahre können nicht miteinander verglichen werden, da sie keine Informationen über die langfristigen Änderungen des Klimasignals enthalten. Anhand des gleitenden Mittelwerts über eine Klimaperiode wird eine fortschreitende Veränderung aufgezeigt. Alternativ kann zur Bestimmung der Größe des Änderungssignals die Differenz von Anfang und Ende einer Trendgeraden (linearer Trend) der untersuchten Zeitspanne herangezogen werden.

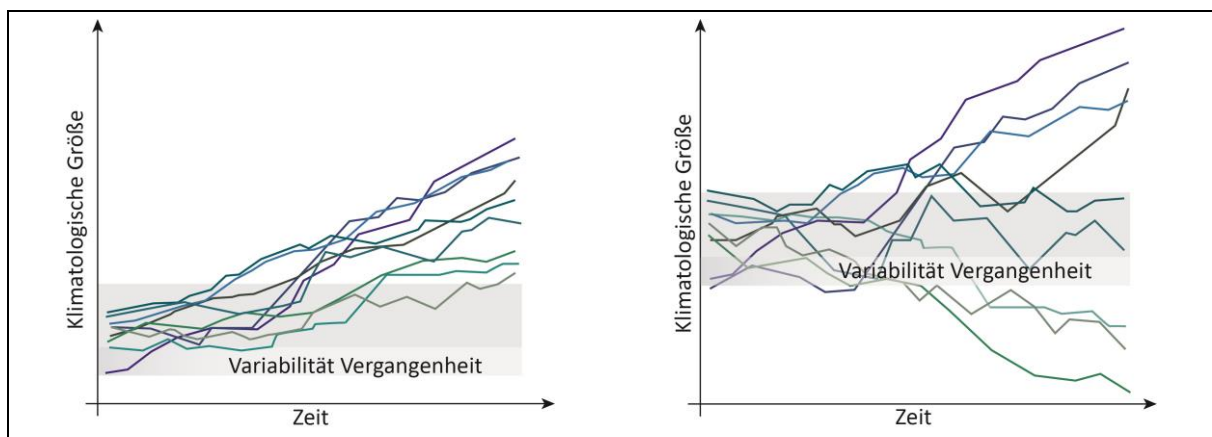


Abbildung 12: Änderungssignal einer klimatischen Größe. Links: Robuste Änderung, rechts: Keine robuste Änderung (nach LfU Bayern 2020).

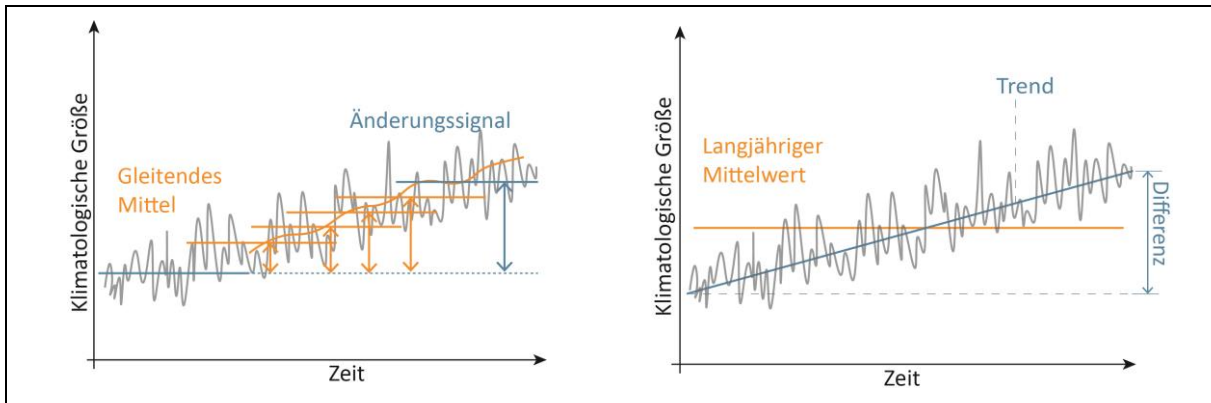


Abbildung 13: Änderungssignal einer klimatischen Größe. Links: Differenz aus zwei Zeitscheiben, rechts: Linearer Trend (nach LfU Bayern 2020).

Bei der Untersuchung von Trends ist sowohl bei Beobachtungsdaten, d.h. historischen Daten, als auch bei Klimaprojektionen Vorsicht hinsichtlich der Repräsentativität des untersuchten Trends geboten. Klimaprojektionen umfassen jedoch per se längere Zeiträume, i.d.R. mindestens 30 Jahre, so dass die Aussage vor allem für kurze historische Zeiträume relevant ist. Ausnahmen bilden lediglich Parameter mit einer ausgeprägten dekadischen Variabilität - dann sind in jedem Fall (historisch/ zukünftig) lange Zeiträume essentiell. (Abbildung 14)

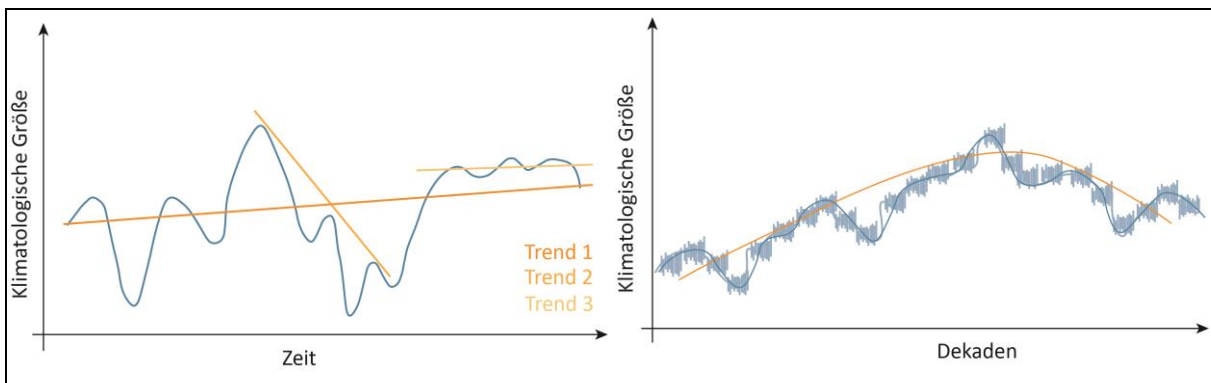


Abbildung 14: Links: Je nach Beobachtungszeitraum finden sich verschiedene Trends innerhalb der Zeitreihe. Rechts: Die Zeitreihe weist eine dekadische Variabilität auf (nach Jacob 2014).

2.8 Änderung von Bemessungsparametern

Das Änderungssignal von Klima- bzw. Wirkmodellen muss auf die Ingenieurspraxis übertragen werden. In der Ingenieurspraxis sind neben mittleren Zuständen vor allem seltene Ereignisse für die Bemessung von Anlagen relevant. Die Ergebnisse der Klimamodelle werden für mittlere Zustände z.B. anhand von arithmetischem Mittelwert oder Median (50% Perzentil) und für extreme Zustände, z.B. anhand von Minimum/ Maximum oder des 99% Perzentils ausgewertet. Als Spannweite von Ensembleläufen wird häufig das 15% bis 85% Perzentil

betrachtet. Studien unterscheiden sich oft darin, wie sie Schwellenwerte für die Auswertung ihrer Ergebnisse festlegen, wodurch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse schwierig ist. In der Ingenieurpraxis wird zudem in der Regel mit Jährlichkeiten gearbeitet, welche aus extremwertstatistischen Analysen abgeleitet werden. Um Änderungen der Jährlichkeit aus Klimamodellen direkt abzuleiten, sind besonders lange Zeitreihen, welche durch viele Modellläufe generiert werden, nötig, so dass der Aufwand vergleichsweise hoch ist und nur wenige Studien Änderungen der Jährlichkeit untersuchen. Zudem unterscheiden sich Extremwertverteilungen insbesondere für seltene Ereignisse, so dass bereits die extremwertstatistische Auswertung eine Unsicherheit enthält, wie sie auch infolge der zukünftigen Änderung infolge des Klimawandels entstehen kann. Insgesamt besteht daher die Herausforderung, die Ergebnisse der Klimawissenschaften auf die Ingenieurpraxis zu übertragen.

2.9 Klimaskepsis - 'Climategate'

'Climategate' ist eine Debatte um die Manipulation von Forschungsergebnissen in der Klimaforschung, welche durch die Veröffentlichung von etwa 1.000 E-Mails und Dokumenten der Klimaforschungsabteilung der britischen University of East Anglia im Internet entstanden ist. Die Dokumente wurden kurz vor der UN-Klimakonferenz 2009 in Kopenhagen von Unbekannten veröffentlicht und umfassen im Wesentlichen Korrespondenzen zwischen verschiedenen Forschern. In der im Internet aufkeimenden Diskussion wurde aus den Korrespondenzen geschlussfolgert, dass Temperaturkurven manipuliert wurden, um einen in den Daten ersichtlichen Widerspruch zum Klimawandel zu kaschieren. Dabei wurden jedoch Informationen aus vereinzelt E-Mails ohne ihren Gesamtzusammenhang erfasst und die Tatsache des internen Sprachgebrauchs in den E-Mails außer Acht gelassen, so dass falsche Schlüsse gezogen wurden. In mehreren Untersuchungsausschüssen konnte kein wissenschaftliches Fehlverhalten festgestellt werden. Es wurde jedoch die Verwendung von nicht optimal geeigneten statistischen Methoden bemängelt.^{46,47,48}

Durch die Affäre wurde allerdings eine Verknüpfung zwischen Wissenschaft und Politik deutlich. In einigen E-Mails wurde versucht, die öffentliche Wirksamkeit der Ergebnisse

⁴⁶ <https://www.zeit.de/2012/48/Klimawandel-Marc-Morano-Lobby-Klimaskeptiker/komplettansicht>

⁴⁷ <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/climategate-alles-ueber-den-skandal-in-der-klimaforschung-a-688175.html>

⁴⁸ <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/e-mail-afaere-untersuchung-entlastet-klimaforscher-a-689022.html>

möglichst in eine Richtung zu bündeln, um so der Politik klare Aussagen zu liefern und deren Handlungsbasis für den Schutz des Klimas zu stärken. Als komplexe Wissenschaft bestehen in der Klimaforschung naturgemäß Unsicherheiten, welche auch bei zunehmendem Fortschritt in der Messung von Klimadaten und der Berechnung von Klimamodellen zu erwarten sind. Nichtsdestotrotz müssen Klimaforscher die Öffentlichkeit über ihre Beobachtungen und den daraus möglichen Konsequenzen aufklären.⁴⁹

2.10 Auswirkungen des Klimawandels

Die Folgen des anthropogenen Klimawandels zeigen sich in allen Teilen des Klimasystems, der Atmosphäre, der Ozeane, der Landoberfläche, der Biosphäre und der Kryosphäre. Neben der Erwärmung von Luft und Ozeanen, was zu einem Abschmelzen von Gletschern und Polkappen führt, steigt der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, da wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann. Die Konsequenz ist, dass das Potential zur Intensivierung des Wasserkreislaufs gesteigert wird und es zu mehr Niederschlag kommen kann. Zudem ist mit einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen beispielsweise über einem Großteil der Landmassen der mittleren Breiten zu rechnen. (IPCC 2013), (IPCC 2021)

Gleichzeitig wird vermehrt mit Trockenheit, Dürren und Hitzewellen gerechnet. Mit der Erwärmung der Luft nimmt grundsätzlich das Potential zu mehr Verdunstung zu. Das bedeutet jedoch nicht, dass in einer Region auch mehr Niederschlag fällt. Es wird erwartet, dass feuchte Regionen zukünftig noch feuchter und trockene Regionen noch trockener werden. Auch die Gegensätze zwischen den feuchten und trockenen Jahreszeiten werden zunehmen. (IPCC 2013), (IPCC 2021)

Der Meeresspiegel steigt zum einen aufgrund der thermischen Ausdehnung infolge der Erwärmung des Wassers und zum anderen aufgrund des Abschmelzens des Landeises. Bisher tragen die beiden Anteile in etwa 50% zum Meeresspiegelanstieg bei, wobei der Schmelzwasseranteil leicht überwiegt (IPCC 2013/ 2014).

Ein höherer Meeresspiegel führt zu einem häufigeren Auftreten von Sturmflutwasserständen, da diese ein höheres Ausgangsniveau vorfinden. Durch eine regional unterschiedlich starke Erwärmung der Erde und daraus folgender Änderung der Massen- und Druckverteilung in der Atmosphäre, wird zudem die atmosphärische Zirkulation beeinflusst. Konsequenz ist, dass

⁴⁹ <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/climategate-alles-ueber-den-skandal-in-der-klimaforschung-a-688175-7.html>

sich beispielsweise Zugbahnen von Luftdruckgebieten und Windverhältnisse ändern können. Geänderte Windverhältnisse bergen das Potential Windstau, Wellenhöhe sowie Sedimenttransport zu beeinflussen.

Die Entstehung von für Europa relevanten außertropischen Stürmen wird u.a. von den Temperaturunterschieden zwischen Polen und Äquator, dem Feuchtegehalt der Atmosphäre sowie der Oberflächentemperatur der Meere beeinflusst (IPCC 2013). Nach Ausführung des sechsten IPCC-Berichts besteht mittleres Vertrauen, dass die Intensität und Häufigkeit von außertropischen Stürmen in Nord-, West- und Zentraleuropa geringfügig zunehmen wird, falls die mittlere globale Temperaturzunahme 2°C erreicht oder überschreitet (IPCC 2021).

Hinsichtlich des Auftretens von Nebel ist bei steigenden Lufttemperaturen eher von einer Abnahme der Nebelhäufigkeit auszugehen (Klemm und Lin 2016), da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann.

Schwere Unwetter können mit Starkwindereignissen, Hagel und Tornados einhergehen. Klimamodelle zeigen eine Zunahme der thermischen Instabilität aufgrund eines zunehmenden Feuchtegehalts der Atmosphäre, wodurch die Bedingungen zur Entstehung von schweren Unwettern begünstigt werden (vgl. Allen 2018). Die Ableitung von auf diesen Erkenntnissen beruhenden Aussagen über die zukünftige Häufigkeit einzelner unwetterbedingter Ereignisse wie Starkwind, Hagel und Tornados ist jedoch noch unklar (vgl. Allen 2018).

Im Rahmen des Klimawandels ist mit einer Änderung der Wasserchemie zu rechnen. Durch veränderte Niederschlags- und Verdunstungsraten sowie Schmelzwassereinträgen kommt es zu einer Änderung des Salzgehalts der Ozeane. Der Säuregehalt der Ozeane nimmt zu, da das zusätzliche atmosphärische CO₂ teilweise in den Ozeanen gespeichert wird und dort zu deren Versauerung beiträgt. Durch die steigende Wassertemperatur kann es zudem häufiger zu einem Sauerstoffmangel und zu vermehrten Algenblüten kommen, und es können sich Arten aus wärmeren Gewässern vermehrt ausbreiten.

Auch wenn der Trend einer sich erwärmenden Welt global in die gleiche Richtung zeigt, werden die Folgen des Klimawandels regional unterschiedlich ausfallen. Ebenfalls werden insbesondere auf der lokalen Ebene nicht alle Auswirkungen sofort ersichtlich sein (IPCC 2013). Dabei kann niemand genau vorhersagen, welche Auswirkungen der Klimawandel haben wird. Der Klimawandel und dessen Auswirkungen erfolgen jedoch relativ langsam, so dass Zeit für die Entwicklung und Realisierung von Anpassungsmaßnahmen verbleibt.

Allerdings beeinflusst der vom Menschen verursachte Klimawandel bereits heute Wetterextreme weltweit (IPCC 2021).

2.11 Seehäfen und Klimaschutz

Die in Seehäfen verursachten Treibhausgas-Emissionen können grundsätzlich den folgenden drei Hauptquellen zugeordnet werden: (1) indirekt aus der Versorgung des Hafens mit Energie, (2) direkt durch hafeneigene Gebäude, Fahrzeuge, Equipment etc. und (3) indirekt durch Dritte, beispielsweise durch Schiffsverkehr oder im Hafen ansässige Betriebe. Merk (2014) schätzt, dass in Industrieländern die Schiffsemissionen (rund 70%) im Vergleich zu Emissionen durch Fahrzeuge und Züge (rund 20%) und weiteres Hafenequipment (rund 5%) den Hauptteil der Emissionen (CO₂, SO_x, NO_x und Feinstaub) in einem Hafen ausmachen. Die Emissionen aus dem internationalen Seeverkehr werden nicht den Ländern zugeordnet in denen sie entstehen und fallen daher auch nicht unter die Klimaschutzziele der Bundesregierung, welche sich zum Ziel gesetzt hat, dass Deutschland bis zum Jahr 2050 weitestgehend CO₂-neutral ist (BMU 2016).

Die CO₂-Emissionen machen den größten Anteil der THG-Emissionen im Schiffsverkehr aus (91%), dabei beträgt der Anteil der CO₂-Emissionen des weltweiten Schiffsverkehrs mit 932 Millionen Tonnen etwa 2,6% der globalen Emissionen (Stand 2015) (Naya Olmer et al. 2017) und liegen damit in der Größenordnung der THG-Emissionen Deutschlands - 2,08% im Jahr 2018⁵⁰. Die steigende Effizienz von Schiffen kann durch mangelnde Auslastung, mehr Fahrtstrecke oder gesteigerte Reisegeschwindigkeit kompensiert werden, so dass trotz steigender CO₂-Effizienz mehr CO₂ emittiert wird. Es wird erwartet, dass die CO₂-Emissionen aus dem globalen Schiffsverkehr ohne umfassende Maßnahmen zukünftig steigen werden (Naya Olmer et al. 2017). Die Internationale Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organization - IMO) der UN, in deren Verantwortung die Regulation des globalen Schiffsverkehrs liegt, hat 2018 eine erste Klimaschutzstrategie mit dem Ziel, den Anstieg der THG-Emissionen des internationalen Seeverkehrs sobald wie möglich zu begrenzen und die THG-Emissionen im Jahr 2050 auf 50% des Niveaus von 2008 zu reduzieren, festgelegt (imo 2018). Als weltweit größte Containerschiff-Reederei⁵¹ hat APM-Mærsk 2018 erklärt bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu sein⁵². Grundsätzlich sind darüber hinaus auch politische

⁵⁰ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/179260/umfrage/die-zehn-groessten-c02-emittenten-weltweit/>

⁵¹ <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100/>.

⁵² <https://www.maersk.com/news/2018/12/04/maersk-sets-net-zero-co2-emission-target-by-2050>.

Maßnahmen wie Mindeststandards für Treibstoffe oder Vorschriften über die Reduzierung von Fahrgeschwindigkeiten denkbar. Küstenstaaten können diese Maßnahmen an den Zugang zu ihren Häfen binden. Bei solch regional begrenzten Maßnahmen besteht jedoch die Gefahr des wirtschaftlichen Nachteils und der vergleichsweise geringen Wirkungsweise (Lange et al. 2019). Sinnvoller erscheint daher die Umsetzung von politischen Maßnahmen auf internationaler Ebene der IMO.

Auf einen Großteil der im Hafen anfallenden Emissionen haben die Häfen selbst also nur indirekt Zugriff, da die Verantwortung hier bei politischen Entscheidungsträgern und den Reedern liegt. Nichtsdestotrotz können Häfen grundsätzlich Anreize schaffen, dass Reeder umweltfreundlichere Schiffe einsetzen, indem sie günstigere Hafengebühren für diese Schiffe erheben. Ähnlich wie es bereits in einigen Häfen anhand des Environmental Ship Index (ESI)⁵³ geschieht - dieser bezieht sich jedoch vor allem auf die Verringerung von Luftschadstoffen wie NO_x und SO_x. Ein für die Reduzierung von THG-Emissionen wirksames Mittel wäre die Berücksichtigung des Energy Efficiency Design Index (EEDI). Niedersachsen-Ports (N-Ports) bietet bereits für Schiffe mit klimaschonenderem Treibstoff Vergünstigungen bei den Hafengebühren an⁵⁴. Der EEDI wurde 2013 von der IMO eingeführt und besagt, dass Schiffe, die zwischen 2015 und 2019 gebaut werden 10% effizienter als Schiffe aus den Jahren 2000-2010 sein müssen. Schiffe, welche ab 2025 gebaut werden, müssen relativ zu 2000-2010 bereits 30% effizienter sein.⁵⁵ Nach Smith et al. (2016) können so jedoch bis 2050 nur etwa 3% der kumulierten CO₂-Emissionen eingespart werden. Langfristig müssen daher innovative Antriebe und CO₂-arme bzw. CO₂-neutrale Kraftstoffe genutzt werden, um die Klimaneutralität des internationalen Seeverkehrs zu erreichen (Naya Olmer et al. 2017). Eine Allianz zwischen dem 'Global Maritime Forum'⁵⁶ und den 'Friends of Ocean action'⁵⁷ sowie dem Weltwirtschaftsforum hat im Jahr 2019 die 'Getting to Zero Coalition' gegründet, um die Entwicklung von CO₂-neutralen Seeschiffen zu fördern, so dass diese ab dem Jahr 2030 zur Verfügung stehen.⁵⁸ Die Häfen können insofern ihren Beitrag zu einer klimaneutralen Seeschifffahrt leisten, indem sie die Versorgung mit Landstrom und perspektivisch die

⁵³ <https://www.environmentalshipindex.org/Public/Home>

⁵⁴ https://www.nports.de/media/Unternehmen/Nachhaltigkeit/NPorts_Nachhaltigkeitsbericht_2019.pdf

⁵⁵ [https://www.wco.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203\(62\).pdf](https://www.wco.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203(62).pdf)

⁵⁶ <https://www.globalmaritimeforum.org/>

⁵⁷ <https://www.weforum.org/friends-of-ocean-action>

⁵⁸ <https://www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition>

Bereitstellung erforderlicher Treibstoffe ermöglichen. Eine aktuelle politische Initiative des Bund zur Förderung der Installation von Landstromanlagen sowie der Verringerung der EEG-Umlage beim Nutzen von Landstrom soll den Einsatz von Landstrom fördern.⁵⁹

Das von Pacala und Socolow (2004) entwickelte Konzept eines Portfolios an erprobten Maßnahmen des Klimaschutzes, sogenannten 'Stabilisierungskeilen', birgt das Potential zu einer wirkungsvollen Gesamtreduzierung der Treibhausgas-Emissionen. Auch für Seehäfen steht bereits ein breites Portfolio an erprobten Klimaschutzmaßnahmen bereit, um kurzfristig die THG-Emissionen zu senken. Der Fokus der Möglichkeiten liegt dabei auf (1) Verringerung des Energiebedarfs durch Steigerung der Energieeffizienz und Optimierung von Prozessen und (2) Verwendung von Erneuerbaren Energien. Die im Projekt PortKLIMA beteiligten Häfen betreiben Klimaschutz mindestens auf Grundlage von zertifizierten Umweltmanagementsystemen (DIN EN ISO 14001, EMAS oder PERS). Einige der im Projekt beteiligten Häfen haben darüber hinaus bereits konkrete Klimaschutzziele für die Zukunft festgelegt. Beispielsweise ist die Hafenmanagementgesellschaft bremenports seit 2012 CO₂-neutral, für die gesamte in ihrem Zuständigkeitsbereich liegende Hafeninfrastruktur plant sie bis zum Jahr 2024 CO₂-neutral zu sein.⁶⁰ Die HPA hat zum Ziel ihre CO₂-Emissionen bis 2020 um 40% und bis 2050 um mindestens 80% relativ zu 1990 zu senken sowie den Energieverbrauch bis 2025 um 5% zu senken.⁶¹ Dabei bleibt es jedoch bisher nicht aus, noch bestehende THG-Emissionen durch Klimazertifikate auszugleichen (vgl.^{60,61}). Nicht alle Bereiche eines Hafens können kurzfristig klimaneutral agieren. Vor allem wenn fossile Brennstoffe eingesetzt werden, erfordert eine Umstellung Zeit, finanzielle Mittel und teilweise technologischen Fortschritt, da aktuell keine wirtschaftlich vertretbaren Lösungen vorliegen. Um konkrete Klimaziele zu setzen, müssen notwendigerweise die THG-Emissionen bilanziert werden - bspw. nach dem Greenhouse Gas Protocol (GHG) oder der DIN EN ISO 14064 -, was aktuell nicht von allen im Projekt beteiligten Seehäfen praktiziert wird.

Neben dem Hafenmanagement ist der Terminalbetrieb eine weitere wichtige Stellschraube zur Reduktion der THG-Emissionen in Seehäfen. Auch hier bestehen bereits kurz- und langfristige Klimaziele von Terminalbetreibern. EUROGATE, ein Betreiber von Terminals in Bremerhaven,

⁵⁹ <https://www.ndr.de/nachrichten/schleswig-holstein/Bund-will-Landstrom-mit-140-Millionen-Euro-foerdern,landstrom208.html>

⁶⁰ <https://bremenports.de/greenports/wp-content/uploads/sites/3/2019/05/greenports-Broschuere-2019.pdf>

⁶¹ https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/191129_HPA_NHB_2017_2018_gesamtBericht_DE.pdf#297x210_HPA_NHB_2017_2018_gesamtBericht_DE.indd%3A.84348%3A624

Hamburg und Wilhelmshaven, hat sich zum Ziel gesetzt bis 2020 relativ zu 2008 pro bewegten Container den Energieverbrauch um 20% und die CO₂-Emissionen um 25% zu senken.⁶² Die Hamburger Hafen und Logistik AG (HHLA) hat das Ziel, bis spätestens 2040 klimaneutral zu sein.⁶³ Die HHLA betreibt in Hamburg Altenwerder zudem den ersten klimaneutralen Container-Terminal Deutschlands - in einigen Bereichen ist aktuell jedoch noch die Kompensation von Emissionen mit Klimazertifikaten notwendig.

Eine Übersicht von Klimaschutzmaßnahmen, welche in den am Projekt PortKLIMA beteiligten Seehäfen bereits umgesetzt werden, zeigt Tabelle 1. Eine einfache und effektive Maßnahme ist die Umstellung auf Öko-Strom und die Beziehung von Klimazertifikaten zur Kompensation von Emissionen. Die HPA konnte so beispielsweise 2016 56% der gesamten CO₂-Emissionen des Unternehmens einsparen.⁶⁴ Das Beziehen von Klimazertifikaten ist allerdings langfristig keine nachhaltige Lösung. Häfen sind aufgrund ihrer Lage und Struktur grundsätzlich gut geeignet erneuerbare Energien, vor allem Wind und Photovoltaik, selbst zu produzieren. Wird der Strom aktuell nicht gebraucht, kann er ins Netz eingespeist werden oder perspektivisch für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe bzw. Wasserstoff genutzt werden. Ein aktuelles Pilotprojekt in diesem Bereich ist das Projekt WASH₂Emden⁶⁵. Der Terminalbetreiber EUROGATE hat 2018 13,4% des Strombedarfs aus eigenerzeugten Erneuerbaren Energien gedeckt.⁶⁶ Durch die Umstellung auf Öko-Strom fallen zudem auf den Terminals für alle elektrifizierten Fahrzeuge bzw. Krananlagen keine Emissionen mehr an. Da der Container Terminal in Altenwerder bereits zum großen Teil mit elektrifizierten Geräten betrieben wird, konnten so durch die Kompensation der restlichen Emissionen, welche vor allem durch die teilweise noch mit Diesel betriebenen Fahrzeuge erzeugt werden, die Klimaneutralität des Terminals erreicht werden. Die Umstellung auf eine vollständige Elektrifizierung ist geplant bzw. in der Erprobung.⁶⁷ Zudem werden Hybrid-Loks und Leicht-Waggons im Bereich der Gleise eingesetzt, weil dort aufgrund der Kräne keine Oberleitungen angebracht werden können.

⁶² http://www1.eurogate.de/content/download/8941/101063/version/5/file/Eurogate_NHB+Update_Flyer_190809_safe.pdf

⁶³ <https://hlla.de/unternehmen/verantwortung/oekologie>

⁶⁴ https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/HPA_Nachhaltigkeitsbericht_DE_WEB_EINZEL.pdf

⁶⁵ <https://sustainableworldports.org/project/niedersachsen-ports-wash2emden-project/>

⁶⁶ http://www1.eurogate.de/content/download/8941/101063/version/5/file/Eurogate_NHB+Update_Flyer_190809_safe.pdf

⁶⁷ <https://cta-klimaneutral.de/index.html>

Tabelle 1: Recherchierte Klimaschutzmaßnahmen in am Projekt beteiligten Seehäfen sowie weitere Maßnahmen in Seehäfen weltweit (w)

Maßnahme
Monitoring der CO ₂ -Emissionen im Hafen
Umweltindex für Seeschiffe und Vorteile bei Hafengebühren für emissionsarme Schiffe
Entwicklung von Konzepten für die Bereitstellung, das Lagern und Betanken von umweltschonendem Flüssiggas als Treibstoff für die Schifffahrt.
Ausbau der Hafenbahninfrastruktur zur Förderung der Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Bahn
Optimierung Anschluss an ÖPNV für umweltfreundlichen Pendlerverkehr
Einsatz von Wasserinjektionsverfahren statt Nassbaggerei
Recycling von Nassbaggeregut
Landstromversorgung
Umrüstung auf energieeffiziente Hafenbeleuchtung
Optimierung der Beleuchtungssteuerung an Terminals
Fahrstreckenoptimierung des Verladebetriebs im Hafen
Automatisierung des Güterumschlags, energieeffizientere Prozesse
Nutzung der kinetischen Energie beim Umschlag mit Containerbrücken und Hubwagen durch Speicherkondensatoren
Umrüstung des Fuhrparks und der Terminalfahrzeuge auf E-Fahrzeuge und abgasärmere Fahrzeuge
Laden von E-Terminalfahrzeugen nur bei Spannungsspitzen im Netz
Stromanschlüsse für LKWs mit Kühlcontainern für Standzeiten
Schulung der Mitarbeiter auf ökologisches Fahren
Absorbertechniken, sowie Aspirations- und Kompressorsysteme und spezielle Behandlung der Güter bei Umschlag und Lagerung von Massengütern
Beziehen von Ökostrom
Nutzung von Solarenergie
Nutzung von Windenergie
Betreiben von Blockheizkraftwerken
Bürogebäude nach Niedrigenergiestandard
'Green IT'
Wärmeverbundnetz zwischen Industriebetrieben
Geschwindigkeitsreduzierung der einfahrenden und ausfahrenden Schiffe (w)
Waste-to-Chemicals-Anlage zur Umwandlung von Abfall in Synthesegas und dann zu sauberem Methanol für die chemische Industrie und die Transportbranche (w)
Betrieb einer energieneutralen Hafenschleuse durch Wasserturbinen und Generatoren (w)

In vielen Häfen werden hingegen noch dieselbetriebene Umschlags- und Flurfördergeräte eingesetzt. Mit diesel-elektrifizierten und hybriden Antrieben stehen bereits heute energieeffiziente Lösungen zur Verfügung, welche jedoch immer noch Emissionen verursachen. Insbesondere vollständig elektrifizierte, batteriebetriebene Umschlags- und Flurfördergeräte unterliegen aktuell noch einer starken technologischen Entwicklung. Mit Blick auf die durchschnittlichen Lebensdauern von Umschlags- und Flurfördergeräten wird, ersichtlich, dass die Geräte mit Lebensdauern von maximal 10-20 Jahren, nach und nach ausgetauscht werden können. Die Hersteller erwarten, dass in der unmittelbaren Zukunft der

Umschlag in entwickelten Märkten vollständig elektrifiziert erfolgen wird. Hierfür sind jedoch umfassende Investitionen in die Stromversorgung notwendig.⁶⁸

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung des Energieträgers Wasserstoff. Die Verwendung von Wasserstoff hat den Vorteil unabhängiger von Batterieleistung bzw. Batteriekapazität oder Ladezeit zu sein. Ein Nachteil stellt jedoch der schlechte Wirkungsgrad dar. Der Einsatz von Wasserstoff wird in Pilotstudien in Valencia⁶⁹ sowie den Häfen Los Angeles und Long Beach⁷⁰ getestet. Im Konzept des Hafens Rotterdam zur Erreichung des CO₂-neutralen Hafens im Jahr 2050 ist die Nutzung von Wasserstoff fest vorgesehen⁷¹. Um einen klimaneutralen Treibstoff zu gewinnen, müssen für die Erzeugung jedoch ausreichend Erneuerbare Energien zu Verfügung stehen.

Die Motoren der hafeneigenen Schiffsflotte, wie beispielsweise Schlepper, müssen perspektivisch ebenfalls auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden. Die Umstellung auf alternative Antriebe erfordert neben den Investitionen in die Geräte, den Aufbau der zugehörigen Versorgungsinfrastruktur. Alle klimaneutralen Antriebe unterliegen darüber hinaus der Herausforderung, dass sie wirtschaftlichen und operativen Ansprüchen genügen müssen. Förderprogramme können bei der Entwicklung von Technologien und der Durchführung erforderlicher Investitionen unterstützend wirken. Zudem kann die CO₂-Bepreisung dazu beitragen, dass heute noch unwirtschaftliche Antriebstechniken zukünftig wirtschaftlich werden. Aus gutem Grund fordert der Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e.V. in seinem Positionspapier zum 'Umwelt- und Klimaschutz in deutschen Seehäfen' ein Förderprogramm für energieeffiziente, schwere Nutzfahrzeuge sowie die Förderung der Elektromobilität im Hafenumschlag und Hafentransport (ZDS 2017).

Tabelle 2: Wirtschaftliche Lebensdauer von Umschlagsgeräten

Gerät	Durchschnittliche wirtschaftliche Lebensdauer (Jahre)
Containerbrücke	20 ²
Mobilkran	15 ²
Portalhubwagen	6 ¹ ; 5-10 ²
Reach Stacker	10 ²
¹ Wenzel und Treptow (2013); ² Thoresen (2010)	

⁶⁸ https://www.kalmarglobal.com/48e087/globalassets/newsroom/kalmar_whitepaper_reducing-air-emissions-in-a-container-terminal_web.pdf

⁶⁹ <https://sustainableworldports.org/project/port-of-valencia-h2ports/>

⁷⁰ <https://www.portoflosangeles.org/environment/air-quality/zero-emissions-technologies>

⁷¹ <https://www.portofrotterdam.com/en/doing-business/port-of-the-future/energy-transition/carbon-neutral>

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Bedeutung des Themas Klimaschutz von Seiten der Hafenmanagementgesellschaften deutlich erfasst wurde und teilweise bereits konkrete Konzepte erstellt und Maßnahmen umgesetzt wurden. Es ist anzumerken, dass nicht alle Hafenmanagementgesellschaften konkrete Ziele formuliert haben und Klimaschutz derzeit auf Grundlage von Umweltmanagement bzw. Energieaudits vollziehen. Die erforderlichen personellen und finanziellen Ressourcen sind neben technologischen bzw. operativen Anforderungen die beschränkenden Faktoren bei der Implementierung von Maßnahmen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Managementgesellschaften, welche sich konkrete Klimaziele gesetzt haben, diese auch erreichen können. Zu der diesbezüglichen Situation bei Terminalbetreibern und anderen Dritten kann auf Basis der Recherchen keine zusammenfassende Aussage getroffen werden.

3 Anpassung von Seehäfen an den Klimawandel

3.1 PIANC-Leitfaden: ‘Anpassung an den Klimawandel – Planung für Häfen und Wasserstraßen’

Die internationale Arbeitsgruppe EnviCom WG178 der World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC), ein weltweit tätiger Verband mit dem Ziel der technisch-wissenschaftlichen Zusammenarbeit im Bereich der Binnen- und Seewasserstraßen, der Binnen- und Seehäfen sowie des Küstenschutzes und der Meerestechnik⁷², hat im Jahr 2020 den Leitfaden ‘Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways’ veröffentlicht (PIANC 2020)⁷³.

Der Leitfaden beinhaltet in einem vierstufigen Prozess Empfehlungen für ein mögliches Vorgehen zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Häfen und Wasserstraßen, wobei die jeweils relevanten Interessengruppen mit eingebunden werden (Abbildung 15). Der PIANC-Leitfaden ‘Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways’ ist in seiner Gänze auf deutsche Seehäfen anwendbar und kann als Leitfaden bei der Erstellung eines Anpassungsmaßnahmenplans an die Folgen des Klimawandels angewendet werden.



Abbildung 15: Die 4 Stufen des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

In Stufe 1 werden mögliche vom Klimawandel betroffene kritische Anlagen, hafengebundene Tätigkeiten und Systeme und Abhängigkeiten identifiziert, deren Gefährdung aufgezeigt und

⁷² <https://pianc.baw.de/>

⁷³ <https://www.pianc.org/publications/envicom/wg178>

relevante Akteure bestimmt, um anschließend Anpassungsziele festzulegen. Darauf folgend wird in Stufe 2 ermittelt, welche historischen und zukünftigen Klimainformationen zur Einschätzung der potentiellen Betroffenheit benötigt werden und entsprechende Daten zusammengestellt. Dabei kann es notwendig sein, vorliegende Daten zu analysieren oder benötigte Daten zu erheben. Basierend auf den Ergebnissen der ersten beiden Stufen wird in Stufe 3 die Verwundbarkeit der kritischen Anlagen, Tätigkeiten und Systeme gegenüber Auswirkungen des Klimawandels ermittelt und gegebenenfalls eine Bewertung des Risikos durchgeführt. In Stufe 4 werden Anpassungsmaßnahmen anhand eines Portfolios ausgewählt und Möglichkeiten für deren Bewertung und Umsetzung mithilfe eines adaptiven Hafenmanagements vorgestellt.

3.1.1 Stufe 1: Problemstellung und Zielsetzung

In Stufe 1 werden vorbereitende Schritte unternommen, welche relevant sind um zu verstehen welche Anlagen, Vorgänge und Systeme von den Folgen des Klimawandels betroffen sein können, Abhängigkeiten zu identifizieren und relevante Akteure in die Entwicklung einer Anpassungsstrategie einzubeziehen. Dieses Verständnis ermöglicht es, Ziele zur Anpassung an den Klimawandel zu vereinbaren. Das Vorgehen in der ersten Stufe gliedert sich dabei in die in Abbildung 16 dargelegten Schritte.



Abbildung 16: Stufe 1 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Die Festlegung der übergeordneten Ziele in Schritt 1.1 definiert das gewünschte Ergebnis des Planungsprozesses. Ein gutes Beispiel ist Rotterdam, dessen Hauptziel es war, bei der Entwicklung einer Anpassungsstrategie u.a. den Hafen bis 2025 vollständig resilient gegen die Auswirkungen des Klimawandels zu machen und sicherzustellen, dass Rotterdam eine der

sichersten Hafenstädte der Welt bleibt (Rotterdam Office for Sustainability and Climate Change 2013). Zielsetzung ist ein iterativer Prozess, so dass die ursprünglichen Ziele im Laufe des Planungsprozesses laufend überprüft und eventuell überarbeitet werden müssen.

Eine Bestandsaufnahme⁷⁴ von Anlagen, Tätigkeiten und Systemen sowie Abhängigkeiten (Schritt 1.2) trägt dazu bei, Verständnis für Fragen der Klimawandelanpassung zu entwickeln und Eigenverantwortung der Akteure aufzuzeigen. Relevant können sein:

- Anlagen wie Wellenbrecher, Buhnen, Kaianlagen, Liegeplätze, Schleusen
- Anlagen an Land und im Hinterland wie Terminals, Lagerflächen, Bürogebäude
- Tätigkeiten wie Unterhaltungsbaggerungen, Lotsendienste, Güterumschlag
- Systeme wie Verkehrszentralen (Vessel Traffic Services), Terminal Operating Systems
- Abhängigkeiten von Straßen-, Schienen- oder anderen Verkehrsinfrastrukturen, Energie- und Wasserversorgung, Abwasserentsorgung sowie Lieferketten

Anschließend erfolgt in Schritt 1.2 die Bewertung, ob eine Anlage etc. als kritisch einzustufen ist. Kritisch bezieht sich hierbei nicht nur auf Fragestellungen der Klimawandelanpassung, sondern auf die überhaupt große Bedeutung der Anlagen etc. für beispielsweise die Funktionalität des Hafens, Sicherheit und Gesundheit, regionale/ nationale Wirtschaft, oder bei deren Ausfall mit unannehmbaren sozialen, sozioökonomischen oder ökologischen Auswirkungen zu rechnen wäre. Falls im Unternehmen noch keine eigenen Bewertungsmethoden vorliegen, kann eine einfache Expertenschätzung erfolgen, oder es ist eine Orientierung an dem qualitativen Schema in Tabelle 3 möglich. Es wird empfohlen, Protokoll darüber zu führen, wie und durch wen die jeweilige Einschätzung erfolgte. Grundsätzlich können Umfang und Art der Analyse sowie Definition der geplanten Ziele an verfügbare Ressourcen angepasst werden.

⁷⁴ Eine Vorlage für eine solche Bestandsaufnahme steht im Anhang des PIANC-Leitfadens zur Verfügung: <https://www.pianc.org/uploads/publications/WG-178/Annex-1A-%E2%80%93-Template-Inventory.xlsx>

Tabelle 3: Beispielhaftes Bewertungsschema von Anlage etc. (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Auswirkung für: Skala der Auswirkung:	Sicherheit	Ökonomie	Umweltverträglichkeit	Kritisch?
Katastrophal	Risiko einer großen Anzahl von schwer Verletzten o. Verlust von Menschenleben	Risiko für die langfristige Rentabilität des Unternehmens, einschließlich des Liefer- oder Vertriebsweges	Nicht wieder gut zu machender Schaden; nachgewiesener Verstoß; Aussicht auf eine Unternehmensstrafe	Ja
Bedeutend	Risiko von vereinzelt Fällen von schwer Verletzten o. Verlust von Menschenleben	Erhebliche Auswirkungen auf das Geschäft, die erhebliche Abhilfemaßnahmen erfordern	Schwere/ anhaltende Verluste; erheblicher Verwaltungsaufwand zur Bewältigung des Compliance-Versagens erforderlich	Wahrscheinlich
Mäßig	Risiko einer geringen Anzahl von Verletzten	Managementmaßnahmen zum Schutz der Unternehmenskontinuität notwendig	Geringfügige, reversible Schäden; Handlungsbedarf in Fragen der Compliance	Unwahrscheinlich
Geringfügig oder unbedeutend	Risiko von Beinaheunfällen oder leicht Verletzten	Vereinzelte Schwierigkeiten (z. B. in der Lieferkette, aber es gibt Ersatz oder Alternativen)	Geringfügige Schäden; kleinere Verstöße, leicht behebbar	Nein

In Schritt 1.3 wird eine vorläufige Bewertung der Anfälligkeit (Gefährdung) der in der Bestandsaufnahme ermittelten kritischen Anlagen etc. gegenüber den Folgen des Klimawandels vorgenommen. Die Anfälligkeit einer kritischen Anlage etc. hängt von ihrer Exposition gegenüber einem Risiko (Kombination aus Wahrscheinlichkeit und Gefahr) ab. Probleme können bereits heute auftreten, zukünftig durch den Klimawandel verstärkt werden oder neu hinzukommen. Die Anlagen etc. können dabei beispielsweise den folgenden Einflüssen unterliegen:

- Überschwemmungen durch überlastete Entwässerungssysteme oder hohe Grundwasserstände
- Überschwemmungen durch hohe Fluss-, Tidehoch- oder Sturmflutwasserstände

-
- Hohe Fließgeschwindigkeiten in der Fahrrinne oder Veränderungen des Seegangs (extreme Wellen, Wellenunruhe)
 - Niedrige Flusswasserstände, Dürre oder verminderte Wasserversorgung
 - Veränderungen in der Bathymetrie oder im Sedimenttransport
 - Nebel oder andere Sichteinschränkungen, z. B. durch Schneesturm oder Sandstürme
 - Änderungen der Windgeschwindigkeit/ Stärke, Richtung oder Dauer des Windes
 - Extreme Kälte, Eis oder Vereisung
 - Extreme Hitze oder Feuchtigkeit (Größe, Dauer oder Häufigkeit)
 - Veränderungen in der Wasserchemie (Säuregehalt, Salzgehalt)
 - Veränderungen in der Biologie (Wachstumsraten, invasive Arten, Artenmigration)

Es ist wichtig bereits frühzeitig relevante interne und externe Akteure zu identifizieren und diese in den Klimaanpassungs-Planungsprozess mit einzubeziehen (Schritt 1.4). Diese können über relevantes Expertenwissen verfügen und für die Identifizierung von Klimarisiken sowie die Planung bzw. Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen von Bedeutung sein.

In Schritt 1.5 werden zunächst Randbedingungen und mögliche Beschränkungen (Eigentumsverhältnisse, finanzielle, ökologische, politische Hindernisse etc.) identifiziert und der Planungshorizont für den Klimaanpassungs-Planungsprozess festgelegt. Der Planungshorizont sollte in Abhängigkeit der Lebensdauer von Anlagen bzw. Investitionsentscheidungen festgelegt werden. Die Festlegung des Planungshorizonts beeinflusst die im späteren Verlauf benötigten zukünftigen Klimainformationen. Es wird empfohlen, sich auf einen Planungshorizont von < 10 Jahre, > 10 Jahre und < 30 Jahre oder ≥ 30 Jahre zu beziehen (vgl. Kapitel 3.1.2, Schritt 2.3). Anschließend werden praktikable Anpassungsziele für die Diskussion und Abstimmung mit den relevanten Akteuren erarbeitet. Diese Ziele müssen realistisch sein in Bezug auf die ermittelten Randbedingungen, Beschränkungen, Möglichkeiten und dem vereinbarten Planungshorizont und sollten sich direkt auf die identifizierten kritischen Anlagen etc. beziehen.

Eine effektive und effiziente Anpassung an den Klimawandel hängt von zugänglichen, geeigneten und zweckmäßigen Daten ab. Dabei ist lokales Wissen von unschätzbarem Wert. Die Datenerfassung und genaue Protokollierung spielt eine entscheidende Rolle sowohl beim Verständnis lokal relevanter Trends und damit beim Verständnis über den Zeitpunkt eines Handlungsbedarfs als auch bei der Dokumentation der Häufigkeit und Folgen von

Extremereignissen. Ein wichtiger früher Schritt ist daher die Erfassung, Speicherung und Verwaltung relevanter lokaler Daten (Schritt 1.6).

3.1.2 Stufe 2: Klimainformationen

In Stufe 2 werden auf Basis der in Stufe 1 gesetzten Ziele und in Abhängigkeit der ermittelten kritischen Anlagen etc. relevante Klimaparameter und –prozesse und deren zukünftige Änderung identifiziert. Die einzelnen Schritte der Stufe 2 sind in Abbildung 17 dargestellt.

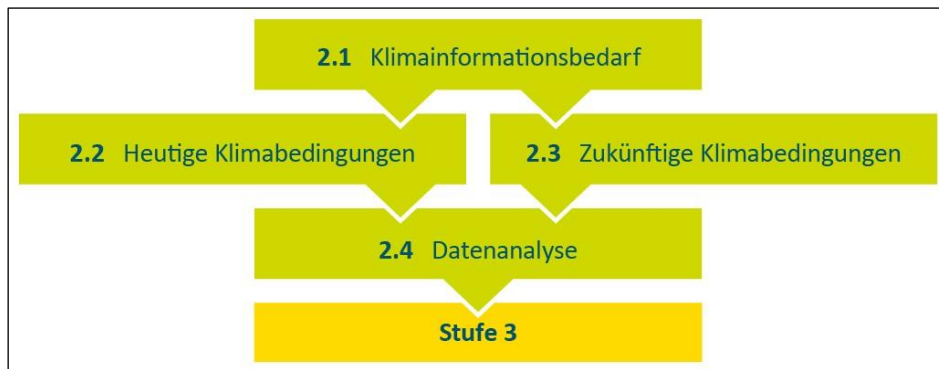


Abbildung 17: Stufe 2 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

In Schritt 2.1 ist die Entscheidung zu fällen, welche Klimadaten benötigt werden und welcher Detailgrad und welche Komplexität erforderlich sind. Dabei ist sicher zu stellen, dass relevante Akteure in den Entscheidungsprozess eingebunden werden. Ein beispielhaftes Ergebnis einer solchen Entscheidung zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Relevante Klimaparameter und -prozesse für Port Botany und Port Kembla, Australien (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Kritische Anlage etc.	Klimaparameter oder -prozess	Potentielle Auswirkungen
Straßen	Lufttemperatur, Niederschlag	Schädigung der Fahrbahn
Gebäude	Niederschlag	Überflutung
Elektrische Energiesysteme	Lufttemperatur	Schädigung
Kommunikationsinfrastruktur	Lufttemperatur	Schädigung
Marine Infrastruktur	Mittlerer Meeresspiegel, Tide, Sturmflut, Seegang	Schädigung durch Überflutung
Liegeplätze	Wind, Seegang	Betriebsausfallzeiten
Hafenkrane	Wind	Betriebsausfallzeiten
Container-Lagerflächen	Wind	Beschädigung der Container

Die Grundlage der Anpassungsstrategie bilden das Verständnis und die Quantifizierung aktueller klimatischer Bedingungen, deren Zusammenstellung in Schritt 2.2 erfolgt. Die Auswertung aktueller bzw. historischer Daten ermöglicht die Einschätzung, ob bereits Muster

oder Trends bestehen, welche mit dem Klimawandel zusammenhängen können und ob sich diese bereits auf kritische Anlagen etc. auswirken. Der Vergleich historischer Werte mit in Schritt 2.3 zu ermittelnden prognostizierten Trends ermöglicht Entscheidungen über geeignete Anpassungspfade zu treffen und Investitionen in Anpassungsmaßnahmen zu planen. Zudem geht es darum zu erkennen, wann ein bestimmter Schwellenwert wahrscheinlich überschritten wird, was wiederum in die strategische Planung der Anpassungsmaßnahmen einfließt. Das Verständnis der Charakteristika historischer Extremereignisse bietet dabei einen weiteren Anhaltspunkt für die Planung von Anpassungsmaßnahmen. Die benötigten Daten können entweder bereits vorliegen oder von verschiedenen regionalen, nationalen oder auch internationalen Quellen, wie Behörden, wissenschaftlichen Organisationen, Wetterdiensten etc., zur Verfügung gestellt werden. Wie bereits in Schritt 1.6 erwähnt kann es vor allem bei ungenügender Datenverfügbarkeit sinnvoll sein, eigene Systeme zur Datenerfassung und –verwaltung zu installieren.

In Schritt 2.3, der Sammlung relevanter zukünftiger Klimainformationen, können bei Planungshorizonten < 10 Jahre relevante Klimainformationen aus dem Trend historischer Daten gewonnen werden. Bei Planungshorizonten > 10 Jahre sollten diese jedoch aus anhand von Klimamodellen ermittelten Klimaprojektionen gewonnen werden, da diese die zukünftigen Änderungen des Klimas besser abbilden können. Die aktuellen RCP-Szenarien zeigen bis zum Jahr 2050 eine relativ geringe Abweichung zueinander. Daher besteht die Empfehlung, bei Planungshorizonten > 10 Jahre und < 30 Jahre die RCP-Szenarien der Einfachheit halber als ein gemeinsames Szenario zu betrachten. Bei Planungshorizonten ≥ 30 Jahre ist es jedoch angeraten, die jeweiligen RCP-Szenarien einzeln zu betrachten.

Wurden Rohdaten gewonnen, müssen diese einer entsprechenden Analyse unterzogen werden (vgl. Tabelle 5), um Änderungen relevanter historischer und zukünftiger Klimaparameter und -prozesse zu identifizieren und zu verstehen (Schritt 2.4). Mindestens sollte anhand eines Expertenurteils festgestellt werden, ob ein Klimaparameter oder -prozess über den Zeitraum, für den Daten bzw. Prognosen vorliegen, zunimmt, gleich bleibt oder abnimmt. Dabei ist es wichtig, die Verlässlichkeit der Daten und ihre Grenzen der Auswertung zu kennen. Grenzen können aus Unsicherheiten, Problemen mit der räumlichen oder zeitlichen Auflösung, Datenlücken oder fehlerhaften Datensätzen herrühren. Außerdem ist es wichtig genau zu wissen, welche Daten gemessen bzw. projiziert wurden.

Tabelle 5: Überblick über die Methoden der Datenanalyse (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Ansatz	Relative Komplexität	Methoden der Datenanalyse	Typische Analyse-Ergebnisse
Expertenurteil	Sehr niedrig	Anhand des Expertenurteils wird festgestellt, ob ein Parameter oder Prozess über den Zeithorizont zunimmt, gleich bleibt oder abnimmt. Es ist eine begrenzte Analyse erforderlich.	Skala o Symbole, die für jeden Parameter entweder angeben: Erhöhung ↑, keine Änderung - oder Verringerung ↓.
Indikatorbasiert	Niedrig	Es wird eine qualitative Bewertung vorgenommen, um festzustellen, ob ein Parameter oder Prozess auf der Grundlage grob aufgelöster Informationen zu- oder abnimmt. Ein Globales Klimamodell kann verwendet werden, um die Information über Ausgangsdaten/ zukünftigen Bedingungen zu liefern, aber es wird keine formale Analyse durchgeführt, um die Ergebnisse auf eine feinere Auflösung herunterzukalieren.	Skala o. Symbole, die auf Veränderungen hinweisen, mit einigen Informationen zur Größenordnung und Zeitachse, z. B. ++, +, 0, -, --.
Formelbasiert	Medium	Empirische Formeln werden verwendet, um Änderungen des Parameters oder Prozesses abzuschätzen. Jede Berechnung ist in der Regel räumlich und zeitlich statisch, so dass eine Reihe von Berechnungen erforderlich sein können, um festzustellen, wie sich ein Parameter in Zeit oder Raum geändert hat oder voraussichtlich ändern wird. Beispielsweise können Überlaufformeln aus EurOtop (2018) verwendet werden, um Überschreitungen abzuschätzen.	Für jeden Parameter wird für Schlüsselzeiträume ein Wert berechnet.
Prozessbasierte Modellierung	Hoch	Numerische Modelle werden erstellt, um den physikalischen Prozess mit einer feinen Auflösung sowohl in Raum und Zeit zu modellieren. Die Randbedingungen werden oft durch globale oder regionale Modelle bestimmt; diese können eine Skalierung (downscaling) erfordern. Verschiedene kommerzielle Modelle sind verfügbar, z. B. unter Verwendung von hydrodynamischen, Wellen- oder Sedimenttransportdaten.	Räumlich und zeitlich variierende Werte für jeden Parameter.

3.1.3 Stufe 3: Verwundbarkeiten und Risiken

In der 3. Stufe 'Verwundbarkeiten und Risiken' werden die Erkenntnisse aus den ersten beiden Stufen miteinander verknüpft, um mögliche Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel

zu identifizieren und zu bewerten. Die einzelnen Schritte der 3. Stufe sind in Abbildung 18 dargestellt.

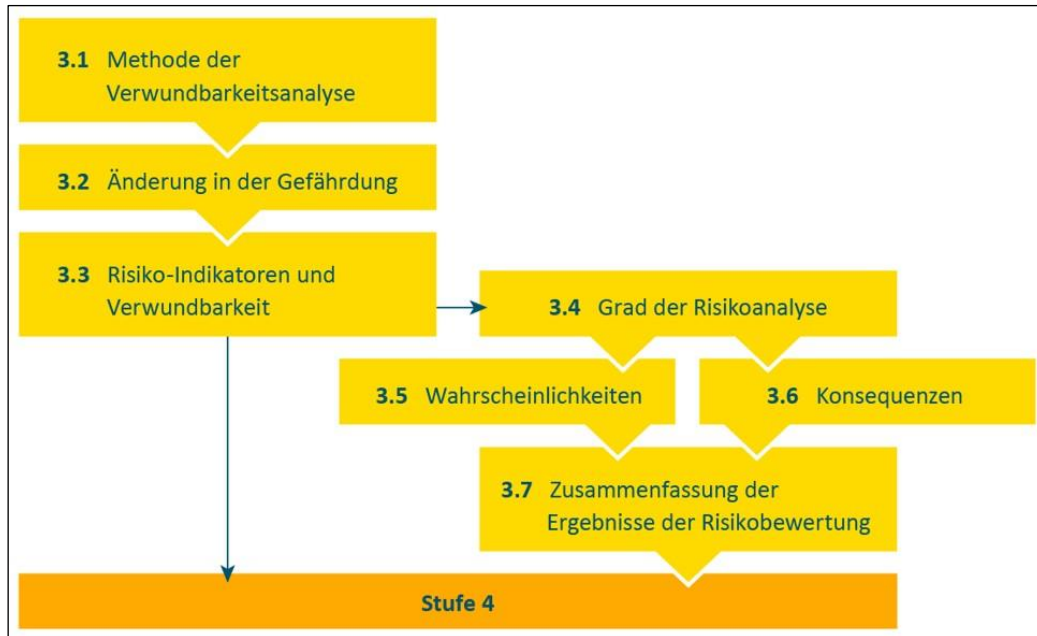


Abbildung 18: Stufe 3 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Anhand der Schritte 3.1 bis 3.3 wird beschrieben wie Klimagefahren, d.h. projizierte Änderungen relevanter Klimaparameter oder –prozesse, die das Potenzial haben einen Schwellenwert zu überschreiten oder anderweitig Schäden oder Störungen oder ähnliche negative Auswirkungen zu verursachen, identifiziert, quantifiziert und mit der heutigen Situation verglichen werden können, um zukünftige Veränderungen in der Verwundbarkeit kritischer Anlagen etc. hervorzuheben. Die Verwundbarkeitsanalyse (Schritte 3.1 – 3.3) kann eine alleinstehende Aufgabe sein oder dazu dienen, den Umfang einer gezielteren Risikoanalyse (Schritte 3.4 – 3.7) zu bestimmen. Innerhalb der Klimawandel-Risikoanalyse wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Klimagefahren sowie Art und relative Akzeptanz der damit verbundenen Folgen (Auswirkungen) beurteilt.

Bei der Verwundbarkeitsanalyse gilt es grundsätzlich festzustellen, ob die Änderung eines relevanten Klimaparameters oder –prozesses Auswirkungen auf die Funktionalität der kritischen Anlagen etc. hat. Können vorhandene Anpassungskapazitäten genutzt werden, kommt es gegebenenfalls zu keiner Änderung der Verwundbarkeit. Die Abfolge einer Verwundbarkeitsanalyse ist in Abbildung 19 dargestellt.

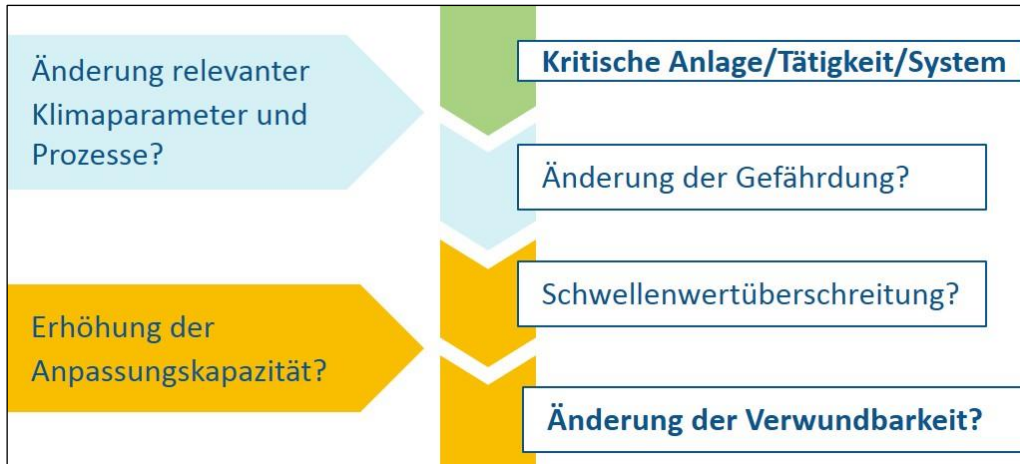


Abbildung 19: Abfolge einer Verwundbarkeitsanalyse (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, wie eine Verwundbarkeitsanalyse auf Basis der in Stufe 2 gewonnenen Klimainformationen durchgeführt werden kann, die auf den folgenden allgemeinen Komplexitätsstufen basieren:

- Verwendung von internem Wissen bzw. Expertenurteilen (Komplexitätsniveau: Sehr gering, Datenbedarf: Sehr gering, Ressourcenbedarf: Sehr gering, Restunsicherheit: Hoch)
- Verwendung der Ergebnisse der Stufe 2 als Indikatoren (Komplexitätsniveau: Gering, Datenbedarf: Gering, Ressourcenbedarf: Gering, Restunsicherheit: Mittel - Hoch)
- Anwendung von Klimaparametern und -prozessen in einer quantitativen ingenieurwissenschaftlichen Bewertung, z. B. deterministische oder probabilistische Analyse (Komplexitätsniveau: Mittel, Datenbedarf: Mittel, Ressourcenbedarf: Mittel, Restunsicherheit: Mittel)
- Prozessbasierte Modellierung der projizierten Auswirkungen des Klimawandels auf relevante Klimaparameter und -prozesse, gegebenenfalls im Rahmen standortspezifischer Analysen mit hochauflösenden numerischen Modellen oder möglicherweise physikalischen Modellen (Komplexitätsniveau: Hoch, Datenbedarf: Hoch, Ressourcenbedarf: Hoch, Restunsicherheit: Mittel - Niedrig)

Im Rahmen des Schrittes 3.1 ist eine entsprechend den vorhandenen Daten, Ressourcen und Anpassungszielen passende Komplexitätsstufe zu wählen.

Die Auswirkungen der in Stufe 2 ermittelten Änderungen relevanter Klimaparameter und –prozesse auf die Gefährdung kritischer Anlagen ist in Schritt 3.2 mindestens nach dem Schema in Abbildung 20 zu beurteilen. In Abhängigkeit des gewählten Planungshorizontes hat

die Beurteilung gegebenenfalls für eine bestimmte Bandbreite an zukünftigen Änderungen zu erfolgen. In jedem Fall sollte ein unwahrscheinliches, aber plausibles extremes Klimaszenario in der Verwundbarkeitsanalyse berücksichtigt werden.

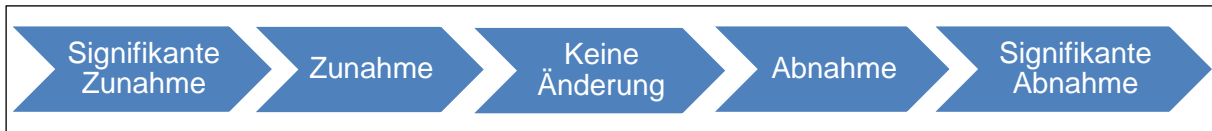


Abbildung 20: Bewertungsschema - Änderung der Gefährdung (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

In Schritt 3.3 ist zu untersuchen, ob es durch den Klimawandel zu einer Zunahme der Gefährdung kritischer Anlagen etc. kommt und dies zu einer Zunahme der Verwundbarkeit der Anlagen etc. führt. Das ist z. B. der Fall, wenn kritische Schwellenwerte, deren Erreichen zu betrieblichen Einschränkungen oder finanziellen Schäden führen, durch den Einfluss des Klimawandels zukünftig überhaupt oder häufiger erreicht werden. Daher ist es notwendig, kritische Schwellenwerte ggf. zunächst zu definieren und diese zusammenzutragen. Die Definition eines akzeptablen Restrisikos, d.h. beim Überschreiten welcher Schwellenwerte auftretende Ausfallzeiten oder Schäden in Kauf genommen werden, ist in der Diskussion um die kritischen Schwellenwerte zu berücksichtigen. Falls kritische Anlagen etc. über vorhandene Anpassungskapazitäten, wie Ausbaureserven von Hochwasserschutzanlagen, oder Redundanzen verfügen, können diese im Rahmen der Verwundbarkeitsanalyse berücksichtigt werden. Daten beispielsweise über Instandhaltungskosten, Häufigkeit und Ursache betrieblicher Ausfallzeiten, Kosten und Auswirkungen von Extremereignissen können helfen, eine eventuell bereits vorhandene Änderung der Verwundbarkeit abzuschätzen und die Planung von Anpassungsmaßnahmen unterstützen. Bei vorhandenen Trends in den Daten ist die Ursache sorgfältig zu prüfen, um sicherzustellen, dass die Änderungen dem Klimawandel zugeordnet werden können. Tabelle 6 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Verwundbarkeitsanalyse für einen Seehafen. Es ist notwendig und sinnvoll, die Ergebnisse der Verwundbarkeitsanalyse zu priorisieren, um sicherzustellen, dass sich die nächsten Schritte auf die wichtigsten potentiellen Auswirkungen konzentrieren.

In Fällen, in denen der Planungshorizont relativ kurz, das Vertrauensniveau hoch oder die Anpassungsinitiative breit angelegt ist, kann die Verwundbarkeitsanalyse ausreichend Informationen über potentielle Auswirkungen liefern, um direkt zur Ermittlung potentieller Anpassungsmaßnahmen überzugehen (Stufe 4). Andernfalls ist auf Basis der Verwundbarkeitsanalyse eine detaillierte Risikoanalyse durchzuführen (Schritte 3.4 – 3.7).

Tabelle 6: Exemplarisches Ergebnis einer Verwundbarkeitsanalyse (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Beispiel-Hafen Bewertung der Klimawandel- Verwundbarkeit Szenario 1 von 3	Im Vergleich zu historischen Daten, <u>wie verändert sich die</u> <u>Gefährdung</u> aufgrund der potentiellen Klimagefahren innerhalb des Planungshorizonts					Unter Berücksichtigung relevanter Schwellenwerte und vorhandener Anpassungskapazitäten, <u>wie</u> <u>verändert sich wahrscheinlich die</u> <u>Verwundbarkeit?</u>				
	Extreme Hitze	Meresspiegelanstieg	Windgeschwindigkeit	Seegang	Saisonaler Niederschlag	Extreme Hitze	Meresspiegelanstieg	Windgeschwindigkeit	Seegang	Saisonaler Niederschlag
Beispiele relevanter Klimaparameter und -prozesse → Beispiele kritischer Anlagen, Tätigkeiten, Systeme ↓										
Anlegen, Be- und Entladen	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑→	→	→	→	↑
Zufahrt zum Liegeplatz (z. B. Fahrrinne)	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	→	↓	→	→	↑
Maritime Strukturen	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	→	↑	→	→	→
Kai-Equipment (z. B. Krane, Schiffsbelader)	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑	→	→	→	↑
LKWs/ Terminalfahrzeuge	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑	→	→	→	↑
Bauwerke an Land	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	→	→	→	→	→
Lagerflächen	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑	→	→	→	↑
Ausrüstung an Land (z. B. Hafenmobilkrane, Schaufelradbagger, Förderbänder)	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑	→	→	→	↑
Elektrische Energiesysteme	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	→	→	→	→	→
Entwässerungssysteme	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	→	→	→	→	↑↑↑
Kraftstoffsysteme	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑	→	→	→	→
Straßen-/ Schienenzugang und internes Netz	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑	→	→	→	↑
Einrichtungen für Mitarbeiter	↑↑↑	↑	→	→	↑↑↑	↑↑↑	→	→	→	→

Im Rahmen der Risikoanalyse wird die Wahrscheinlichkeit, dass die Klimagefahren, d.h. Änderungen von Klimaparametern oder –prozessen, die das Potential haben, Schäden, Störungen oder andere negative Auswirkungen zu verursachen, eintreten sowie das Ausmaß und die Schwere der Folgen, falls diese auftreten, analysiert. In Schritt 3.4 sind zunächst Methode und Detailgrad der Risikoanalyse festzulegen. Dabei kann auf bestehende Methoden und Empfehlungen anderer Bereiche zurückgegriffen werden. Es sollte jedoch eine klimawandelspezifische Risikobetrachtung unter Berücksichtigung verschiedener Klimaszenarien erfolgen. Falls keine relevanten Richtlinien, Empfehlungen oder vorhandene Methoden im Unternehmen bestehen, kann sich auf öffentliche, klimawandelspezifische Risikoanalysemethoden anderer Bereiche und Organisationen bezogen werden (z. B. EC Directorate-General Climate Action (2011), Standards Australia (AS 5334-2013), Hoagland-Grey (2015), West und Brereton (2013), Committee on Climate Change (2017)). Die Internationale Organisation für Normung hat kürzlich einen entsprechenden Standard zur Anpassung an den Klimawandel mit dem Untertitel: Gefährdung, Auswirkungen, Risikobeurteilung (ISO 14091) veröffentlicht. Im PIANC-Leitfaden wird eine einfache klimawandelspezifische Prozedur für eine Risikoanalyse vorgestellt, an der sich bei Bedarf bzw. bei geringen verfügbaren Ressourcen orientiert werden kann. Wie bei anderen Schritten, sollte bei der Entscheidung über das am besten geeignete Ausmaß der Risikoanalyse die Quantität und Qualität der verfügbaren Daten, die erforderlichen Ressourcen und Fachkenntnisse sowie die gewünschten Ergebnisse berücksichtigt werden.

Den in Stufe 2 gewonnen Klimainformationen liegen verschiedene Unsicherheiten zugrunde. Eine große Unsicherheitsquelle ist dabei die zukünftige Entwicklung der Treibhausgase. Es ist also nicht möglich, sicher zu sein, dass ein bestimmtes Klimawandelszenario realisiert wird. Daher wird im Schritt 3.5 die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Klimagefahr eintritt, bewertet. Die Bewertung kann dabei im einfachsten Fall z. B. nach dem folgenden Schema erfolgen: Sehr wahrscheinlich, wahrscheinlich, möglich, unwahrscheinlich, sehr unwahrscheinlich.

Die Klimagefahren können sich in vielfältiger Weise auf Häfen auswirken. Beispielsweise können physische Schäden oder operationelle, unternehmerische als auch ökologische Folgen auftreten. In Schritt 3.6 geht es darum, die potentiellen Folgen der Klimagefahren abzuschätzen, indem ihre Auswirkungen im einfachsten Fall z. B. nach dem folgenden Schema kategorisiert werden: Katastrophal, bedeutend, mäßig, gering, unbedeutend. Werden die einzelnen Kategorien mit einer Zahlenskala (1-5) bewertet und Wahrscheinlichkeit und

Auswirkung miteinander kombiniert, erhält man eine Risikomatrix (Tabelle 7), aus der sich der Grad des Risikos direkt ablesen lässt und notwendige Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden können.

Tabelle 7: Risikomatrix (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Wahrscheinlichkeit \ Auswirkung	Selten (1)	Unwahrscheinlich (2)	Möglich (3)	Wahrscheinlich (4)	Sehr wahrscheinlich (5)
Katastrophal (5)	5	10	15	20	25
Bedeutend (4)	4	8	12	16	20
Mäßig (3)	3	6	9	12	15
Gering (2)	2	4	6	8	10
Unbedeutend (1)	1	2	3	4	5

Legende:

Risiko	Erforderliche Anpassungsmaßnahmen
Extremes Risiko	Sofortige Anpassungsmaßnahmen erforderlich
Großes Risiko	Anpassungsmaßnahmen mit hoher Priorität erforderlich
Moderates Risiko	Anpassungsmaßnahmen über Tagesgeschäft implementieren
Geringes Risiko	Risiko über routinemäßige interne Verfahren steuern und überwachen

Der Prozess der Risikoanalyse ist zu dokumentieren (Schritt 3.7), dabei sind verwendete Methoden und Werkzeuge sowie Unsicherheiten und mangelndes Vertrauen bzgl. der Datengrundlage festzuhalten. Die Ergebnisse sind anschließend an relevante Akteure zu kommunizieren.

Die Ergebnisse der Analyse werden in Stufe 4 genutzt, um den Anpassungsbedarf zu priorisieren und die Entwicklung von Strategien zur Festlegung von Anpassungsmaßnahmen zu unterstützen.

3.1.4 Stufe 4: Anpassungsoptionen

Stufe 4 enthält eine Reihe von Schritten zur Identifizierung, Überprüfung und gegebenenfalls Bewertung möglicher Anpassungsoptionen zur Bewältigung der in Stufe 3 identifizierten Risiken (Abbildung 21). Diese Schritte münden in der Entwicklung von Anpassungspfaden.

Ein Anpassungspfad beschreibt die Abfolge von Maßnahmen, welche infolge von meteorologischen, hydrographischen oder ozeanographischen Änderungen umgesetzt werden. Das Gesamtkonzept zur Anpassung an den Klimawandel kann dann als Anpassungsstrategie dargestellt werden. Die Durchführung der Maßnahmen und die anschließende Überprüfung der Zielerreichung werden durch Monitoring überwacht.

In 4. Stufe erfolgt die Identifizierung, Überprüfung und Bewertung möglicher Anpassungsoptionen, woraus eine Anpassungsstrategie abgeleitet und diese anschließend umgesetzt werden kann.

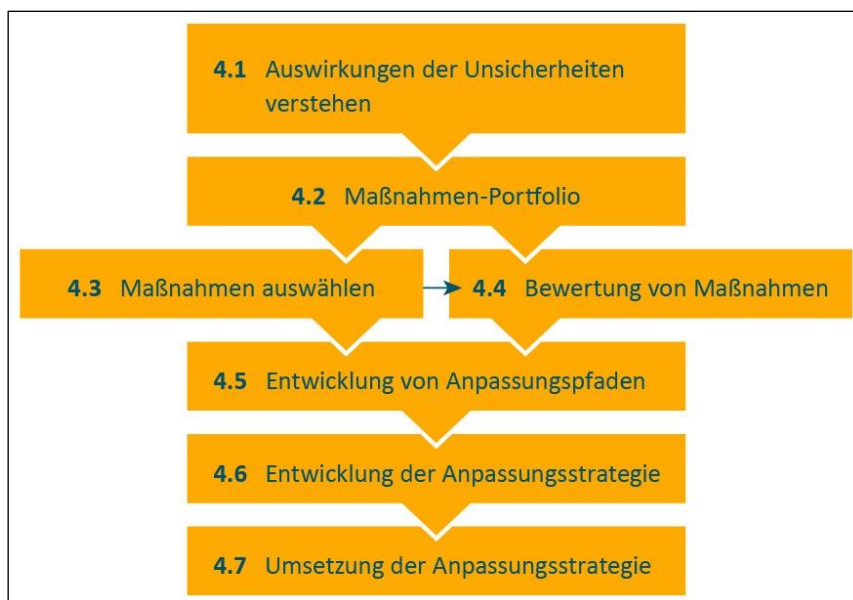


Abbildung 21: Stufe 4 des Klimaanpassungs-Planungsprozesses (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

In Schritt 4.1 gilt es zu verstehen, dass die vielen zu berücksichtigenden Unsicherheiten dazu führen können, dass die 'konventionelle Lösung' oder die 'naheliegendste Option' möglicherweise weder technisch noch wirtschaftlich die effektivste ist und vielmehr eine Reihe möglicher (traditioneller oder neuartiger) struktureller, operativer und institutioneller Maßnahmen standortspezifisch zu berücksichtigen sind. Dabei sind Fehlanpassungen zu vermeiden, gegebenenfalls zunächst kurzfristige und temporäre Maßnahmen zu berücksichtigen, bevor langfristige Maßnahmen etabliert werden, Ausbaureserven und Redundanzen vorzusehen sowie Strategien zur Minderung der Folgen bei Versagen zu entwickeln. Durch die vorhandenen Unsicherheiten ist es zudem nicht einfach zu wissen, wann es angeraten ist zu handeln. Hier kann ein entsprechendes Monitoring-System (lokale Trends

von klimatischen Parametern, Zustandsbewertungen von kritischen Anlagen etc., monetäre Schäden durch Wetterereignisse) unterstützend wirken.

Der Leitfaden bietet ein nach Klimaparameter und –prozessen gegliedertes Maßnahmen-Portfolio, wobei die enthaltenen Maßnahmen physischer, sozialer und institutioneller Art sind. Tabelle 8 zeigt eine Auswahl allgemeiner Anpassungsmaßnahmen. Weitere nach Auswirkungen – beispielsweise Überflutung – sortierte Maßnahmen sind im Anhang 4 des Leitfadens aufgelistet. Das Portfolio ist als Ideengeber zu verstehen, es handelt sich nicht um eine vollständige Übersicht. In Schritt 4.2 erfolgt schließlich die Auswahl möglicher Anpassungsmaßnahmen anhand des Portfolios für die jeweiligen relevanten Klimaparameter und –prozesse.

Tabelle 8: Allgemeine Anpassungsmaßnahmen, um die Widerstandsfähigkeit von Anlagen etc. zu stärken (PIANC 2020, verändert, eigene Übersetzung)

Physische Maßnahmen Strukturen, Systeme, Technologien	Soziale Maßnahmen Menschen, Verhalten, Vorgänge, Informationen	Institutionelle Maßnahmen Management, Ökonomie, Vorschriften, Politik
<p>Instandhaltung priorisieren, um die Widerstandsfähigkeit zu maximieren</p> <p>Echt-Zeit Monitoring von Infrastruktur</p> <p>Gefährdete Anlagen und Equipment aus Risiko-Gebieten verlagern</p> <p>In Redundanz, temporäre Infrastruktur oder andere physische Sicherungsmaßnahmen für kritische Anlagen (inkl. Strom- und Wasserversorgung) investieren</p> <p>Kritische Anlagen stützen, erhöhen, verstärken oder anderweitig schützen oder modifizieren</p> <p>Neue(s) flexible(s) o. demontierbare(s) Infrastruktur o. Equip-ment installieren o. entwickeln</p> <p>Warnsysteme installieren</p> <p>Ernennung oder Bereitstellung physischer Schutzräume</p> <p>Lagerkapazitäten erhöhen</p> <p>Naturbasierte Lösungen, Working with Nature, Soft Engineering</p> <p>Modifizierung von Material oder Equipment, um es an geänderte Bedingungen anzupassen</p> <p>In SMARTe Technologien investieren</p>	<p>Durchführung von Risikobewertungen zum Klimawandel, Erstellung von Risikokarten</p> <p>Vorbereitung von bzw. Sensibilisierung für Notfall- und Katastrophenschutzpläne</p> <p>Einführung und regelmäßige Überprüfung von Warnsystemen</p> <p>Ausbildung von Mitarbeitern, Akteuren und lokaler Bevölkerung</p> <p>Zusammenarbeit und Koordinierung mit Versorgungsunternehmen und anderen Dienstleistern</p> <p>Verbesserung (oder Einleitung) von Monitoring, Datenspeicherung und Datenmanagement</p> <p>Durchführung von Trendanalysen und Prognosen</p> <p>Überarbeitung von Betriebsanweisungen, Änderung von Arbeitspraktiken, wenn Bedingungen sich ändern</p> <p>Flexibilität und Reaktionsfähigkeit in der Planung erlauben (Betriebszeiten, Mitarbeiterplanung, Liegezeiten, Schleusenbetrieb, etc.)</p>	<p>Ausarbeitung einer Anpassungsstrategie</p> <p>Überprüfung und Überarbeitung relevanter Normen, Richtlinien und Merkblätter</p> <p>Überprüfung bzw. Anpassung von Sicherheits- und Gesundheitsvorschriften</p> <p>Strategien zur Standortverlegung aus Hochrisikogebieten</p> <p>Zusammenarbeit mit Raumordnung, z. B. um Rückzugs- und Pufferzonen einzurichten</p> <p>Begrenzung der Entwicklung neuer Infrastruktur in Hochrisikogebieten</p> <p>Alternative Transportwege und -arten identifizieren, sichern und koordinieren</p> <p>Schutz von gefährdeten Lebensräumen mit Funktion der Risikominderung (z. B. Absorption von Wellenenergie, Erosionsschutz)</p> <p>Gewährung von Zuschüssen oder Anreizen, z. B. für die Entwicklung oder Aufrechterhaltung widerstandsfähiger Infrastruktur</p> <p>Erforschung und Entwicklung neuer Instrumente und Methoden</p>

Anschließend werden in Schritt 4.3 die möglichen Maßnahmen nach unterschiedlichen Kriterien geprüft (screening). Die Auswahlkriterien sind in Tabelle 9 dargestellt. Jede Maßnahme sollte für eine jeweilige klimatische Auswirkung anhand jedes der Kriterien bewertet werden. Qualitative oder quantitative Informationen oder eine Kombination aus beidem sollten dabei verwendet werden. Die ausgefüllte Screening-Tabelle zeigt letztendlich eine Übersicht von Maßnahmen, die den ausgewählten Kriterien am besten entsprechen. Es ist angeraten, den Screening-Prozess nach einiger Zeit zu wiederholen, da durch geänderte Bedingungen Maßnahmen, die zuvor technisch nicht machbar oder unökonomisch waren, zukünftig möglich sein können.

Tabelle 9: Bewertungskriterien für die Auswahl von Anpassungsmaßnahmen (PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Auswahlkriterien	Umfang, in dem die Maßnahme das Kriterium erfüllt, allein oder in Kombination mit anderen Maßnahmen			
	Vollständig	Überwiegend	Teilweise	Inkompatibel
Kompatibel mit den Zielen	Vollständig	Überwiegend	Teilweise	Inkompatibel
Relative Kosten	Kostengünstig	Moderat	Kostspielig	Unerschwinglich
Technische Machbarkeit	Leicht	Moderat	Herausfordernd	Nicht machbar
Grad der Risikominderung	Signifikant	Moderat	Gering	Keine/ birgt neue Risiken
Auswirkungen auf andere Interessengruppen	Positiv	Neutral	Negativ	Untragbar
Auswirkungen auf die physische oder natürliche Umwelt oder das Kulturerbe	Positiv	Neutral	Negativ	Untragbar
Instandhaltungs- oder Managementanforderungen	Gering	Moderat	Erheblich	Untragbar
Risiko einer Fehlanpassung	Gering	Moderat	Signifikant	Untragbar
Umfang positiver Nebeneffekte	Signifikant	Moderat	Keine	-
Repräsentiert eine No- oder Low- Regret Maßnahme	No-Regret	Low-Regret	Neutral	-

In die engere Wahl kommende Maßnahmen müssen einer detaillierteren Bewertung unterzogen werden (Schritt 4.4), wenn z. B.:

- Verschiedene Arten von Maßnahmen sinnvoll erscheinen oder wenn Kompromisse zwischen verschiedenen Anpassungspfaden erforderlich sind

-
- Kostenüberlegungen, Anforderungen von Finanzierungsorganisationen oder Unternehmensprotokolle erfordern, dass eine wirtschaftliche Analyse und/ oder eine Bewertung von Alternativen durchgeführt wird
 - Die Einschätzung eines Experten aus anderen Gründen nicht ausreichend ist

Wenn fundierte Entscheidungen über Kosten und Nutzen verschiedener Maßnahmen getroffen werden müssen, gibt es verschiedene Methoden und Instrumente der wirtschaftlichen Analyse (Kosten-Nutzen/ Wirksamkeits-Analyse, Multikriterielle Entscheidungsanalyse, Realloptionsanalyse, Bayes'sche Netze etc.). Dabei können die folgenden Fragen bei der Wahl der Methode bzw. der Durchführung der Analyse helfen:

- Ist es ratsam, eine Methode zu wählen, die den Vergleich von Szenarien ermöglicht?
- Ist es besser, getrennte Bewertungen für kurz- und langfristige Maßnahmen durchzuführen?
- Welche Auswirkungen hat es, wenn keine Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden?

Die Wahl einer geeigneten Bewertungsmethode wird zudem durch die folgenden Punkte beeinflusst:

- Bedeutung von Genauigkeit und/ oder Transparenz, die eine quantitative Analyse begünstigen kann
- Verfügbarkeit von Ressourcen und detaillierten Daten, um die Auswirkungen quantifizieren zu können
- Einfachheit, mit der verschiedene Komponenten quantifiziert oder monetarisiert werden können
- Ansichten und Prioritäten relevanter Akteure und Miteigentümer

Bei der Planung der Anpassung an den Klimawandel wird ein 'Pfad' einem festen 'Programm' vorgezogen, denn verbleibende Unsicherheiten machen es schwierig oder unmöglich, genau zu wissen, wann eine bestimmte Maßnahme eingeleitet werden muss. Die Entwicklung von Anpassungspfaden für jede erwartete klimawandelbedingte Auswirkung auf kritische Anlagen etc. ermöglicht es, den Unsicherheiten Rechnung zu tragen (Schritt 4.5). Unter den zuvor identifizierten Maßnahmen können einige relativ einfach und kostengünstig umzusetzen sein. Solche Maßnahmen werden als 'low-hanging-fruits' und 'no-regret' bezeichnet. Anfängliche Maßnahmen können mit Gewissheit umgesetzt werden, während der Zeitpunkt und gegebenenfalls Art zukünftiger Maßnahmen offen gehalten wird. Diese Flexibilität kann entscheidend sein, um Fehlanpassungen zu vermeiden. Bei längerfristig umzusetzenden

Maßnahmen können die Überwachung der Performance von Anlagen etc. sowie meteorologischer, hydrographische oder ozeanographischer Daten als Frühwarnsysteme bzw. Indikatoren dienen, wann kritische Schwellenwerte erreicht werden. Tabelle 10 zeigt exemplarisch einen solchen Anpassungspfad.

Tabelle 10: Beispiel eines Anpassungspfad (PIANC 2020, verändert, eigene Übersetzung)

Auswirkung	Maßnahme	Bedingungen, die Aktion auslösen	
<i>Anstieg des Meeresspiegels führt zu einer immer häufigeren Überschwemmung eines von zwei Liege- und Umschlags-plätzen von Stückgut im Hafen</i>	1	Erstellung eines Ausweichplans für alternative Anlegemöglichkeiten	Sofort (no regret)
	2	Überwachung des Zustands der Anlage einleiten	Gesicherte Finanzierung
	3	Entscheidung über die Erhöhung der Kajen-Suprastruktur versus Ersatzneubau	Überwachung der lokalen Meeresspiegelanstiegsrate und/ oder der Zerstörung der Anlage zeigt an, dass der akzeptable Schwellenwert innerhalb von drei Jahren überschritten wird.

In Schritt 4.6 geht es darum, die bisher umgesetzten Stufen bzw. ihre einzelnen Schritte in einer Anpassungsstrategie zusammenzufassen. Wichtig ist, dass die Strategie die Maßnahmen beschreibt, die gemäß den in Schritt 4.5 identifizierten Anpassungspfad für jede kritische Anlage etc., die wahrscheinlich vom Klimawandel betroffen ist, umzusetzen sind. Dabei kann es gegebenenfalls erforderlich sein, innerhalb der Strategie Umsetzungsprioritäten festzulegen. Im Rahmen der Anpassungsstrategie sind zudem Rollen und Verantwortlichkeiten anderer Akteure festzuhalten.

Nachdem die Anpassungsstrategie festgelegt wurde, wird sie in Schritt 4.7 umgesetzt. Während sich Umfang und Komplexität der sich aus der Anpassungsstrategie ergebenden Aktivitäten, unterscheiden, können die folgenden typischen Umsetzungsschritte identifiziert werden:

- Einrichten eines oder mehrerer Projektteams
- Einbeziehen anderer interessierter und maßgeblicher Akteure
- Ausbilden und aufbauen von Kompetenzen
- Sicherstellen der Finanzierung

-
- Vorbereiten, entwickeln, planen, entwerfen; Berücksichtigung des Restrisikos sowie innovativer Ansätze und Flexibilität im Entwurf
 - Einholen von Berechtigungen oder Zustimmungen
 - Konstruieren, starten und implementieren
 - Überwachen, überprüfen und überarbeiten

Wann immer eine Anpassungsmaßnahme umgesetzt wird, ist die Überwachung ihrer Wirksamkeit unerlässlich, sowohl um Fehlanpassungen zu vermeiden, als auch um Entscheidungen über zukünftige Anforderungen entlang des Anpassungspfades zu treffen. Die Überwachung sollte die Ziele der Maßnahmen widerspiegeln, wobei Indikatoren, d.h. was überwacht werden soll, entsprechend vereinbart werden. Die Überwachungsergebnisse sollten so weit wie möglich quantifiziert werden, z. B. durch Aufzeichnung von:

- Häufigkeit von schädlichen Auswirkungen wie Überschwemmungen
- Überschreitung von Betriebsgrenzen, z. B. beim Anlegen oder Verladen
- Wirtschaftliche Verluste durch Verspätung oder Ausfallzeiten
- Instandhaltungskosten
- Reparatur- oder Ersatzkosten für Schäden
- Nicht-Erreichen von Sicherheitszielvorgaben

4 Anpassung von deutschen Seehäfen an den Klimawandel

4.1 Bestehende sowie zukünftige Gefährdung und Chancen für Seehäfen in Deutschland infolge des Klimawandels

Die Verwundbarkeit von Seehäfen gegenüber dem Klimawandel ist vielfältig. Abbildung 22 zeigt eine Übersicht identifizierter Klimaparameter und deren Auswirkungen auf die verschiedenen Bereiche eines Seehafens.

Im Rahmen des Projekts PortKLIMA wurden Interviews mit den am Projekt beteiligten Hafenmanagementgesellschaften geführt, um die aktuelle Betroffenheit der beteiligten Seehäfen von extremen Wetterereignissen zu erfassen. Terminalbetreiber, Logistiker und hafenaffine Betriebe wurden nicht umfassend interviewt, daher können auf Basis der Interviews nur in Teilen Aussagen über die aktuelle Betroffenheit der beteiligten Häfen abgeleitet werden. Die eingerahmten Begriffe in Abbildung 22 geben die Ergebnisse der Interviews mit Praxispartnern des Projekts PortKLIMA wieder, d.h. die bereits heute in den beteiligten Seehäfen zu beobachtenden Auswirkungen.

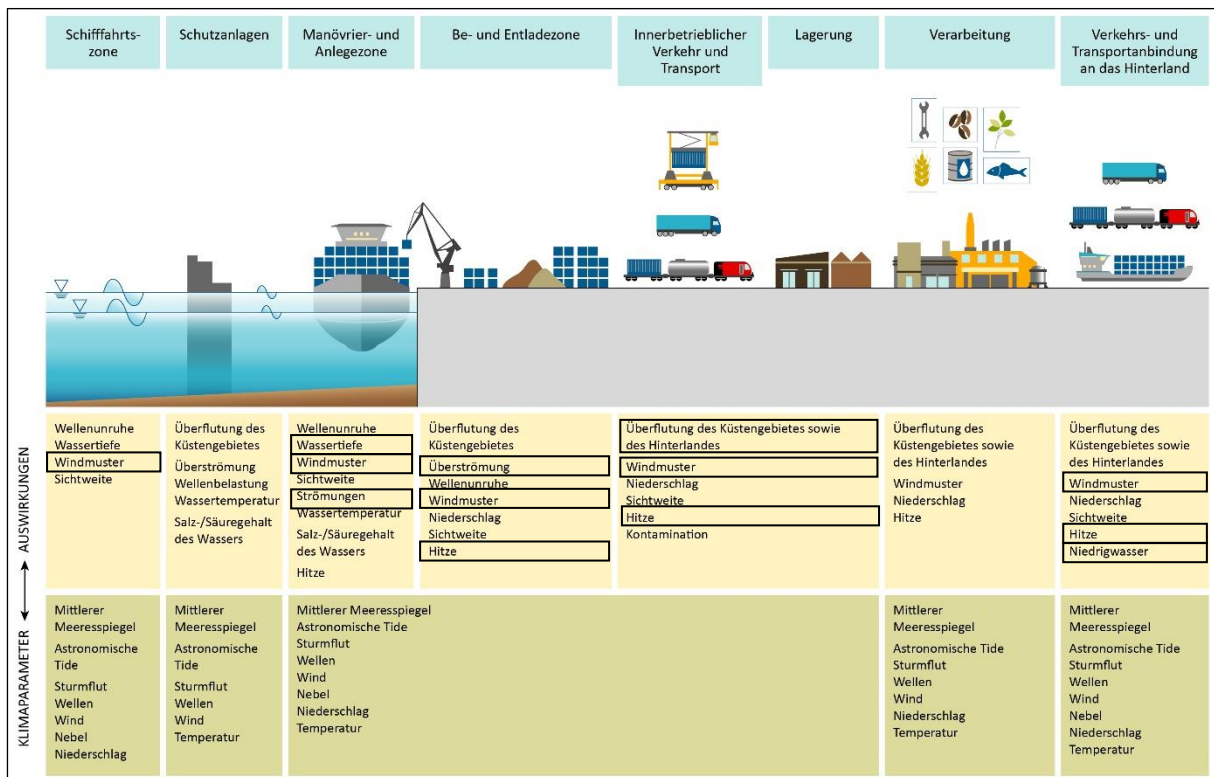


Abbildung 22: Klimaparameter und Auswirkungen auf Seehäfen. Die bisher beobachteten Auswirkungen auf deutsche Seehäfen sind durch die Kästen hervorgehoben (Abbildung nach PIANC 2020, eigene Übersetzung)

Es ist davon auszugehen, dass bereits heute bei extremen Wetterereignissen zu beobachtende Probleme durch den Klimawandel zukünftig häufiger und auch verstärkt auftreten werden. Nichtsdestotrotz ist es wichtig, die Ursache nicht nur im Klimasystem zu suchen, da ebenso menschliche Eingriffe, wie beispielsweise Fahrwasservertiefungen, Wasserentnahmen oder ein Zuwachs der Schiffsgrößen, Ursachen für zunehmende Herausforderungen sein können. Treten wetterbedingte Schäden auf, kann zudem Materialermüdung oder mangelnde Wartung und nicht das unmittelbare Extremwetterereignis die Ursache für Schäden sein. Da häufig Extremwetterereignisse und wetterbedingte Schäden nicht systematisch erfasst werden, sind keine quantifizierbaren Aussagen über die aktuelle Betroffenheit möglich. Dennoch zeigen die Erfahrungswerte Problembereiche auf. Es ist allerdings davon auszugehen, dass mit dem Klimawandel auch neue Problemfelder, beispielsweise in Zusammenhang mit dem Anstieg des mittleren Meeresspiegels, entstehen werden.

Durch ihre Lage sind Seehäfen insbesondere den Auswirkungen von hohen Wasserständen und starken Winden infolge von Sturm ausgesetzt. Der Umschlag im Hafen kann nur bei bestimmten Windstärken erfolgen. Bei zu großen Windgeschwindigkeiten muss der Betrieb des Hafens weitgehend bzw. komplett eingestellt werden. Schäden infolge von Sturmereignissen, wie beispielsweise beschädigte Dächer, sind nicht ungewöhnlich. Vereinzelt kam es in der Vergangenheit auch zu umgestürzten Leercontainern. Hohe Wasserstände werden bereits heute für die Häfen zum Problem, bei denen die Kaianlagen nur geringfügig über dem mittleren (Tide-) Hochwasserstand liegen wie z. B. in Brake oder in Hamburg am Burchardkai. Solche Kaianlagen werden bereits heute teilweise durch auf den Kaianlagen platzierten Hochwasserschutzwänden vor Überflutung geschützt.

Durch die Zunahme von Schiffsgrößen hat sich die Windangriffsfläche der Schiffe vergrößert. Dieser Umstand ist über die Jahre in den einschlägigen Bemessungsansätzen, wie den Empfehlungen des Ausschusses Ufereinfassungen, in geänderten Bemessungswerten, beispielsweise für Festmacheinrichtungen, berücksichtigt worden (Tabelle 11). Die im Zusammenhang mit Starkwind und Schiffsgrößen zu nennenden Herausforderungen sind das Festmachen von Schiffen mit teilweise erhöhtem Schleppereinsatz, Kolksschäden durch Bugstrahleinsatz und vereinzelt losgerissene Schiffe sowie, bei begrenztem Platzangebot, das sichere Manövrieren von Schiffen, welche in Extremfällen bei engen Hafeneinfahrten den Hafen nicht mehr anlaufen können.

In wenigen Fällen wurden ungewöhnliche Starkwind- bzw. Sturmereignisse beobachtet. Hierzu zählen langanhaltende Starkwindereignisse im Sommer und Sturmereignisse aus untypischer Richtung. Schäden infolge von Sturm bzw. Sturmfluten können mit zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen minimiert, Betriebsausfälle jedoch nicht verhindert werden.

Tabelle 11: Entwicklung der nach Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU) anzusetzenden charakteristischen Pollerzuglasten in Abhängigkeit der Wasserverdrängung eines Schiffs (Turban 2019)

Wasserverdrängung G [t]	Pollerzuglast [kN]			
	EAU Auflage			
	1.	2.	5./ 9./ 10.	11.
2.000	100	100	100	-
10.000	300	300	300	300
20.000	600	600	600	600
50.000	800	800	800	800
100.000	-	1.000	1.000	1.000
200.000	-	-	1.500	2.000
250.000	-	-	2.000	2.500
>250.000	-	-	-	>2.500

Das Auftreten von Hitzeperioden hat unterschiedliche Auswirkungen auf Seehäfen. Vor allem für in nicht klimatisierten Räumen bzw. Bereichen beschäftigten Mitarbeitern sind hohe Lufttemperaturen problematisch, so dass hier zusätzliche Arbeitsschutzmaßnahmen getroffen werden müssen und auch bereits getroffen wurden. Insbesondere für ältere Arbeitnehmer waren die hohen Temperaturen in den Sommern 2018 und 2019 eine große Herausforderung. Auch kam es aufgrund der großen Auslastung vereinzelt zu Ausfällen von Klimaanlage in Fahrzeugen, welchen jedoch mit Ruhephasen, d.h. Abschalten der Klimaanlage während der Nacht, entgegengewirkt werden konnte. Generell ist das Thema Klimatisierung von zunehmender Relevanz. In manchen Häfen kommt es durch hohe Temperaturen zu Beschädigungen an Belägen (Asphalt) und an Gleisanlagen (bei langen Gleisstrecken) bzw. Stahlbrücken. Manche Arbeiten können bei hohen Temperaturen nicht ausgeführt werden, weil z. B. die Materialien wie Farbe nicht verarbeitet werden können.

Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten (Starkniederschläge) oder hohen Niederschlagsmengen verursachen, mit wenigen Ausnahmen, in den Häfen bisher kaum Probleme. Allerdings ist der Umschlag nässeempfindlicher Güter bei Niederschlag eingeschränkt. Das Niederschlagswasser kann häufig gut über die Terminalentwässerung bzw. die Kaikante abfließen. Bisher ist es nur lokal und kurzzeitig zu Überschwemmungen gekommen. Geschotterte Flächen müssen jedoch zur Minderung der Pfützenbildung ggf. häufiger hergerichtet werden.

Der zukünftige Umgang mit der Einleitung des Niederschlagswassers von den Terminalflächen, um bei steigenden Wassertemperaturen und dadurch geringeren Sauerstoffkonzentrationen eine übermäßige Belastung der Vorfluter zu vermeiden, ist zu diskutieren. Zudem steigt die Gefahr des Rückstaus infolge sinkender Aufnahmekapazitäten der Vorfluter aufgrund eines steigenden Meeresspiegels.

Fehlender Niederschlag wirkte sich in der Vergangenheit in unterschiedlicher Art und Weise auf die Häfen aus. Durch die daraus entstehenden Niedrigwasserstände auf dem Rhein konnte eine Verlagerung der Güterströme auf die Bahn beobachtet werden, was zu einer Verknappung von Eisenbahnwaggons, aber auch zu einer Umlagerung von Gütern in andere Hafenstandorte geführt hat. Zu niedrige Wasserstände bergen zudem die Gefahr, dass die Bemessungswasserstände an den Kaianlagen unterschritten werden, so dass die betroffenen Kaianlagen für den Umschlag gesperrt werden müssen. Durch niedrige Binnenwasserstände kann die Hinterlandverbindung per Schiff eingeschränkt sein; dies betrifft vor allem nicht staugeregelte Flussabschnitte.

Die Hinterlandverbindungen per Schiff, Bahn oder LKW sind zur Aufrechterhaltung der Güterströme essentiell. Werden diese durch Niedrigwasserstände, Ausfälle der Bahnstrecken aufgrund von Sturmschäden oder Böschungsbränden oder durch die Sperrung von Straßen gestört, kommt es zu erheblichen Beeinträchtigungen der Logistik. Insbesondere durch die Sperrung infrastruktureller Nadelöhre, wie beispielsweise Brücken oder eingleisigen Bahnstrecken, kann der Hinterlandverkehr massiv gestört werden.

Grundsätzlich wirkt sich der Oberwasserzufluss auf den Sedimenttransport und somit das Sedimentmanagement in den weiter im Binnenland gelegenen Seehäfen aus. Von betroffenen Häfen wurden sowohl positive als auch negative Auswirkungen, d.h. fallende bzw. steigende Aufwendungen für das Sedimentmanagement beobachtet, die genauen Gründe sind jedoch nicht eindeutig zu benennen. Steigende Wassertemperaturen und geringe Sauerstoffkonzentrationen können die Tage, an denen Maßnahmen zum Sedimentmanagement wie Baggern und Wasserinjektionsmaßnahmen erlaubt sind, zukünftig gegebenenfalls beschränken.

Lokal in einem der Partnerhäfen trat in der jüngsten Vergangenheit innerhalb von zwei Jahren hintereinander Salznebel, d.h. Luft mit einem hohen Salz- und Feuchtigkeitsgehalt, auf. In dessen Folge ist es in der betroffenen Region zu Problemen mit der Stromversorgung und zum Ausfall von Oberleitungen an Gleisstrecken gekommen. Das Ereignis gilt eigentlich als

selten auftretend; eine Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem Klimawandel ist möglich.

In einigen Häfen konnte eine Änderung von Güterströmen infolge von Extremwetterereignissen beobachtet werden. Neben einer Umleitung von Gütern infolge Niedrigwasser zählen hierzu verstärkte Holzimporte infolge von Sturmschäden sowie verringerte Getreideexporte bzw. erhöhte Futtermittelimporte infolge extremer Dürre. Die Änderungen der Güterströme waren für die Häfen bisher überwiegend nicht negativ, aber auch nicht unbedingt positiv. Eine Änderung von Güterströmen ist grundsätzlich Teil der Hafentwicklung, in der Regel bedingt durch eine Änderung wirtschaftlicher oder politischer Bedingungen und Entscheidungen. Zukünftig gilt es, die Folgen des Klimawandels in die strategischen Entscheidungen der Hafentwicklung mit einzubeziehen und ggf. auch betroffene Mieter von Hafflächen rechtzeitig auf mögliche Folgen hinzuweisen.

Insgesamt ist die aktuelle Betroffenheit der beteiligten Häfen infolge Extremwetterereignissen im Vergleich zu historischen Bedingungen als nicht außergewöhnlich einzustufen. Erste Änderungen der klimatischen Bedingungen zeichnen sich jedoch ab. Damit zukünftige Entscheidungen auf objektiven Werten basieren können, ist zu empfehlen, in den Häfen Monitoringprogramme der eigenen Betroffenheit aufzubauen.

Auch wenn die negativen Folgen des Klimawandels überwiegen, wird der Klimawandel positive Auswirkungen haben. So ist beispielsweise damit zu rechnen, dass aufgrund der gestiegenen mittleren Lufttemperaturen im Winter seltener Eis und Schnee auftritt. Mit steigendem Meeresspiegel erhöhen sich zudem die Wassertiefen in den Wasserstraßen und Häfen. Ein möglicher Wettbewerbsvorteil kann sich zudem daraus ergeben, dass ein Hafen besser als andere Standorte auf die Herausforderungen infolge des Klimawandels eingestellt ist. Möglicherweise ergeben sich auch Chancen aus klimawandelbedingten Änderungen der Güterströme.

4.2 Relevante Zeithorizonte und deren Bedeutung für Anpassungsmaßnahmen

Die Anpassung an den Klimawandel erfordert es, langfristige Zeithorizonte in Planungsprozessen zu berücksichtigen. Bei der Entwicklung eines Maßnahmenplans zur Anpassung an den Klimawandel sind entsprechend des PIANC-Leitfadens (PIANC 2020) bei der Festlegung des Planungshorizonts die Standzeiten von Anlagen zu berücksichtigen und das Ausmaß der Änderung relevanter Klimaparameter und -prozesse in Relation zu den Standzeiten der Anlagen zugrunde zu legen. Als gleichbedeutend zu kurzen und langen

Standzeiten ist eine erforderliche Planungs- bzw. Reaktionszeit für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zu sehen.

Tabelle 12 zeigt eine Übersicht durchschnittlicher wirtschaftlicher Lebensdauern von Anlagen in Seehäfen. Anlagen wie Kaimauern, Hochwasserschutzanlagen und Wellenbrecher erfordern es, Planungshorizonte von bis zu 100 Jahre zugrunde zu legen. Aufgrund langfristiger natürlicher Klimaänderungen war oder ist es bereits heute üblich bei Hochwasserschutzanlagen Klimazuschläge bzw. Ausbaureserven vorzusehen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich der Meeresspiegelanstieg aufgrund des vom Menschen verursachten Klimawandels beschleunigt und auch weitere klimatische Änderungen verstärkt auftreten werden (IPCC 2021). Insofern reichen die zugrunde gelegten Annahmen ggf. nicht mehr aus und es können auch Anlagen mit kürzeren Standzeiten ohne Anpassungsmaßnahmen innerhalb ihrer Lebensdauer von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein.

Tabelle 12: Durchschnittliche wirtschaftliche Lebensdauer von Anlagen in Seehäfen. Tatsächliche Standzeiten einzelner Anlagen hängen von der individuellen Zustandsbewertung sowie Nutzung ab und können somit auch maßgeblich kürzer oder länger als die durchschnittliche wirtschaftliche Lebensdauer sein.

Anlage und Ausrüstung	Durchschnittliche wirtschaftliche Lebensdauer (Jahre)
Terminal- und Hafensuprastruktur	Containerbrücke: 20 ¹ , 15 ² Mobilkran: 15 ¹ Portalhubwagen: 6 ³ , 5-10 ¹ RoRo-Rampen: 15 ³ Lager und Hallen: 25 ³ , 40 ¹ ; Beton: 25 ² ; Leichtbauweise: 10 ²
Beläge	Asphalt: 10-15 ¹ ; Beton: 20 ¹ ; Straßen/ Flächenbefestigungen: 15 ²
Gleisanlagen	Nach gesetzlichen Vorschriften: 25 ² ; sonstige: 12 ²
Entwässerung	Drainagen: 33 ²
Kaimauern	Beton: 40 ³ ; Stahl: 25 ³ Spundwände: 50 ¹ , 20 ² ; überbaute Böschung: 50-100 ¹ , Gummifender: 10 ³ , 10-20 ¹
Hochwasserschutzanlagen	>100 ¹
Wellenbrecher	50 ³ , 100 ¹
Dalben	20 ²
Pontons	Beton: 30 ² ; Metall/ Stahl: 30 ²
¹ Thoresen (2010) ² Bundesfinanzministerium (2020) ³ United Nations Conference on Trade and Development (1985)	

Bei Anlagen mit kurzen Standzeiten bzw. Maßnahmen mit kurzen Reaktionszeiten ist es generell einfacher, die Auswirkungen des Klimawandels in der Planung zu berücksichtigen. Maßnahmen können dann umgesetzt werden, wenn sich ein deutlicher Trend abzeichnet und

Anlagen bzw. Ausrüstung unabhängig vom Klimawandel zu erneuern sind. Allerdings können bereits heute wetterbedingte Ausfälle und Schäden infolge von extremer Hitze, Unwetter, Starkregen und Sturm auftreten. Daher können bei hohem potentiellen Schaden auch bei Anlagen mit kurzen Standzeiten bzw. Maßnahmen mit kurzer Reaktionszeit bereits heute Anpassungsmaßnahmen an wetterbedingte Extremereignisse sinnvoll sein. Terminals für spezielle Industrien haben darüber hinaus den Vorteil, dass sie oft über kurze Standzeiten von bis zu 30 Jahren verfügen, da die Anlagen häufiger geänderten wirtschaftlich-technischen Anforderungen anzupassen sind. Insbesondere bei Anlagen mit langen Standzeiten oder langen Reaktionszeiten müssen die Auswirkungen des Klimawandels jedoch frühzeitig berücksichtigt werden. Ist der potentielle Schaden gering, können Risiken gegebenenfalls hingenommen werden. Eine mögliche Entscheidungsmatrix zur Bewertung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen ist in Tabelle 13 dargestellt. Zum derzeitigen Zeitpunkt werden umfangreiche Investitionen allein zum Zweck der Anpassung an den Klimawandel aus wirtschaftlichen Gründen jedoch i.d.R. nicht getätigt.

Tabelle 13: Entscheidungsmatrix zur Bewertung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen (Norpoth et al. 2020)

Potentieller Schaden \ Stand-/ Reaktionszeit	Gering	Hoch
Kurz	Ad-hoc-Maßnahmen	Fortlaufend Untersuchen
Lang	Risiken hinnehmen	Frühzeitig präventiv handeln

Als kritische Anlagen sind Anlagen, die über wenig oder keine Pufferkapazität bzw. Redundanz verfügen und deren Ausfall die Störung der Logistikkette zur Folge hätte, zu nennen. Neben der seeseitigen Zufahrt sowie der Hinterlandanbindung - vor allem wenn keine Ausweichstrecken zur Verfügung stehen - sind dies Schleusen, die Energieversorgung, Umschlaggeräten, RoRo-Rampen und speziellen Lagerkapazitäten. Zudem zählen hierzu auch Hochwasserschutzsysteme, deren Versagen großflächige Beeinträchtigungen zur Folge hätte.

4.3 Regionale Auswirkungen des Klimawandels

4.3.1 Mittlerer Meeresspiegel

Der Meeresspiegel, d.h. die Höhe der Meeresoberfläche, ist weder örtlich noch zeitlich konstant und unterliegt langjährigen sowie kurzzeitigen Schwankungen. Der Meeresspiegel folgt dem Erdschwerefeld, d.h. sein mittlerer Zustand entspricht dem Geoid, und ist somit

unregelmäßig über den Globus verteilt. Zudem wirkt sich der anthropogene Klimawandel regional unterschiedlich auf den Meeresspiegel aus. Beispielsweise führen die Massenanziehung der großen Eisschilde und deren Abschmelzen zu einem regional unterschiedlich ausgeprägten Meeresspiegelanstieg. Ein Abschmelzen der Eisschilde am Südpol hat einen Anstieg der Wasserstände auch an der deutschen Küste zur Folge, da die Anziehungskraft der Eisschilde mit schwindender Masse abnimmt. Die umliegenden Wassermassen werden dadurch weniger stark angezogen und verteilen sich an anderer Stelle auf dem Globus. In der Nähe des Südpols ist das Resultat in diesem Beispiel jedoch ein Absinken der Wasserstände. Langfristige Schwankungen des Meeresspiegels unterliegen eustatischen Effekten, d.h. der Änderung des Wasservolumens oder des Volumens der Ozeanbecken, und sterischen Effekten, d.h. Änderung von Temperatur und/ oder Salzgehalt. Sowohl der eustatische als auch der sterische Anteil werden durch den anthropogenen Klimawandel in der Art beeinflusst, dass global betrachtet der Meeresspiegel ansteigt. Regional können isostatische Effekte, z.B. postglaziale Landhebung oder Landsenkung, z.B. infolge einer Grundwasserentnahme, langfristige Meeresspiegeländerungen zur Folge haben. Regional können isostatische Effekte dazu führen, dass der anthropogen beeinflusste Meeresspiegelanstieg kompensiert wird und der Wasserstand an den Küsten im Mittel sinkt, wie es in der nördlichen Ostsee der Fall ist. Kurzzeitige Schwankungen enthalten eine starke regionale Komponente und treten beispielsweise aufgrund von Gezeiten, Wind oder Strömung auf. Letztlich ist der Meeresspiegel von vielen unterschiedlichen klimatischen und nicht-klimatischen Faktoren abhängig (Abbildung 23).

Um die Änderung des Meeresspiegels zu erfassen, wird der Meeresspiegel über lange Zeiträume (Monate, Jahre) gemittelt (mittlerer Meeresspiegel), so dass kurzzeitige Schwankungen eliminiert und der Trend langfristiger Schwankungen erfasst werden kann. Man unterscheidet zwischen dem absoluten Meeresspiegel, welcher auf einen festen Punkt wie den Erdmittelpunkt bezogen wird und über den Globus gemittelt dem globalen Meeresspiegel entspricht, und dem relativen (regionalen) Meeresspiegel, welcher auf einen Punkt an Land bezogen wird, der in seiner Höhe z.B. aufgrund tektonischer Prozesse veränderbar ist. Der absolute Meeresspiegel kann seit den 1990er Jahren direkt anhand von Satelliten erfasst werden. Der relative Meeresspiegel wird anhand von Pegeln gemessen. Historische Pegelaufzeichnungen geben Auskunft über den absoluten Meeresspiegelanstieg vor Beginn des Einsatzes von Satelliten.

Insbesondere die kurzzeitigen Schwankungen des Meeresspiegels können zu extremen Wasserständen an der Küste führen. Dabei bildet der mittlere Meeresspiegel das Ausgangsniveau dieser Zustände. An Küsten, welche stark dem Einfluss der Gezeiten unterliegen, trägt der Stand von Erde, Mond und Sonne zu besonders hohen Wasserständen bei (Springflut). Darüber hinaus treten extreme Wasserstände in Kombination mit Sturmereignissen auf. Wehen die Winde in Richtung der Küste, führen die andauernden und hohen Windgeschwindigkeiten zu einem Wasseraufstau (Windstau) sowie ggf. zu entsprechend großen Wellen, welche auf die Küste auflaufen. Diese extremen Bedingungen stellen eine relevante Bemessungssituation für viele Küstenbauwerke dar. Es stellt sich die Frage, ob es reicht, für die Bemessung von Anlagen im Küstenbereich zukünftig nur die Änderung des mittleren Meeresspiegels zu berücksichtigen oder ob es nötig ist, die Änderung von Gezeiten, Windstau und Wellenparametern infolge eines Meeresspiegelanstiegs bzw. Änderungen im Sturmklima infolge des Klimawandels ebenfalls zu berücksichtigen. In den folgenden Kapiteln wird unter anderem dieser Frage nachgegangen.

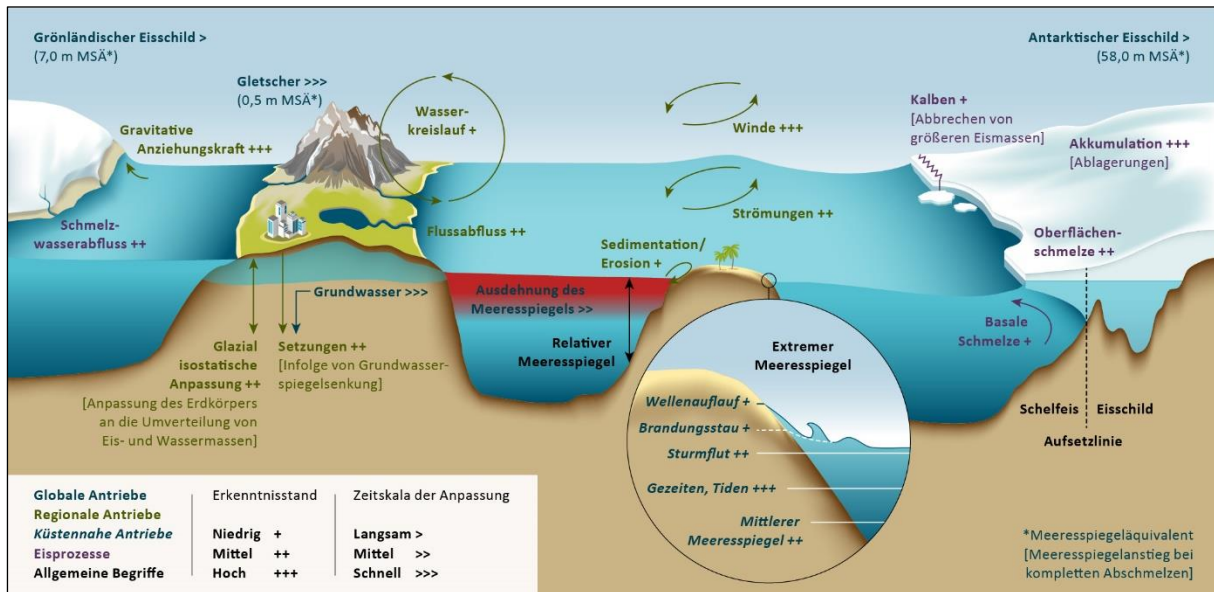


Abbildung 23: Beeinflussung des Meeresspiegels durch klimatische und nicht-klimatische Prozesse (IPCC 2019)

Im Jahr 2019 hat der IPCC einen Sonderbericht zum aktuellen Kenntnisstand von Ozeanen und Kryosphäre (Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate – SROCC) veröffentlicht (IPCC 2019). Der IPCC-Sonderbericht macht folgende Aussagen zur Entwicklung des mittleren globalen Meeresspiegels seit Anfang des 20. Jahrhunderts: Global betrachtet liegt der mittlere Meeresspiegelanstieg im Zeitraum 1902-2015 bei 0,16 m. Zwischen 2006 und 2015 ist der globale Meeresspiegel um 3,6 mm/ Jahr gestiegen. Dieser

für das 20. Jahrhundert beispiellose Anstieg ist etwa 2,5-mal so hoch wie derjenige im Zeitraum 1901-1990 (1,4 mm/ Jahr). Es besteht hohes Vertrauen, dass die Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs auf das zunehmende Abschmelzen des Grönländischen und Antarktischen Eisschildes zurückzuführen ist. Vergleicht man die Zeiträume 1997-2006 und 2007-2016, dann hat sich der Massenverlust des Antarktischen Eisschildes in dieser Zeit verdreifacht und der des Grönländischen Eisschildes verzweifacht. Es besteht hohes Vertrauen, dass menschliche Einflüsse seit 1970 die dominierende Ursache für den Meeresspiegelanstieg darstellen.

Für die deutsche Bucht haben Wahl et al. (2011) Anstiegsraten des mittleren Meeresspiegels von 1,7 mm/ Jahr (1901-2008) festgestellt, die also in etwa in Höhe des globalen Meeresspiegelanstiegs liegen. Abbildung 24 zeigt die Entwicklung des regionalen Meeresspiegels am Pegel Cuxhaven im 20. Jahrhundert. In einer Zusammenfassung der Literatur zum Klimawandel in Deutschland nennen Weiße und Meinke (2017) für die deutsche Ostseeküste hingegen im Mittel Anstiegsraten von 1 mm/ Jahr für das 20. Jahrhundert, mit höheren Anstiegsraten im Südwesten und niedrigeren Anstiegsraten im Nordosten. In ihren Recherchen finden Weiße und Meinke zudem Hinweise darauf, dass in der Nordsee zukünftige Anstiegsraten aufgrund der postglazialen Landsenkung höher als der globale Meeresspiegelanstieg ausfallen können, wohingegen in der Ostsee der zukünftige Meeresspiegelanstieg in der Größenordnung des globalen mittleren Anstiegs liegen kann.

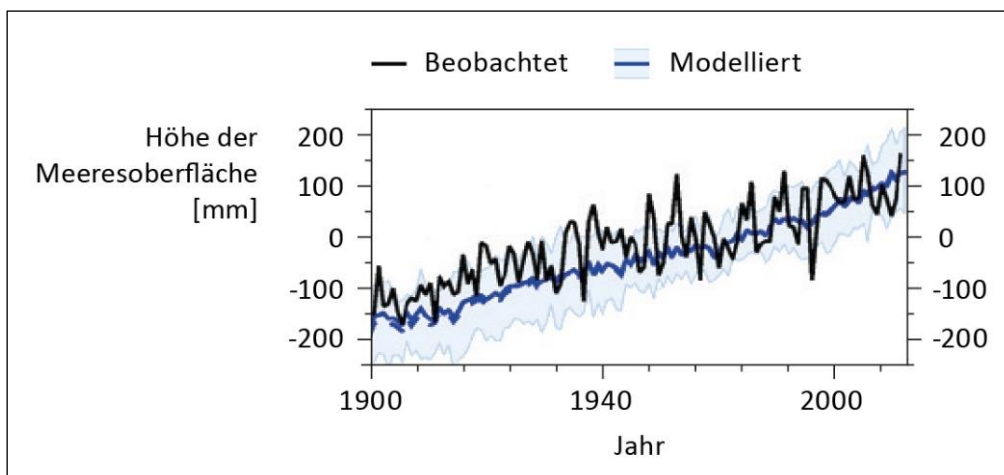


Abbildung 24: Beobachtete und mit Modellen berechnete Änderung des mittleren Meeresspiegels am Pegel Cuxhaven (nach IPCC 2019).

Den Projektionen des zukünftigen Meeresspiegels liegen prozessbasierte Modelle zugrunde, wobei ein mittleres Vertrauen in die Projektionen angegeben wird (IPCC 2019). Das

angegebene Vertrauensniveau resultiert u.a. auf Unsicherheiten bzgl. der Reaktion des Antarktischen Eisschildes. Tabelle 14 zeigt die im aktuellen SROCC-Bericht genannte mögliche zukünftige Änderung des mittleren globalen Meeresspiegels sowie die auf Basis der Daten des IPCC-Sonderberichts zusammengestellten Änderungen für die Küsten der deutschen Ost- und Nordsee. Grundsätzlich liegen die Werte für die deutsche Ost- und Nordseeküste in etwa im Bereich des projizierten mittleren globalen Meeresspiegelanstiegs. Je nach Treibhausgasszenario reichen die Anstiegsraten des globalen mittleren Meeresspiegels von 0,24 m bis 0,32 m für die nahe Zukunft (2046-2065) und von 0,39 m bis 0,71 m für die ferne Zukunft (2081-2100). Als Höchstwert für das Jahr 2100 ist dem Bericht nach mit einem mittleren globalen Meeresspiegelanstieg von 1,1 m für das RCP8.5-Szenario im Jahr 2100 zu rechnen. Damit weichen vor allem die Werte des RCP8.5-Szenarios für die ferne Zukunft um etwa 1 dm von den Aussagen des fünften IPCC-Sachstandsberichts ab. Die Änderung ist in einem höheren Beitrag des Antarktischen Eisschildes zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg begründet (mittleres Vertrauen) (IPCC 2019). Dem SROCC-Bericht nach kann gemäß von Experteneinschätzungen ein globaler Meeresspiegelanstieg von 2 m im Jahr 2100 nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle 14: Mögliche Änderung des mittlerer globalen sowie des regionalen Meeresspiegels relativ zum Zeitraum 1986-2005 auf Basis des IPCC-SROCC (IPCC 2019). Spannweite: 17-83% Wahrscheinlichkeit.

		2046-2065		2081-2100		2100	
	Szenario	Mittelwert	Spannweite	Mittelwert	Spannweite	Mittelwert	Spannweite
Global							
Anstieg des mittleren Meeresspiegels (m)	RCP2.6	0,24	0,17 - 0,32	0,39	0,26 - 0,53	0,43	0,29 - 0,59
	RCP4.5	0,26	0,19 - 0,34	0,49	0,34 - 0,64	0,55	0,39 - 0,72
	RCP8.5	0,32	0,23 - 0,40	0,71	0,51 - 0,92	0,84	0,61 - 1,10
Nordsee¹							
Anstieg des mittleren Meeresspiegels (m)	RCP2.6	0,25	0,08 - 0,43	0,38	0,12 - 0,64	k.A.	
	RCP4.5	0,28	0,11 - 0,45	0,48	0,21 - 0,75		
	RCP8.5	0,34	0,16 - 0,53	0,72	0,41 - 1,04		
Ostsee¹							
Anstieg des mittleren Meeresspiegels (m)	RCP2.6	0,19	0,02 - 0,36	0,29	0,03 - 0,54	k.A.	
	RCP4.5	0,22	0,05 - 0,39	0,38	0,12 - 0,65		
	RCP8.5	0,27	0,10 - 0,45	0,62	0,31 - 0,95		

¹ Mittelwert des Bereichs, der die deutsche Nord- bzw. Ostseeküste deckt (Datengrundlage: IPCC, 2019)

Aufgrund der Trägheit des Systems wird sich der Meeresspiegelanstieg auch über das Jahr 2100 hinweg fortsetzen. Dem SROCC-Bericht zufolge kann im Jahr 2300 der globale Meeresspiegelanstieg 0,6-1,07 m (RCP2.6) bzw. 2,3-5,4 m (RCP8.5) betragen. Zudem könnte langfristig der Kollaps des marinen Eisschildes der Antarktis einen substantiell höheren Beitrag zum Meeresspiegelanstieg leisten als in den aktuellen Projektionen angenommen (IPCC 2019). Aussagen hierüber sind dem IPCC-Bericht nach jedoch noch von großer Unsicherheit geprägt, da die entsprechenden Modelle die Prozesse derzeit nicht realistisch abbilden.

Ein höherer Meeresspiegel führt zu einem häufigeren Auftreten von Sturmflutwasserständen, da diese ein höheres Ausgangsniveau vorfinden. Mit der Konsequenz, dass diese extremen Wasserstände, welche heute statistisch gesehen beispielsweise 1-mal in 100 Jahren vorkommen, in der Zukunft unter allen RCP-Szenarien häufig sein werden (IPCC 2019).

Abbildung 25 zeigt eine solche Änderung am Beispiel Cuxhavens, wo ein 100-jähriges Ereignis je nach RCP-Szenario am Ende des 21. Jh. statistisch gesehen etwa alle 10-20 Jahre auftreten würde. Das bedeutet, dass sich die Jährlichkeit eines solchen Ereignisses infolge des Meeresspiegelanstiegs relativ drastisch reduziert. Bereits ein geringerer Meeresspiegelanstieg bzw. eine Zunahme extremer Wasserstände von nur wenigen Dezimetern hat eine deutliche Zunahme der Häufigkeit, d.h. ein geringeres Wiederkehrintervall, zur Folge.

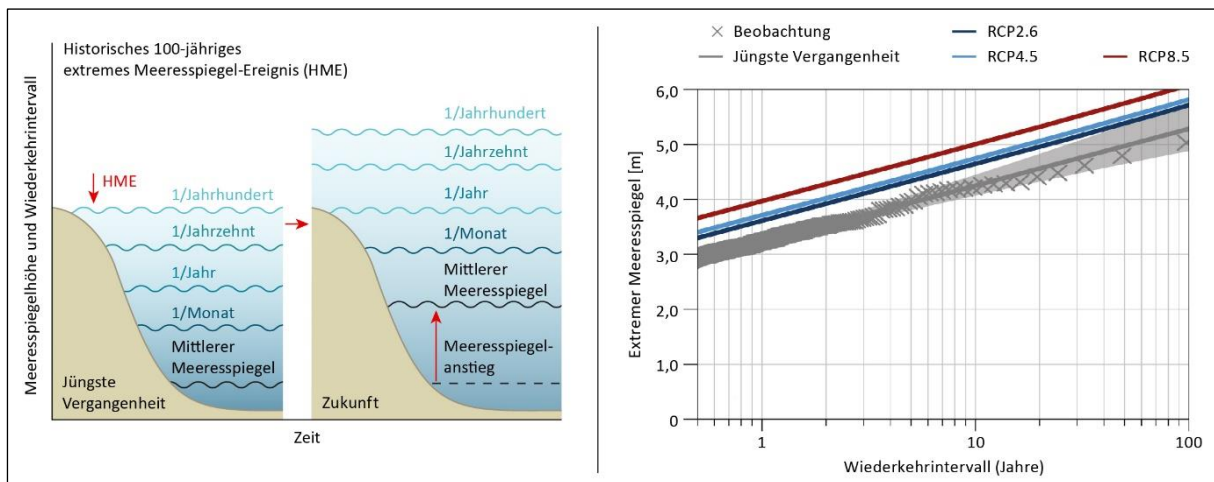


Abbildung 25: Änderung des Wiederkehrintervalls extremer Wasserstände durch den Meeresspiegelanstieg. Links: Generell, rechts: Pegel Cuxhaven, 2081-2100 im Vergleich zu 1986-2005 (IPCC 2019).

Das Helmholtz-Zentrum Hereon (ehemals Geesthacht) veröffentlicht im Sturmflutmonitor seine Auswertung der vergangenen Sturmflutseasons an den Nordseepegel Husum,

Helgoland, Cuxhaven, Hamburg-St. Pauli, Bremen-Weserwehr und Norderney sowie der Ostseepegel Flensburg, Kiel-Holtenau, Travemünde und Warnemünde. An den Pegeln Husum, Cuxhaven und Norderney zeigt sich eine Zunahme der Höhe von Sturmflutwasserständen, welche laut der Analyse des Helmholtz-Zentrums im Wesentlichen auf den Anstieg des mittleren Meeresspiegels zurückzuführen ist. Entsprechend lässt sich an den Pegeln auch eine Zunahme der Häufigkeit leichter Sturmfluten beobachten. Die Sturmflutwasserstände an den Pegeln Hamburg-St. Pauli und Bremen-Weserwehr sind im Wesentlichen durch wasserbauliche Maßnahmen beeinflusst. Am Nordseepegel Helgoland sowie den Ostseepegeln zeigt sich bisher keine langfristige Änderung von Höhe und Häufigkeit der Sturmflutwasserstände. (Helmholtz-Zentrum Hereon 2021c)

4.3.2 Windverhältnisse

Windverhältnisse und Zyklonenaktivität zeigen für Deutschland starke dekadische Schwankungen, ein Langzeittrend ist nicht ersichtlich (Pinto und Reyers 2017). Vom Norddeutschen Klimabüro wurden historische Stations- und Modelldaten, beispielsweise Temperatur, Niederschlag und Wind, für Norddeutschland ausgewertet und diese Auswertung im Norddeutschen Klimamonitor zusammenfassend dargestellt (Helmholtz-Zentrum Hereon 2021b). Die Auswertung der Sturmintensität, d.h. dem maximalen Betrag des Windvektors in 10 m Höhe, im Norddeutschen Klimamonitor für die Messstation in Bremen, zeigt exemplarisch die dekadischen Schwankungen und den fehlenden Langzeittrend. In einer Literaturstudie über die Änderung der Sturmaktivität in Nordwesteuropa ist in der Mehrzahl der Studien für die Nordsee eine Zunahme der Sturmhäufigkeit und -intensität und für die Ostsee eine Zunahme der Sturmintensität bis zum Ende des 21. Jahrhunderts festgestellt worden (Feser et al. 2015). Für die Ostsee kann auf Basis der Studie über die zukünftige Änderung der Sturmhäufigkeit keine klare Aussage getroffen werden. Das Norddeutsche Klimabüro hat neben dem Norddeutschen Klimamonitor auch die Auswertung von über 120 regionalen Klimaszenarien aus verschiedenen Forschungsprojekten im sogenannten Norddeutschen Klimaatlas für unterschiedliche Parameter, darunter die Sturmintensität, zusammengefasst (Helmholtz-Zentrum Hereon 2021a). Die Angaben im Norddeutschen Klimaatlas zeigen zukünftig sowohl eine mögliche Zunahme als auch eine mögliche Abnahme von Sturmhäufigkeit und -intensität (Tabelle 15).

Tabelle 15: Mögliche Änderung von Wind und Wind bezogenen Kenntagen für Nord- und Ostsee relativ zum Zeitraum 1961-1990 (Daten: Helmholtz-Zentrum Hereon 2021a).

		Nahe Zukunft (2036-2065)			Ferne Zukunft (2071-2100)		
		Kleinste Änderung/ größte Abnahme	Mittlere Änderung	Größte Änderung/ größte Zunahme	Kleinste Änderung/ größte Abnahme	Mittlere Änderung	Größte Änderung/ größte Zunahme
Nordsee							
Mittlere Windgeschwindigkeit	Jahr	-3 %	0 %	+4 %	-4 %	0 %	+7 %
	Winter	-6 %	+1 %	+7 %	-7 %	+3 %	+14 %
Sturmintensitäten ¹	Winter	-5 %	+1 %	+11 %	-7 %	+2 %	+9 %
Sturmtage ²	Jahr	-9 Tage	+1 Tag	+14 Tage	-10 Tage	+1 Tag	+14 Tage
Ostsee							
Mittlere Windgeschwindigkeit	Jahr	-2 %	+1 %	+5 %	-5 %	+1 %	+5 %
	Winter	-4 %	+2 %	+11 %	-8 %	+3 %	+10 %
Sturmintensitäten ¹	Winter	-4 %	+2 %	+11 %	-8 %	+3 %	+10 %
Sturmtage ²	Jahr	-6 Tage	+1 Tag	+12 Tage	-7 Tage	+2 Tage	+14 Tage
¹ Maximaler Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe.							
² Anzahl der Tage, an denen die maximale Windgeschwindigkeit 8 Bft. überschreitet ($v_{\max} > 62$ km/h).							

Die Windgeschwindigkeiten zeigen aufgrund der natürlichen internen Variabilität der Atmosphäre starke dekadische Schwankung. Die dekadische Schwankung der Windgeschwindigkeiten ist häufig größer als der langfristige Trend, so dass sich keine signifikanten Änderungen beobachten lassen. Zudem finden sich Unterschiede zwischen verschiedenen Klimamodellen, welche teilweise wahrscheinlich den verschiedenen Anfangsbedingungen der Modelle zuzuschreiben sind. Dabei zeigen die verschiedenen Klimamodelle zukünftig sowohl eine mögliche Zu- als auch Abnahme der Windgeschwindigkeit. Aufgrund der dekadischen Variabilität treten stärkere Windgeschwindigkeiten nicht unbedingt erst zum Ende des Jahrhunderts auf. Die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle scheinen zudem stärker vom Antrieb des globalen Klimamodells (z.B. ECHAM, BCM, MPI-OM) abhängig zu sein als von der Wahl des regionalen Klimamodells (z.B. REMO, CLM, HIRHAM). (Ganske et al. 2016)

In einigen Studien zeigt sich eine Zunahme der Häufigkeit von starken Winden aus westlicher Richtung für die Nordsee (de Winter et al. 2013, Gaslikova et al. 2013) und eine Zunahme der Häufigkeit von Westwindlagen für die Ostsee (Dreier et al. 2015). Gleichzeitig ist über der Nordsee mit einer Abnahme der Häufigkeit der Wetterlage Südost und Nordost zu rechnen (Brienen et al. 2020).

4.3.3 Wellen und Seegang

4.3.3.1 Grundlagen Wellen und Seegang

Es folgt eine kurze Einführung in die Grundlagen von Wellen und Seegang. Für eine vertiefte Übersicht wird auf die Empfehlungen für Küstenschutzwerke des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (EAK 2020) verwiesen.

Gezeiten, Windstau und Windwellen können alle letztlich als Wellen, d.h. einer periodischen Änderung in Raum und Zeit, beschrieben werden. Sie unterscheiden sich dabei allerdings in ihrer hauptsächlich einflussnehmenden Entstehungskraft. Gezeiten, mit der Haupteinflusskraft von Sonne und Mond, sowie Windstau, mit der Haupteinflusskraft von Sturmsystemen, weisen große Wellenperioden mit entsprechend großen Wellenlängen auf. Vom Wind verursachte Wellen haben hingegen vergleichsweise kurze Wellenperioden (vgl. Abbildung 26).

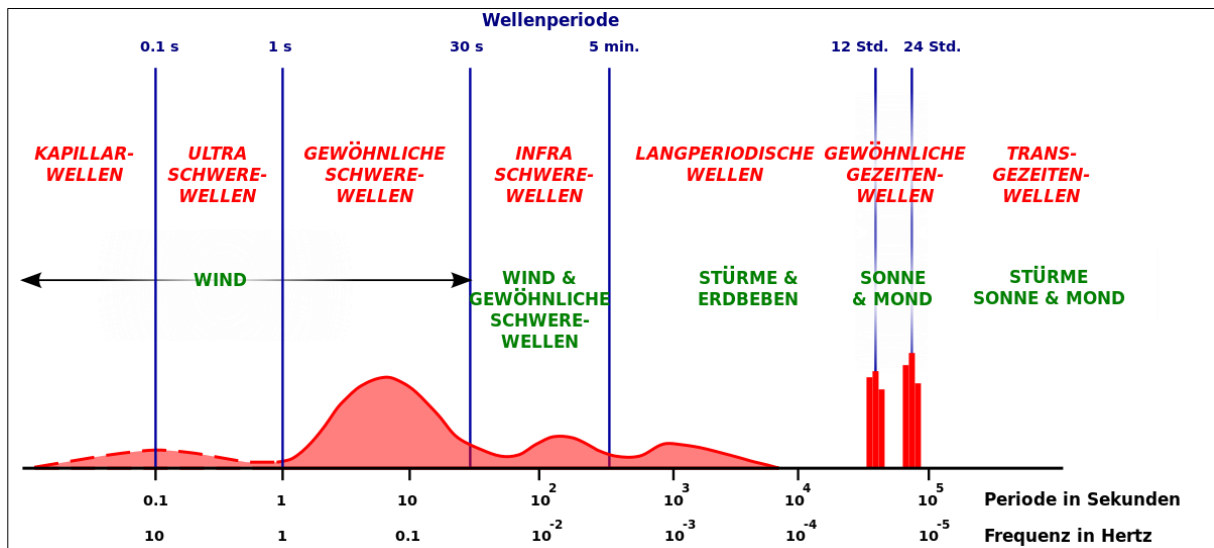


Abbildung 26: Bezeichnung, anregende Kraft und relative Amplitude von Meereswellen, klassifiziert nach Munk (Kraaiennest, Wikipedia Wasserwellen)

Nimmt man für Wellen vereinfachend die Form einer Sinuskurve an, können sie mit der linearen Wellentheorie nach Airy und Laplace beschrieben werden. Abbildung 27 zeigt eine solche symmetrische (harmonische) Welle und die eine Welle charakterisierenden Begriffe, zu denen Wellenhöhe (H), Wellenlänge (L), Wellenperiode (T) bzw. dessen Kehrwert die Frequenz (f) und Wellenfortschrittsgeschwindigkeit (c) gehören. Infolge der Wellenbewegung kommt es nach der linearen Wellentheorie vor allem zu einem Energietransport und nicht zu einem Massentransport. Dabei bewegen sich die Wasserteilchen auf Kreisbahnen (Orbitalbahnen), deren Radius mit der Tiefe abnimmt, bis der Einfluss der Wellenbewegung in

einer Wassertiefe, welche $\frac{1}{2}$ der Wellenlänge entspricht, soweit abgenommen hat, dass der Energietransport seinen Einfluss verliert. Ist die Wassertiefe allerdings geringer als $\frac{1}{2}$ der Wellenlänge, gewinnt der Meeresboden an Einfluss und die Kreise verformen sich zu Ellipsen, die mit abnehmender Wassertiefe immer gestreckter werden. Klassischerweise werden daher in Abhängigkeit aus dem Verhältnis von Wassertiefe zu Wellenlänge der Tiefwasser, Übergangs- und Flachwasserbereich unterschieden. Durch die Grundberührung nimmt die Wassertiefe Einfluss auf die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit (siehe Tabelle 16) und die sogenannten Flachwassereffekte mit einer Verformung der Welle setzen ein. Die Abhängigkeit von der Wassertiefe veranschaulicht die Einflussnahme des Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten, Windstau und Windwellen.

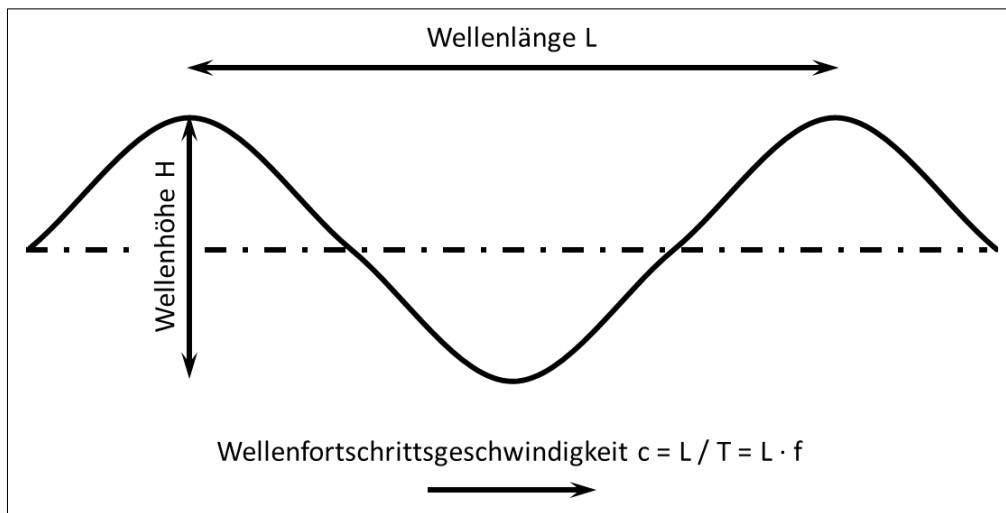


Abbildung 27: Definition von Wellenhöhe, Wellenlänge, Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und Wellenperiode bzw. Frequenz

Tabelle 16: Einteilung von Tiefwasser-, Übergangs- und Flachwasserbereich anhand der relativen Wassertiefe d/L sowie Berechnung der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c nach der linearen Wellentheorie (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen 2007, 2020)

Bereich	d/L	c
Tiefwasser	$\geq 0,5$	$c = \frac{L}{T}$
Übergangsbereich	$0,5 > d/L > 0,05$	$c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g \cdot L}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi}{L} \cdot d\right)}$
Flachwasser	$\leq 0,05$	$c = \frac{L}{T} = \sqrt{g \cdot d}$

Die Wellenhöhe wird maßgeblich durch Windgeschwindigkeit, Windwirklänge und Dauer der Windeinwirkung geprägt. Für die konstruktive Bemessung wasserbaulicher Anlagen sind

häufig die extremen Bedingungen während eines Sturmereignisses relevant. Die Wellenhöhe kann nicht unendlich groß werden. Sie wird dadurch begrenzt, dass nach längerer Einwirkdauer Wellenfortschrittsgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit gleich groß sind, so dass kein weiterer Energieeintrag und somit keine Zunahme der Wellenhöhe mehr möglich ist, die Welle bzw. der Seegang ist dann voll ausgereift. Die Überlagerung von Windwellen unterschiedlicher Höhe, Periode und Richtung wird als Seegang bezeichnet. Damit der Zustand des voll ausgereiften Seegangs erreicht wird, muss der Wind ausreichend lange wirken. Ist das nicht der Fall, spricht man von dauerbegrenztem Seegang. Darüber hinaus kann die Windwirklänge (Fetch) ein begrenzender Faktor für die Wellenhöhe sein. Die Windwirklänge wird durch die Größe der Wasserfläche, über die der Wind streicht oder die Größe des Windfelds festgelegt, je nachdem woraus sich der begrenzende maximal mögliche Fetch ergibt. Der anzusetzende Fetch hängt also von der Form des Küstenverlaufs und der Windrichtung sowie von der Größe des Windfelds ab. Die Windrichtung bestimmt zudem die Richtung aus der die Wellen in Richtung Küste laufen. Neben der Winddauer kann auch die Fetchlänge den Energieeintrag begrenzen, so dass kein voll ausgereifter Seegang entstehen kann. Daher werden die drei Zustände voll ausgereifter, fetch- und dauerbegrenzter Seegang unterschieden.

Im Tiefwasser hat die Wassertiefe keinen Einfluss auf die Wellenhöhe. Im Übergangs- und Flachwasserbereich erfahren die Orbitalbahnen jedoch eine Grundberührung, so dass Wassertiefe und die sogenannten Flachwassereffekte, welche beim Einlaufen der Welle in Küstennähe auftreten, Einfluss auf die Wellenparameter nehmen. Ähnlich wie beim Windstau hat die auf ein Bauwerk treffende Welle eine starke lokale Komponente, da sie durch Gegebenheiten wie Dauer des Sturms, Windrichtung und –wirklänge, Wassertiefe und Verlauf der Küstenlinie geprägt ist.

Für einfache Windfelder, d.h. eine mittlere, konstante Windgeschwindigkeit während der betrachteten Winddauer, können die für die Bemessung wasserbaulicher Anlagen erforderlichen Seegangparameter anhand von empirisch und theoretisch ermittelten Zusammenhängen mit Hilfe von Formeln oder Diagrammen bestimmt werden (vgl. EAK 2020, CERC 1984). Bei den Berechnungen wird zwischen Tief- und Übergangs-/Flachwasserbereich unterschieden. Abbildung 28 zeigt beispielhaft die grafische Ermittlung der Seegangparameter für Tiefwasserbedingungen für eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s und verschiedene Fetchlängen nach dem Shore Protection Manual (SPM, CERC 1984). Die Wellenparameter sind im Tiefwasser unabhängig von der Wassertiefe, so dass lediglich die

Windgeschwindigkeit und letztlich die Windrichtung aufgrund ihres Einflusses auf die Fetchlänge im Rahmen des Klimawandels Änderungen der Wellenparameter bewirken können. Es ist bisher noch unsicher, ob eine Änderung des zukünftigen Windklimas an der Deutschen Küste zu erwarten ist (Weiße und Meinke 2017).

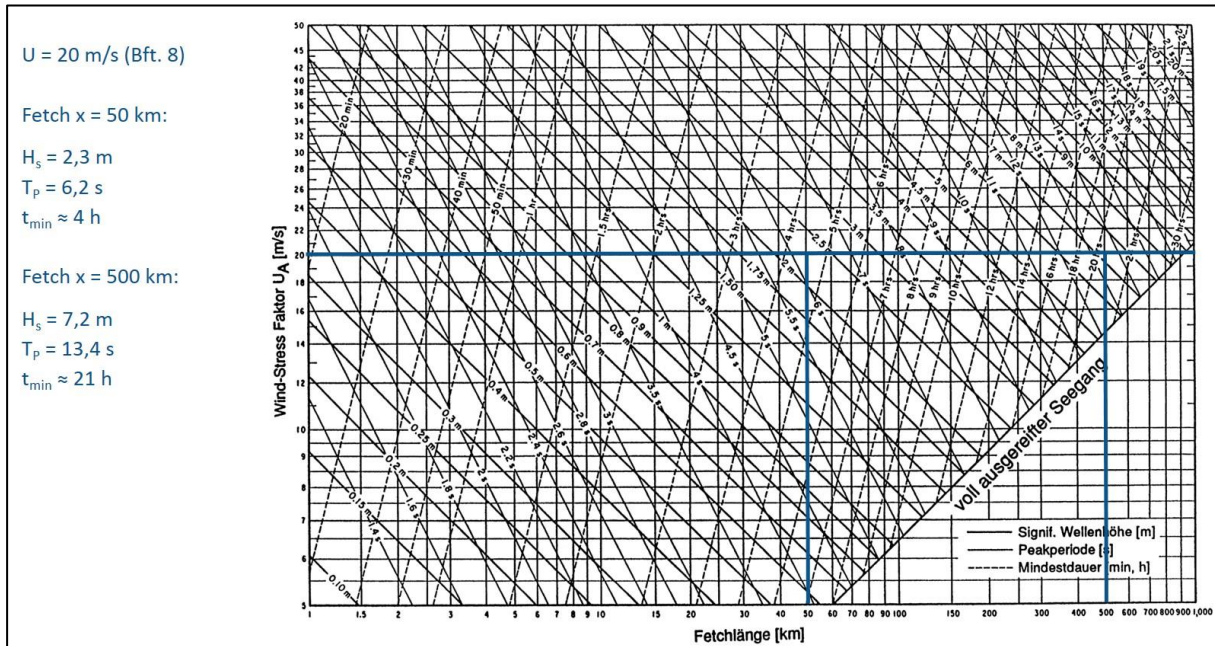


Abbildung 28: Grafische Ermittlung der signifikanten Wellenhöhe (H_s) und der Peakperiode (T_p) nach dem SPM für eine Windgeschwindigkeit von 20 m/s und Fetchlängen von 50 km und 500 km. t_{min} beschreibt die minimale erforderliche Sturmdauer. Grafik: EAK 2020.

4.3.3.2 Seegangparameter: Einfluss von Windgeschwindigkeit und Meeresspiegel

4.3.3.2.1 Windfeld

Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit hat eine Zunahme von Wellenhöhe und Wellenperiode bzw. -länge zur Folge, allerdings nicht zwingend im selben Maß wie die Windgeschwindigkeit zunimmt. Für voll ausgereiften Seegang besteht ein quadratischer Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe, so dass die Wellenhöhe stärker zunimmt als die Windgeschwindigkeit. Für die Wellenperiode sowie für dauer- und fetchbegrenzten Seegang besteht dieser Zusammenhang nicht mehr; für tiefenbegrenzten Seegang ist der Zusammenhang am komplexesten (vgl. Gl. 4-1). Bei fetch- und dauerbegrenztem Seegang erhöht sich die signifikante Wellenhöhe H_s (das arithmetische Mittel der 33% höchsten Wellen) bei den hier betrachteten Windgeschwindigkeiten prozentual in etwa im selben Maße wie die Windgeschwindigkeit zunimmt (Abbildung 29). Die Peakperiode T_p (Periode bei der die Energiedichtefunktion ihr Maximum hat) nimmt unter

diesen Bedingungen jedoch nur etwa um 1/3 der prozentualen Zunahme der Windgeschwindigkeit zu. Bei voll ausgereiftem Seegang hat eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit in der durch den Klimawandel zu erwartenden Bandbreite eine etwa doppelt so große prozentuale Zunahme von H_S (Abbildung 29) und eine etwa gleich große prozentuale Zunahme von T_P zur Folge. Im Fall von voll ausgereiftem Seegang gilt es jedoch zu überprüfen, ob die aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeit erforderliche minimale Windwirklänge und –dauer immer noch die erforderlichen Größen für das Erreichen eines voll ausgereiften Seegangs erreichen. Bei den in der Bemessung wasserbaulicher Anlagen an der See anzusetzenden Windgeschwindigkeiten wird ein voll ausgereifter Seegang erst bei einer Fetchlänge von rund 1.000 km und einer erforderlichen Sturmdauer von rund 30 Stunden erreicht - Werte, die infolge der örtlichen und zeitlichen Begrenzung der Windfelder kaum zu erreichen sind. Zudem ergeben sich bei Sturmereignissen Wellenhöhen mit entsprechend großen Wellenlängen (im gewählten Beispiel betragen die Wellenlängen: $L = 65$ m für $x = 50$ km und $L = 300$ m für $x = 500$ km), welche aufgrund der geringen mittleren Wassertiefen im Bereich der deutschen Küsten das Kriterium des Tiefwasserbereichs ($d/L < 0,5$) häufig nicht erfüllen.

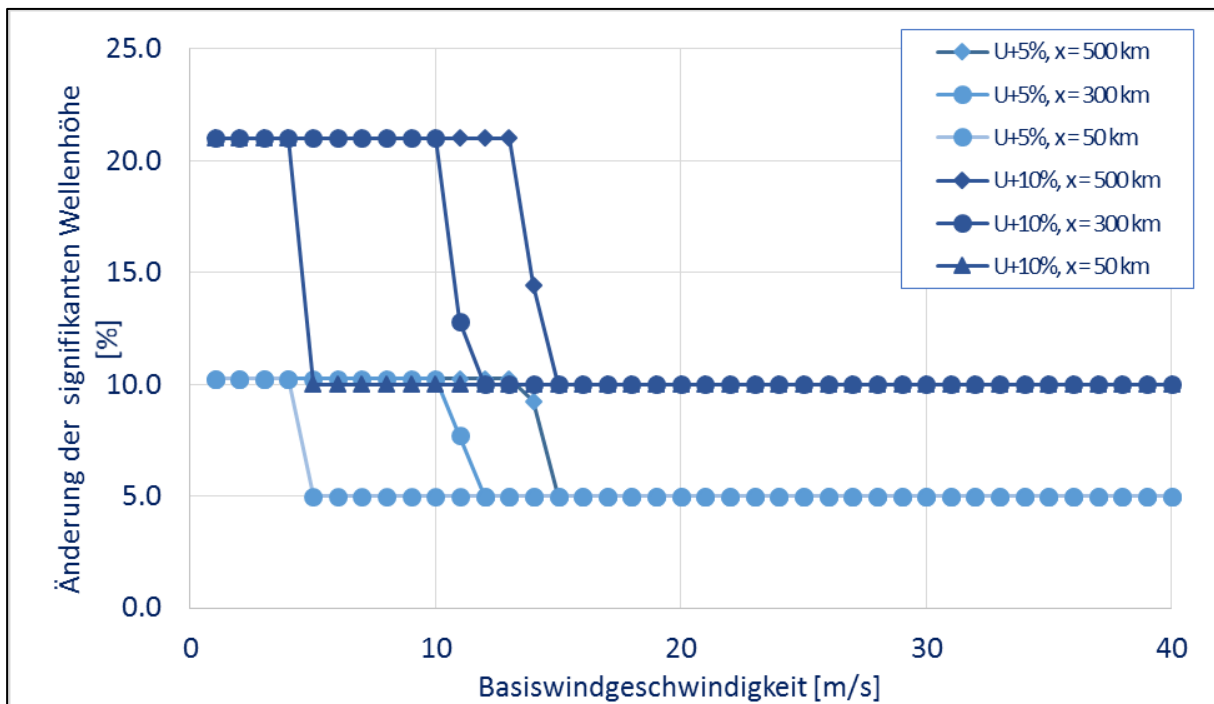


Abbildung 29: Prozentuale Änderung der signifikanten Wellenhöhe im Tiefwasser aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeit (U) von 5% bzw. 10% für unterschiedliche Fetchlängen (x) von 50, 300 bzw. 500 km.

ebenfalls Nomogramme oder die folgenden Formeln (nach EAK 2020) verwendet werden:

$$H_s = 0,283 \cdot \tanh \left[0,53 \cdot \left(\frac{g \cdot d}{U^2} \right)^{3/4} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0,00565 \cdot \left(\frac{g \cdot x}{U^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0,53 \cdot \left(\frac{g \cdot d}{U^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \cdot U^2 \cdot \frac{1}{g} \quad \text{Gl. 4-1}$$

$$T_p = 7,54 \cdot \tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{g \cdot d}{U^2} \right)^{3/8} \right] \cdot \tanh \left\{ \frac{0,0379 \cdot \left(\frac{g \cdot x}{U^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0,833 \cdot \left(\frac{g \cdot d}{U^2} \right)^{3/8} \right]} \right\} \cdot U \cdot \frac{1}{g} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$t = 5,37 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{g \cdot T_p}{U} \right)^{7/3} \cdot U \cdot \frac{1}{g} \quad \text{Gl. 4-3}$$

H_s	Signifikante Wellenhöhe [m]
T_p	Peakperiode [s]
t	Minimale Sturmdauer [s]
x	Windwirklänge (Fetch) [m]
U	Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]
d	Wassertiefe [m] – Gültigkeitsbereich: Ebener, horizontaler Meeresboden
g	Erdbeschleunigung [m/s]

Die zugehörige Wellenlänge (L) wird nach der linearen Wellentheorie im Übergangsbereich iterativ wie folgt berechnet (Wiegel 1964):

$$L = \frac{g}{\left(\frac{2\pi}{T_p} \right)} \cdot T_p \cdot \tanh \left(\frac{2\pi}{L} \cdot d \right) \quad \text{Gl. 4-4}$$

Anhand der Gleichungen (Gl. 4-1 und Gl. 4-2) wird ersichtlich, dass im Übergangs- bzw. Flachwasserbereich die Wassertiefe in die Bestimmung der Seegangparameter einfließt. Tabelle 17 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsstudie, welche den möglichen Einfluss des Klimawandels auf die Eingangsparameter Windgeschwindigkeit und Wasserstand untersucht. Die gewählten Beispiele beinhalten unterschiedliche Fetchlängen und mittlere Wassertiefen. Grundsätzlich fallen im Übergangs- und Flachwasserbereich aufgrund der Grundberührung bei sonst gleichen Bedingungen die Wellenhöhe geringer und die Wellenperiode kürzer aus als im Tiefwasser. Sowohl eine Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit als auch der mittleren Wassertiefe bewirkt erwartungsgemäß eine Zunahme der signifikanten Wellenhöhe und der Wellenperiode, die minimale erforderliche Sturmdauer nimmt allerdings ab. Die Zunahme der Windgeschwindigkeit bewirkt wie im Tiefwasser eine ähnlich große Zunahme

der signifikanten Wellenhöhe und eine geringere Zunahme der Wellenperiode. Für Starkwindereignisse sowie für im Rahmen des Klimawandels mögliche Änderungsraten kann in etwa der gleiche Zusammenhang für die Zunahme der Windgeschwindigkeit und die Änderung der Seegangparameter wie für Tiefwasserbedingungen abgeleitet werden. Grundsätzlich besteht für tiefenbegrenzten Seegang im Übergangs-/ und Flachwasserbereich jedoch ein anderer mathematischer Zusammenhang als unter Tiefwasserbedingungen, wodurch die Gültigkeit der Aussage auf den angegebenen Bereich beschränkt ist und zudem als eine grobe Näherung zu sehen ist. Insbesondere bei geringeren Windgeschwindigkeiten kann eine Zunahme der Windgeschwindigkeit eine größere Zunahme der Wellenhöhe zur Folge haben (vgl. Abbildung 30). Für die Bemessung wasserbaulicher Anlagen sind diese Zustände mit relativ geringen Windgeschwindigkeiten, wie bereits erwähnt, nicht von Bedeutung, allerdings sind solche Bedingungen aus nautischer und operativer Sicht von Relevanz. Der Meeresspiegelanstieg ist relativ zu den vorhandenen mittleren Wassertiefen gering und hat daher einen aus Ingenieursicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Seegangparameter. Bei geringen Wassertiefen, wie sie über den Wattflächen der Nordsee oder in kleinen Buchten und den Boddengewässern der Ostsee vorkommen, kann der Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs auf die Seegangparameter hingegen maßgebend sein.

Tabelle 17: Sensitivitätsstudie zum potentiellen Einfluss klimatischer Änderungen auf Wellenparameter, berechnet nach dem SPM für den Übergangsbereich. Im Fall 1 ist die Fetchlänge $x = 500$ km und die Wassertiefe $d = 50$ m, im Fall 2 ist $x = 50$ km und $d = 17,5$ m.

	H_s [m]	ΔH_s [%]	T_p [s]	ΔT_p [%]	t [h]	Δt [%]	L [m]	ΔL [%]
$x = 500$ km, $d = 50$ m								
U = 20 m/s	5,16	-	9,24	-	10,35	-	131,19	-
U = 22 m/s (+ 10%)	5,65	10	9,67	5	10,12	-2	142,68	9
U = 20 m/s, MSA + 1 m	5,19	0,6	9,27	0,3	10,41	0,6	132,01	0,6
U = 22 m/s, MSA + 1 m	5,65	10	9,67	5	10,12	-2	142,68	9
$x = 50$ km, $d = 17,5$ m								
U = 20 m/s	1,95	-	5,23	-	2,81	-	43,06	-
U = 22 m/s (+ 10%)	2,12	9	5,46	3	2,67	-5	45,84	6
U = 20 m/s, MSA + 1 m	1,98	1	5,31	0,5	2,84	1	43,58	1
U = 22 m/s, MSA + 1 m	2,15	10	5,49	4	2,70	-4	46,44	8

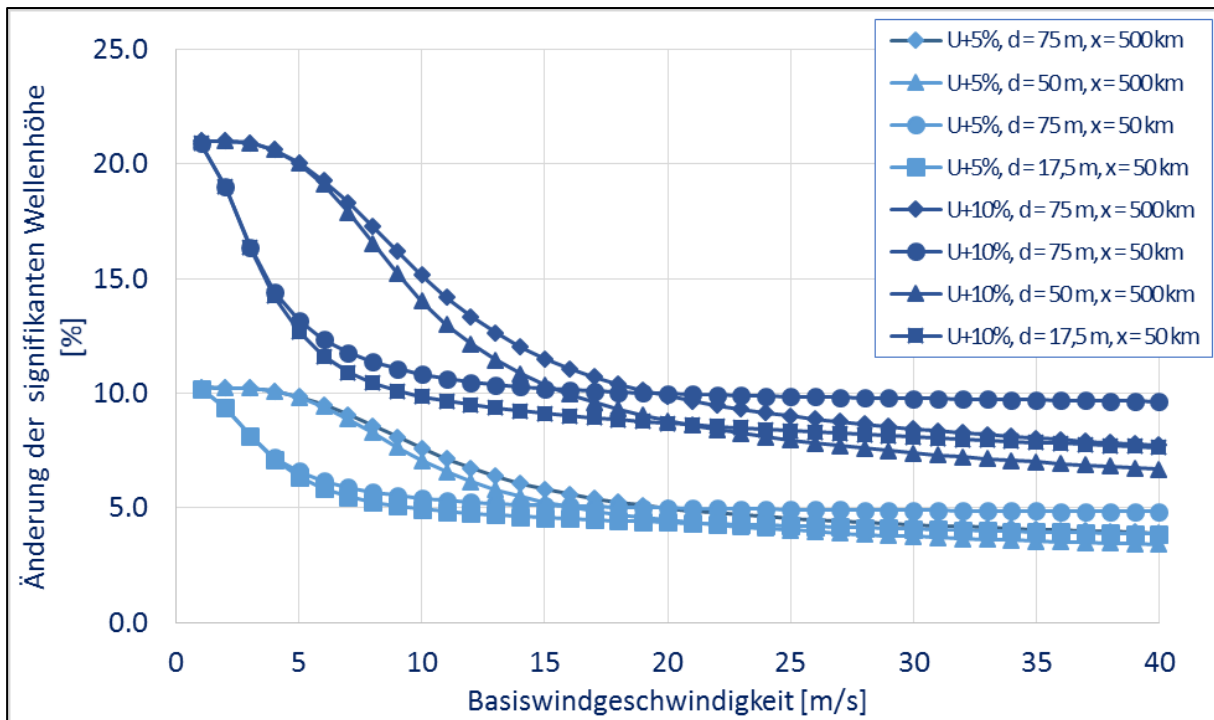


Abbildung 30: Prozentuale Änderung der signifikanten Wellenhöhe im Übergangsbereich aufgrund der Zunahme der Windgeschwindigkeit (U) von 5% bzw. 10% für unterschiedliche Wassertiefen (d) und Fetchlängen (x) von 50, 300 bzw. 500 km.

Die hier dargestellte Sensitivitätsanalyse liefert lediglich einen Eindruck hinsichtlich der Bedeutung des Klimawandels für die ingenieurmäßige, vereinfachende Ermittlung der Seegangparameter anhand des Verfahrens SPM 1984. Die Berechnungsansätze beinhalten verschiedene maßgebende Vereinfachung, z.B. die Beschränkung auf den Ansatz einer mittleren Wassertiefe im Gebiet der Seegangsgenerierung und somit dem Ansatz eines ebenen, horizontalen Meeresgrunds. Liegt im Berechnungsgebiet ein unebener Meeresgrund mit signifikanten Untiefen vor, kann der bei einem Sturmereignis tatsächlich erzeugte Seegang maßgebend vom Ergebnis des vereinfachten SPM 1984-Ansatzes abweichen. Zudem sind küstennah neben der Generierung des Seegangs auf See die wellenumformenden Prozesse im Flachwasser zu beachten. Höher aufgelöste numerische Verfahren zur Seegangsvorhersage können hier realitätsnähere Ergebnisse liefern.

4.3.3.2 Flachwassereffekte

Mit steigendem Meeresspiegel findet eine Änderung der Flachwassereffekte des einlaufenden Seegangs statt. Im Folgenden wird das Einlaufen der signifikanten Welle in den Küstenbereich unter Einbeziehung des Meeresspiegelanstiegs betrachtet. Für eine grundlegende Übersicht

zum Thema Flachwassereffekte (Shoaling, Refraktion, Wellenbrechen) wird auf die EAK 2002 (EAK 2020) verwiesen.

Für die Sensitivitätsanalyse eines Bemessungsseegangs wird beispielhaft ein Küstenbereich in Warnemünde an der Ostsee betrachtet. In dem Vergleich wird der IST-Zustand mit den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 und den jeweiligen minimalen, mittleren und maximalen Meeresspiegelanstiegen aus dem IPCC-Sonderbericht Ozeane und Kryosphäre (IPCC 2019) sowie mit extremen Meeresspiegelanstiegen von 1,50 m und 2,0 m verwendet (Tabelle 18). 'Min.' und 'Max.' beschreiben das untere bzw. obere Ende der Schwankungsbreite und 'Mittel' ist der Median der Ergebnisse der unterschiedlichen Klimamodelle. Neben dem Meeresspiegelanstieg werden auch verschiedene Windgeschwindigkeiten für die Berechnung des Bemessungsseegangs untersucht, wobei 20 m/s als geringster und 30 m/s als höchster Eingangswert angenommen werden.

Tabelle 18: Überblick der betrachteten projizierten Meeresspiegelanstiege der Klimaszenarien RCP2.6, 4.5, 8.5 und deren Schwankungsbreiten (IPCC, 2019) sowie die gewählten extremen Meeresspiegelanstiege (MSA) 1,5 m und 2,0 m

Spannweite	Klimaszenario					
	IST	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	MSA 1,5	MSA 2,0
Min.	0 m	0,29 m	0,39 m	0,61 m	1,50 m	2,00 m
Mittel		0,43 m	0,55 m	0,84 m		
Max.		0,59 m	0,72 m	1,10 m		

Folgende Eingangswerte wurden aus entsprechenden Kartenmaterialien für ein Entstehungsbiet aus der Windrichtung Nord-Nord-Ost für die Beispielsrechnung ermittelt:

- Mittlere Wassertiefe im Entstehungsgebiet⁷⁵: 15m
- Gemittelte Fetchlänge⁷⁶: 140 km

Der Bemessungsseegang im Windfeld wird analytisch auf Grundlage des Shore Protection Manual (SPM 1984) für den Übergangsbereich ermittelt (Gl. 4-1 bis Gl. 4-4). Abbildung 31 zeigt die berechneten signifikanten Wellenhöhen für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Meeresspiegelanstiege. Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass in Abhängigkeit des betrachteten Meeresspiegelanstiegs zwar ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhe zu verzeichnen ist, der Einfluss der Windgeschwindigkeit jedoch eine erheblich größere Auswirkung auf den Seegang aufweist. Dementsprechend können zukünftig einwirkende

⁷⁵ Information auf der Homepage von Navionics. Verfügbar unter: <https://www.navionics.com/deu/navionics-upd-baltic-sea.html>

⁷⁶ Google Earth

Seegangparameter in Kombination aus dem Meeresspiegelanstieg und ggf. steigenden Windgeschwindigkeiten größer ausfallen als der in der Planung berücksichtigte Bemessungsseegang der bestehenden wasserbaulichen Anlagen, was sich negativ auf die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Bauwerke auswirken kann.

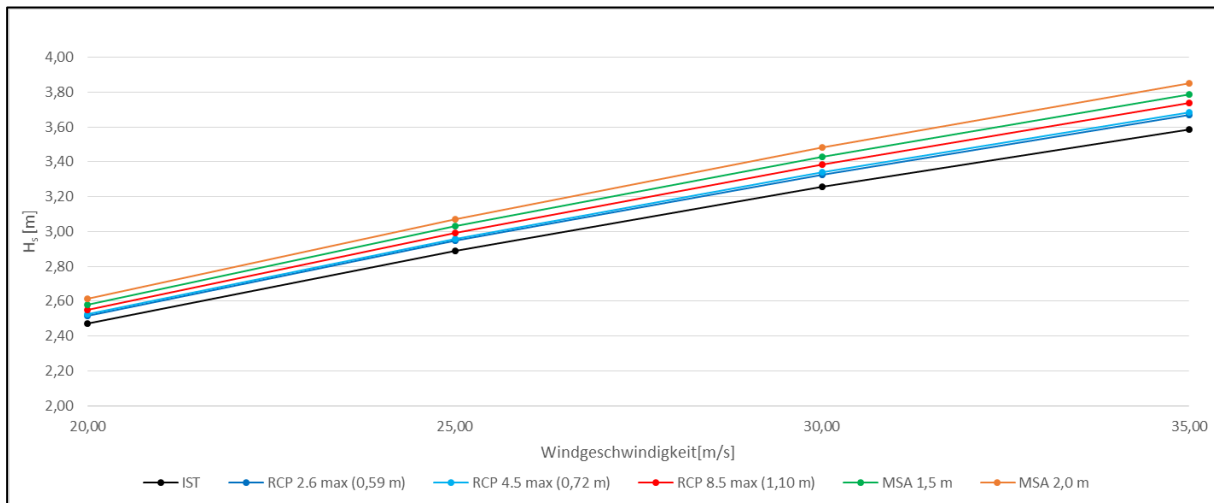


Abbildung 31: Berechnete signifikante Wellenhöhen im betrachteten Windfeld mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten und maximalen Meeresspiegelanstiegen aus den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5, 8.5 sowie 1,5 m und 2,0 m

Ein Flachwassereffekt ist die Refraktion, bei der Änderungen der Wellenanlaufung und der Wellenhöhe infolge von Grundberührung entstehen. Bei schräg einlaufenden Wellen gelangt die vordere Seite der Welle früher ins flache Wasser als der hintere Bereich. Dabei verringert sich bei der Grundberührung die Wellengeschwindigkeit, wobei die Welle im tieferen Wasser noch mit gleichbleibender Geschwindigkeit weiterläuft. Daraufhin schwenkt sich die Welle zur Uferlinie ein. Je nach Verlauf der Küstenlinie kann sich die refraktierte Welle erhöhen oder verringern. Bei der beispielhaften Berechnung der signifikanten Wellenhöhe am Wellenbrecher wird angenommen, dass kein schräger Wellenanlauf auf die Küste vorhanden ist und dementsprechend keine Abminderung der signifikanten Wellenhöhe durch Refraktion zu betrachten ist.

Beim senkrecht auf die Küstenlinie erfolgenden Einlaufen der findet eine Änderung der Wellenhöhe aufgrund von Shoaling statt. Infolge der Grundberührung erfolgt eine Änderung der Wellenfortschrittgeschwindigkeit wodurch die Wellenlänge abgemindert, die Wellenhöhe

anfänglich verringert, dann jedoch vergrößert wird. Der Shoalingkoeffizient k_s wird nach Goda (2010) wie folgt ermittelt:

$$k_s = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 + \frac{\left(\frac{4\pi d}{L_0} \right)}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L_0} \right)} \right) \tanh\left(\frac{2\pi d}{L_0} \right) \right]}} \quad \text{Gl. 4-5}$$

k_s	Shoalingkoeffizient [-]
d	Wassertiefe [m]
L_0	Wellenlänge im Tiefwasser [m]

Neben Refraktion und Shoaling ist das Wellenbrechen ein weiterer Bestandteil der Flachwassereffekte. Das Brechen der Wellen findet gemäß EAK 2002 nicht an einer stationären Brecherlinie statt, sondern erstreckt sich, bedingt durch die Unregelmäßigkeit des Seegangs und den sich ggf. mit den Gezeiten ändernden Wasserständen, über die sogenannte Brecherzone. Dabei Brechen die höchsten Wellen zuerst. Die Wassertiefe, an der die ersten Wellen brechen, kann wie folgt ermittelt werden:

$$d_b = \frac{H_{\max}}{0,78} \text{ bzw. } \frac{H_s}{0,42} \quad \text{Gl. 4-6}$$

d_b	Wassertiefe am Brechpunkt [m]
H_{\max}	Maximale Wellenhöhe [m]
H_s	Signifikante Wellenhöhe [m]

Wird eine signifikante Wellenhöhe im Bereich der Brandungszone für Planungszwecke benötigt, kann ein vereinfachter analytischer Ansatz nach Goda (2010) verwendet werden:

$$H_{s,B} = \begin{cases} K_s * K_r * H_s & : d/L_0 \geq 0,2 \\ \min \left\{ \begin{array}{l} \beta_0 * K_r * H_s + \beta_1 * d \\ \beta_{\max} * K_r * H_s \\ K_s * K_r * H_s \end{array} \right\} & : d/L_0 < 0,2 \end{cases} \quad \text{Gl. 4-7}$$

$$\beta_0 = 0,028 * \left(\frac{K_r * H_s}{L_0} \right)^{-0,38} * \exp[20 * \tan^{1,5} \theta] \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$\beta_1 = 0,52 \exp[4,2 * \tan \theta] \quad \text{Gl. 4-9}$$

$$\beta_{\max} = \max \left\{ 0,92; 0,32 \left(\frac{K_r * H_s}{L_0} \right)^{-0,29} * \exp[2,4 * \tan \theta] \right\} \quad \text{Gl. 4-10}$$

$H_{s,B}$	Signifikante Wellenhöhe in der Brandungszone [m]
β	Beiwerte [-]
θ	Strandneigung 1/m [-]
K_s	Shoalingkoeffizient [-]
K_r	Refraktionskoeffizient [-]

In Abbildung 32 wird der Einfluss der Wassertiefe beim Einlaufen der signifikanten Wellenhöhe an die Küste vom IST-Zustand, den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 mit maximalem Meeresspiegelanstieg sowie einem Meeresspiegelanstieg von 1,5 m bzw. 2,0 m verdeutlicht. Beim Einlaufen in flacheres Wasser erfährt die Wellenhöhe vorerst eine gewisse Zunahme aufgrund von Shoaling bevor sie zu brechen beginnt und dadurch an Höhe verliert. Nach dem ersten Brechen der Welle ist gemäß der Berechnung zunächst eine konstante Wellenhöhe zu verzeichnen bevor diese mit geringer werdender Wassertiefe stetig abnimmt. Der konstante Verlauf ist auf die Auswahl des anzusetzenden Rechenverfahrens der geringsten signifikanten Wellenhöhe in der Brandungszone (Minimum aus Gl. 4-7 für $d/L_0 < 0,2$) mit dem Term $H_{S,B} = \beta_{\max} * K_r * H_s$ - zurückzuführen. Ohne Refraktion findet hier keine Änderung der Wellenhöhe statt, sofern $\beta_{\max} < 0,92$ ist oder ein anderer Term des Rechenverfahrens geringere Wellenhöhen ausgibt und als maßgebend für die Berechnung angesehen wird. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs erhöht sich die Wellenhöhe, allerdings verschiebt sich auch der Punkt, ab dem die Welle zu brechen beginnt, was für die Bemessung von wasserbaulichen Anlagen von Bedeutung ist. Im betrachteten Beispiel wurde eine maximale Verschiebung des Brechpunktes bezogen auf die Wassertiefe zwischen dem IST-Zustand und einem Meeresspiegelanstieg von 2,0 m von etwa 0,5 m ermittelt.

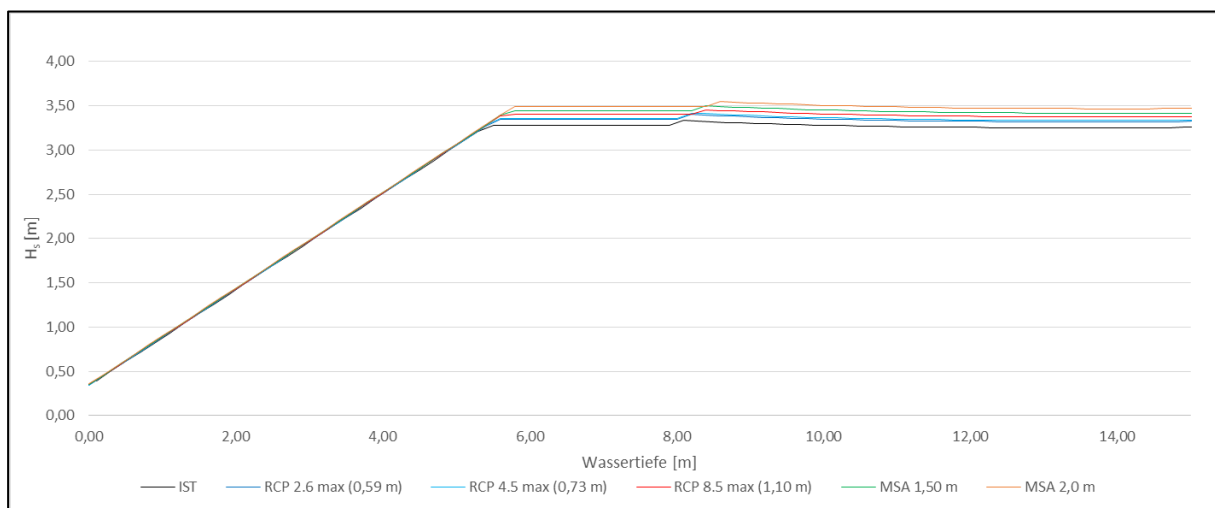


Abbildung 32: Verlauf der signifikante Wellenhöhe beim Einlaufen des Seegangs an die Küste mit abnehmender Wassertiefe bei einer Windgeschwindigkeit von 30 m/s und einer gemittelten Wasser-tiefe im Entstehungsgebiet von 15 m zzgl. den jeweiligen Meeresspiegelanstieg aus den Szenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 bzw. den extremen Meeresspiegelanstieg von 1,5 m und 2,0 m

4.3.3.3 Historische und zukünftige Änderungen von Seegang

Die Datenlage für verlässliche Aussagen über historische Trends in der Höhe des Seegangs ist unzureichend, da ausreichend lange und konsistente Zeitreihen fehlen (Klein et al. 2018).

Maßgebliche Unsicherheitsquelle ist Klein et al. zufolge die in langen Datenreihen enthaltene subjektive Komponente, weil früher Seegangshöhen aus rein visuellen Beobachtungen von Seeleuten stammten. Alternativ können anhand sogenannter Hindcasts historische Datenreihen mithilfe eines auf die Vergangenheit angewendeten Vorhersagemodells generiert werden. Weisse und Günther (2007) fanden mithilfe einer solchen Hindcast für den Zeitraum 1951-2002 eine Korrelation zwischen der Entwicklung extremer Seegangseignisse (99. Perzentil) in der Deutschen Bucht, welcher der dekadischen Variabilität der Windgeschwindigkeit bzw. Sturmaktivität folgt. Nach dieser Analyse war zwischen den 1960er und 1990er Jahren eine Zunahme und ist seitdem eine Abnahme der extremen Wellenhöhen zu beobachten. Für die Ostsee zeigt sich kein signifikanter Trend in den durchschnittlichen Seegangsbedingungen (Hünicke et al. 2015). Extreme Wellenhöhen werden an der deutschen Ostseeküste vor allem durch Stürme aus Richtung Nordost erzeugt. Diese Wetterlagen kommen in der Ostsee jedoch selten vor, so dass keine belastbaren Aussagen über signifikante Änderungen extremer Seegangsbedingungen in der Ostsee möglich sind (Klein et al. 2018). Young und Ribal (2019) haben anhand von Radardaten in der Deutschen Bucht der Jahre 1985-2018, basierend auf Monatsmittelwerten, einen uneindeutigen (sowohl Regionen mit Zunahmen als auch Abnahmen), statistisch nicht signifikanten Trend der mittleren signifikanten Wellenhöhe und einen leicht positiven signifikanten Trend (0,66 cm pro Jahr) für das 90% Perzentil der signifikanten Wellenhöhe gefunden. Die deutsche Ostsee weist laut der Analyse von Young und Ribal hingegen keinen signifikanten Trend der signifikanten Wellenhöhe auf, weder hinsichtlich der mittleren Wellenhöhe noch des 90% Perzentils. Basierend auf den Radardaten lassen sich allerdings keine Aussagen bzgl. der dekadischen Variabilität herleiten.

Die Frage nach den zukünftigen Seegangsbedingungen korreliert eng mit der Entwicklung des Windklimas. Dabei spielt neben der Windgeschwindigkeit auch die Windrichtung eine Rolle. In der Änderung der mittleren Wellenhöhe kann sich beispielsweise lediglich eine Änderung der mittleren Windrichtung widerspiegeln, da diese die Wellenhöhe bzw. die Fetchlänge beeinflusst und so im Mittel andere Wellenhöhen entstehen können. Zum Beispiel ist durch eine mögliche Zunahme von vermehrten Winden aus westlichen Richtungen mit einer Abnahme der mittleren Wellenhöhe in ostwindexponierten Lagen bzw. mit einer Zunahme der mittleren Wellenhöhe in westwindexponierten Lagen zu rechnen, wobei die Ursache nicht in einer Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit zu sehen ist (Klein et al. 2018). Mittlere Seegangsbedingungen sind für die Schifffahrt und einen möglichst reibungslosen Umschlag

im Hafen von Relevanz. Allerdings sind auch hier an den deutschen Küsten eher jährlich auftretende extreme Zustände von Bedeutung. Für die konstruktive Bemessung von Hafenanlagen sind sogar besonders seltene Ereignisse, welche etwa einmal in 50 Jahren oder seltener auftreten, ausschlaggebend.

Die an der Küste auftretenden Seegangsbedingungen hängen darüber hinaus nicht nur vom Windklima ab, sondern werden auch maßgeblich durch die Effekte im Flachwasser, bei der die Wassertiefe, d.h. der Meeresspiegelanstieg, eine Rolle spielt, beeinflusst. Im Zusammenhang mit dem Meeresspiegelanstieg ist hier insbesondere das Brechen der Wellen zu nennen, das ab einem bestimmten Verhältnis von Wellenhöhe zu Wassertiefe einsetzt. Unabhängig von der Entwicklung des Windklimas können daher allein durch den Meeresspiegelanstieg größere Wellen die Küste erreichen. Der Effekt kann insbesondere an flachen Küsten einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe des erforderlichen Hochwasserschutzes haben (Arns et al. 2017). Bei größeren Wassertiefen, wie sie an den Zufahrten von Seehäfen an der deutschen Küste zu finden sind, ist jedoch die Zunahme der Windgeschwindigkeit als maßgeblich für eine Zunahme der signifikanten Wellenhöhe anzusehen (vgl. Mai und Zimmermann (2004) und Abbildung 33). Abbildung 33 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse für den Hafen Wismar, welche die Änderung der signifikanten Wellenhöhe infolge des Meeresspiegelanstiegs (oben) bzw. infolge des Meeresspiegelanstiegs und einer Zunahme der Windgeschwindigkeit (unten) für zwei unterschiedliche Meeresspiegelanstiegsszenarien (links: RCP4.5, rechts: RCP8.5) untersucht.

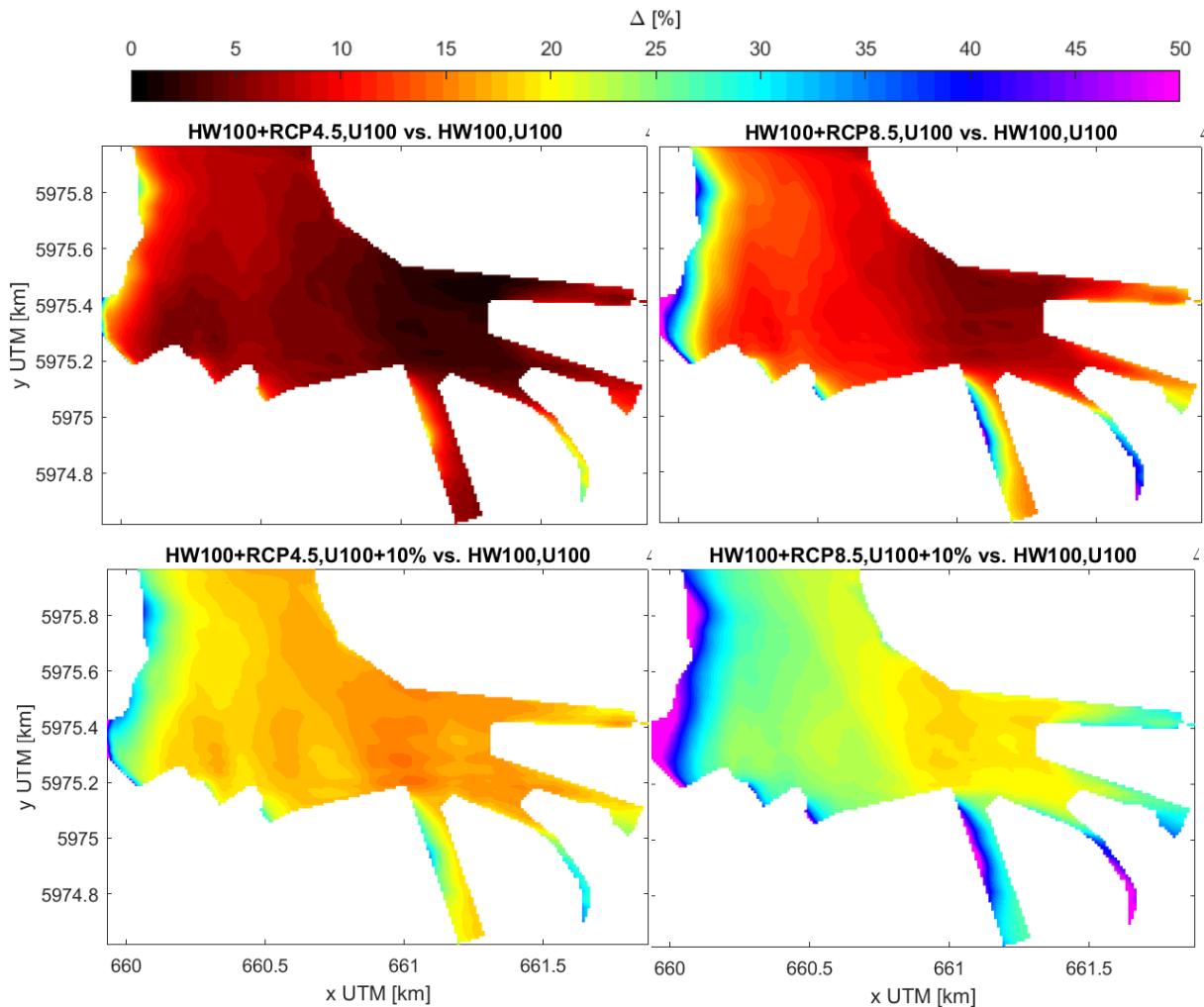


Abbildung 33: Relative Änderung der signifikanten Wellenhöhe im Wismarer Hafen infolge eines Meeresspiegelanstiegs (oben) bzw. eines Meeresspiegelanstiegs und der Zunahme der Windgeschwindigkeit (unten), relativ zum Referenzszenario. Referenzszenario: 100-jähriger Wasserstand ($HW_{100} = 2,28$ m NHN) mit 100-jähriger Windgeschwindigkeit ($U_{100} = 27,3$ m/s) und Wind aus Richtung West (Richtung mit höchsten Windgeschwindigkeiten). Meeresspiegelanstieg: RCP4.5 = +0,55 m, RCP8.5 = +1,10 m. Zunahme der Windgeschwindigkeit U_{100} : 10%.

4.3.4 Windstau

Windstau entsteht durch die Wirkung der Schubkraft des Windes (Windschubspannung) auf die Wasseroberfläche. Infolge der Windschubspannung kommt es neben der Entstehung von Wellen an der Wasseroberfläche zu einem Massentransport (Driftströmung) in Richtung des Windes. Bei vorhandenen Begrenzungen (Küsten) staut sich das Wasser infolge der Driftströmung auf, wobei dieser Effekt in Buchten besonders stark ausgeprägt ist. Sind Wasserfläche und Windgeschwindigkeit entsprechend groß, bildet sich eine merkliche Wasserspiegelneigung aus. Der Wasserspiegel ist gegenüber dem Ruhewasserspiegel (vom Wind unbeeinflusster Wasserspiegel) in Richtung des Windes erhöht (Windstau) bzw.

entgegen der Windrichtung verringert (Windsunk). Der durch die Wasserspiegelneigung entstehende Druckgradient sorgt für eine Rückströmung entlang des Bodens (Grundströmung), welche dem dortigen Reibungseinfluss unterliegt. Das Wasser staut solange weiter auf, bis Driftströmung und Grundströmung im Gleichgewicht stehen. Mit abnehmender Wassertiefe verringert sich die für die Rückströmung zur Verfügung stehende Querschnittsfläche und der Windstau nimmt zu. Daher spielt der Windstau bei Sturmfluten in Flachmeeren wie der Nord- und Ostsee eine maßgebliche Rolle. Der Windstau hat eine starke lokale Komponente, da er durch Gegebenheiten wie Dauer des Sturms, Windrichtung und – wirklänge, Wassertiefe und Verlauf der Küstenlinie geprägt ist. Die Höhe des Windstaus an der deutschen Küste kann in der Nordsee bis zu 5,0 m und in der Ostsee bis zu 3,0 m betragen (Huber 2000).

Unter Annahme einiger Vereinfachungen, d.h. in Richtung des Ufers weisender (aufländiger) konstanter und oberflächenparalleler Wind, konstante Wassertiefe, Vernachlässigung etwaiger anderer nicht durch Wind induzierter Strömungen sowie durch die Erdrotation verursachter Effekte, kann der Windstau mit einer einfachen Formel bestimmt werden (Malcherek 2010):

$$\Delta z_S = \frac{5 \rho_A C_D x u_{10}^2}{4 \rho g h} \quad \text{Gl. 4-11}$$

ρ_A	Dichte der Atmosphäre [kg/m ³]
ρ	Dichte des Wassers [kg/m ³]
C_D	Windschubkoeffizient (i.A. $f(u_{10})$) [-]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
x	Windwirklänge (Fetch) [m]
u_{10}	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe [m]
h	Wassertiefe [m]
Δz_S	Windstau [m]

Die Gleichung zeigt, dass der Windstau proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit und umgekehrt proportional zur Wassertiefe ist. Damit kann eine Änderung des Windstaus im Zusammenhang mit dem Klimawandel erwartet werden. Die Änderung des zukünftigen Windklimas an der deutschen Küste ist bisher allerdings noch unsicher (Weiße und Meinke 2017). Eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten würde eine Zunahme des Windstaus bedeuten. Hingegen fällt der Windstau unter Berücksichtigung eines Meeresspiegelanstiegs tendenziell geringer aus. Der Einfluss nimmt jedoch mit zunehmender Wassertiefe ab (vgl. Abbildung 34).

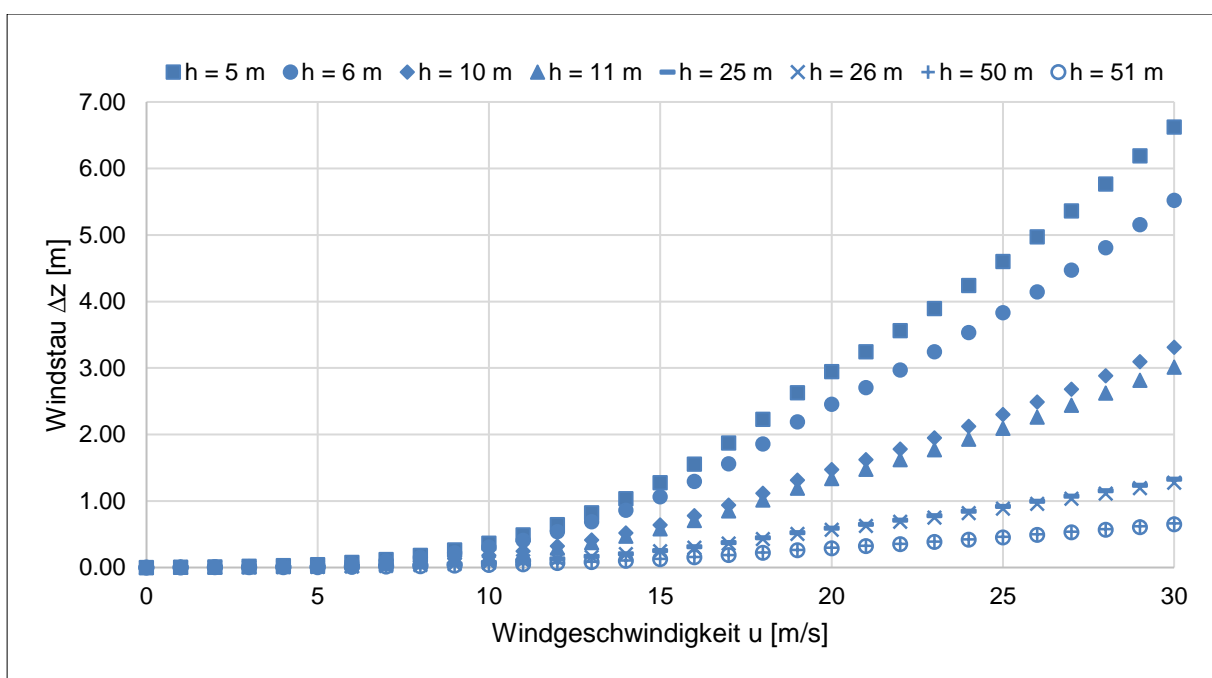


Abbildung 34: Windstau für verschiedenen mittlere Wassertiefen und Windgeschwindigkeiten (Fetch: 100 km).

Da in der Realität weder die Wassertiefe noch die Windgeschwindigkeit gleichmäßig verteilt sind und zudem die Windwirklänge (Fetch) innerhalb eines Sturmereignisses nicht exakt zu bestimmen ist, ist eine Berechnung des zu erwartenden Windstaus nicht empfehlenswert. In der Praxis wird der Windstau daher aus der beobachteten Wasserstandsganglinie abzüglich der vorausgerechneten astronomischen Tide oder der mittleren Tide bzw. dem Füllungsgrad der Ostsee ggf. unter Berücksichtigung von Schwingungseffekten ermittelt. Das heißt, dass der so ermittelte Windstau immer auch den Einfluss des Luftdrucks auf den Wasserstand enthält. Der Wasserstand hebt sich mit abnehmendem Luftdruck und fällt mit zunehmendem Luftdruck (inverser Barometereffekt). Bei Sturmereignissen herrscht tiefer Luftdruck, in dessen Folge es daher zu einer weiteren Wasserstandserhöhung kommt. Die nach diesem Vorgehen ermittelte Windstaukurve enthält noch weitere Einflüsse wie Temperatur, Eigenschwingungen oder Fernwellen (Seebären) infolge plötzlicher Luftdruckänderungen, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Die Abhängigkeit des Windstaus von der Wassertiefe ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** insofern zu erkennen, dass das Maximum des Windstaus nicht während des Tidehochwasserstands auftritt. Dennoch sind im tidebeeinflussten Bereich während eines Sturmereignisses die höchsten Wasserstände während des Tidehochwassers zu erwarten (Gönnert und Siefert 1999).

Bei einer mittleren Wassertiefe von rund 50 m beträgt die Höhe des Windstaus bei einem Sturmereignis der Windstärke 8 (etwa 20 m/s) und einer Fetchlänge von 100 km etwa 0,3 m

sowie bei einem Sturmereignis der Windstärke 11 (etwa 30 m/s) und einer Fetchlänge von 400 km etwa 2,7 m.

In der Nordsee zeigt der Windstau keinen signifikanten Trend jedoch eine jährliche und dekadische Variabilität, die mit einer entsprechenden Variabilität der Sturmaktivität erklärt werden kann (Jensen et al. 2013, Weisse et al. 2012, Weisse und Plüß 2006). In der Ostsee spielen zusätzlich zum Windstau die Vorfüllung (Füllungsgrad) sowie Eigenschwingungen eine Rolle bei Sturmereignissen, welche in der südwestlichen Ostsee mit einer leichten, nicht signifikanten Zunahme der Häufigkeit von Sturmfluten in Verbindung gebracht werden (Weiße und Meinke 2017). Nach Weiße und Meinke (2017) sind 'keine Tests bekannt, die statistisch signifikante Änderungen' der Sturmfluthöhen an der deutschen Ostseeküste belegen. Füllungsgrad und Eigenschwingungen der Ostsee können eine Wasserstandserhöhung von 0,5 m bzw. von 1,0 m zu den Hochwasserständen beitragen (MLUV (2009)).

Bei der Frage nach der zukünftigen Größenordnung des Windstaus an der deutschen Küste ist wie zuvor dargestellt zwischen dem Einfluss aufgrund des Meeresspiegelanstiegs und der Änderung des Windklimas zu unterscheiden.

Im Rahmen von KLIWAS wurde von Seiffert et al. (2014) der Einfluss des Meeresspiegelanstiegs auf besonders hohe Wasserstände, wie sie während historischer Sturmfluten aufgetreten sind, mithilfe der Sturmflutmodelle der Flüsse Elbe, Weser und Ems untersucht. Aufgrund der Unsicherheiten in zukünftigen Änderungen der Windfelder blieben diese zunächst unberücksichtigt. In den Szenarien wurden die in den Flüssen vorhandenen Wehre in Geesthacht (Elbe), Hemelingen (Weser) sowie Herbrum und Bollingerfähr (beide Ems) während der Sturmflut gelegt, so dass der Einfluss der Sturmflut über die Wehre hinausreicht. Die Untersuchung von Seiffert et al. (2014) zeigt deutlich, dass sich der Meeresspiegelanstieg in die Ästuare fortpflanzt. Im Bereich der Mündung ändert sich der Wasserstand in der Größenordnung des Meeresspiegelanstiegs, weiter oberstrom zeigen sich geringfügige Abweichungen in der Größenordnung von $\pm 0,1$ m. In einem weiteren Schritt haben Seiffert et al. die Auswirkungen eines hohen Oberwasserzuflusses von bis zu 4.000 m³/s für Elbe und Weser bzw. 1.200 m³/s für die Ems (entspricht jeweils in etwa dem heutigen höchsten bekanntem Abfluss HHQ) sowie eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten von 5% bzw. 10% auf den Sturmflutwasserstand in den Tideflüssen untersucht. Tabelle 19 zeigt die Zusammenfassung ihrer Ergebnisse. Im Bereich der Mündung wirkt sich insbesondere ein Meeresspiegelanstieg auf die Sturmflutwasserstände aus, nämlich mit einer Zunahme in Höhe des angenommenen Meeresspiegelanstiegs. Oberhalb der Mündung spielt zusätzlich zu

einem etwaigen Meeresspiegelanstieg vermehrt der Oberwasserzufluss eine wichtige Rolle, mit möglichen Zunahmen im oberen Bereich des Ästuars von bis zu 1,0 m.

Seiffert et al. (2014) kommen im Rahmen von KLIWAS zu ähnlichen Ergebnissen für die Ostsee, indem sie das hydrologische Jahr 2006 einmal ohne und einmal mit einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m vergleichen. In ihren Analysen zeigt sich, 'dass sich durch einen Meeresspiegelanstieg die Variabilität des Wasserstandes an der offenen Ostseeküste und in Buchten mit offenem Zugang zur Ostsee (beispielsweise der Wismarbuch) nicht gegenüber dem heutigen Zustand verändert'. In den Binnenrevieren wie der Schlei, den Boddengewässern und dem Stettiner Haff zeigt sich Seiffert et al. zufolge jedoch eine stärkere Variabilität der Wasserstände, da die Dämpfung infolge Reibung am Grund in den Revieren abnimmt.

Tabelle 19: Einflussgrößen bzw. Kombination von Einflussgrößen und deren Wirkung auf die Höhe von Sturmflutwasserständen entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems (Seiffert et al. 2014). Als Basisszenario dient die höchste bisher registrierte Sturmflut aus dem Jahr 1976 (Elbe, Weser) bzw. aus dem Jahr 2006 (Ems). Untersucht wurden folgende Einflussgrößen: Meeresspiegelanstieg von 0,25 m, 0,80 m und 1,15 m; Oberwasserzufluss von 2.000 m³/s, 3.000 m³/s und 4.000 m³/s (HHQ) für Elbe und Weser sowie 350 m³/s, 700 m³/s und 1.200 m³/s (HHQ) für die Ems; Zunahme der Windgeschwindigkeit von 5% und 10%.

Szenarien	Ästuar­mündung	Mittleres Ästuar	Oberes Ästuar
Oberwasserzufluss Q	± 1 cm	5 -30 cm	10- 100 cm
Meeresspiegelanstieg MSA	+ MSA	+MSA ± 10 cm	+MSA ± 10 cm
Kombination Q & MSA	+ MSA	≤ (MSA + Q)	≤ (MSA + Q)
Windgeschwindigkeit	bis zu 10 cm	bis zu 30cm	bis zu 30 cm
Kombination Wind & MSA	≈ (MSA + Wind)	≈ (MSA + Wind)	≈ (MSA + Wind)

4.3.5 Astronomische Tide

Die astronomische Tide (häufig kurz 'Tide' oder auch 'Gezeiten') entsteht 'durch die Massenanziehungs- und Fliehkräfte des Systems Sonne, Mond und Erde in Verbindung mit der Erdrotation' (DIN 4049-3). Infolge der Tide steigt und fällt der Wasserstand in den Ozeanen, den Küstengebieten und bis zur Tidegrenze der in das Meer mündenden Flüsse periodisch. Dabei weisen die Tidewellen Wellenperioden von mehr als 12 Stunden auf (vgl. Abbildung 26). Die Höhe der periodischen Wasserstandsänderungen ist zeit- und ortsabhängig. Zudem kommt es zu horizontalen Wasserbewegungen, d.h. Strömungen, durch den Einfluss der Tide. Die Tide mit ihren wechselnden Wasserständen und Strömungsbedingungen ist nicht nur aus nautischer Sicht relevant, sondern auch für die

Bemessung wasserbaulicher Anlagen, den Sedimenttransport in Hafenbecken und Tideflüssen sowie die Vertäuung von Schiffen bedeutend.

Die Größe von Nord- und Ostsee reicht nicht aus, um in ihnen merkbare Tideschwankungen zu erzeugen. Die an der deutschen Küste zu beobachtende Tidedynamik wird in erster Linie durch das Mitschwingen infolge der atlantischen Tide erzeugt. Dabei interferieren die im Norden und durch den Ärmelkanal im Südwesten in die Nordsee einlaufenden Tidewellen. Sie werden durch Sohlreibung in dem flachen Meer gedämpft und an den Küsten reflektiert. Durch Resonanz infolge der Interferenz reflektierter Wellen, können sich vor allem in Buchten und kleinen Ozeanbecken stehende Wellen ausbilden und lokal große Tidehübe entstehen. In der Nordsee bilden sich so im Zusammenspiel mit der Corioliskraft drei Drehwellen (Amphidromien, siehe Abbildung 35)



Abbildung 35: In die deutsche Bucht einlaufende Tidewellen sowie die entstehenden amphidromischen Punkte (Amphidromisches System der Nordsee, Wikipedia).

aus, welche entgegen dem Uhrzeigersinn laufen. In der Mitte dieser Drehtiden, dem amphidromischen Punkt, herrscht kein Tidehub⁷⁷ vor. Mit zunehmendem Abstand zum amphidromischen Punkt nimmt der Tidehub zu. Auf ihrem Weg in Richtung Küste stellt sich die Tidewelle zudem durch die Abnahme der Wassertiefe auf, so dass an der Küste größere Tidehübe als auf dem offenen Meer auftreten. Dabei wird die Tidewelle in der Art verformt, dass der Flutstrom gegenüber dem Ebbstrom dominiert. Läuft die Küstenlinie trichterförmig zu, treten besonders große Tidehübe auf. In Tideästuaren wird die Tidewelle außerdem durch variable Wassertiefen und den Oberwasserzufluss beeinflusst. An der deutschen Nordseeküste treten mittlere Tidehübe von etwa 2-3 m auf, in den Ästuaren von Ems, Elbe, Jade und Weser erreichen Tidehübe im Mittel rund 3-4 m (BSH 2019). An der deutschen Ostseeküste ist der Einfluss der Tide aufgrund der schmalen und flachen Verbindung zur

⁷⁷ DIN 4049-3: Tidehub: 'Mittlerer Höhenunterschied zwischen Tidehochwasser und den beiden benachbarten Tideniedrigwasser'. Tidehochwasser/ Tideniedrigwasser: Höchster/ niedrigster Wert der Ganglinie der Wasserstände an einem Ort über mindestens eine Tidedauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwasser/ Tidehochwasser. Tidedauer: 'Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tideniedrigwasser oder Tidehochwasser' (Nordsee etwa 12h 25 min).

Nordsee, dem Skagerrak und Kattegat, kaum vorhanden, er beträgt nur bis zu rund 0,3 m (Rauhe et al. 2020).

Infolge des Meeresspiegelanstiegs ist mit einer Änderung der Tidedynamik zu rechnen. Neben dem Meeresspiegelanstieg spielt eine mögliche Veränderung der Topographie (Mittwachsen der Wattflächen und Vertiefung der Rinnen) aufgrund morphologischer Änderungen infolge des Meeresspiegelanstiegs eine ähnlich große Rolle für die Änderung der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und sollte daher berücksichtigt werden. Die Zusammenhänge sind komplex und nicht einfach zu modellieren; mögliche Auswirkungen werden daher an dieser Stelle nur anhand einfacher Abschätzungen einer sich verändernden Topographie untersucht. Die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Tidewasserstände in der Deutschen Bucht sind regional verschieden. Durch den Meeresspiegelanstieg zeigt sich überwiegend eine stärkere Zunahme des Tidehochwassers relativ zum Meeresspiegelanstieg von wenigen Zentimetern. Das Tideniedrigwasser steigt je nach Region weniger stark oder auch stärker als der Meeresspiegel. Regional kann es infolge des Meeresspiegelanstiegs zu einer Änderung des Tidenubs von maximal 0,2 m bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m kommen. Die Veränderung der Topographie wirkt den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs bezüglich der Änderung des Tidehochwassers entgegen, bezüglich der Änderung des Tideniedrigwassers wirkt sie aber auch verstärkend. Das Tidehochwasser steigt weniger stark als der mittlere Meeresspiegel, der Anstieg des Tideniedrigwassers ist jedoch fast entlang der gesamten deutschen Nordseeküste geringer als der Meeresspiegelanstieg. Insgesamt erhöht sich der Tidehub für dieses Szenario entlang der Deutschen Bucht infolge des relativ zum Meeresspiegelanstieg gesehenen Abfalls des Tideniedrigwassers. (Winkel et al. 2020)

Gemäß neuerer Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau zeigt sich nur eine geringfügige Erhöhung der Baggermengen in den Fahrrinnen von Weser, Elbe und Ems infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m. Die Aussagen sind allerdings aufgrund der Komplexität der zugrundeliegenden Prozesse mit großen Unsicherheiten verbunden. Bei einer gleichzeitigen Änderung der Topographie mit einer Erhöhung der Watten und einer Vertiefung der Rinnen ist mit keiner Änderung bis hin zu einer leichten Abnahme des advektiven Schwebstofftransports in die Ästuarie zu rechnen. (Winkel et al. 2020)

In Anbetracht der aus derzeitiger Sicht eher moderaten zu erwartenden Änderung der Tidedynamik scheint diese bei der Planung bzw. zukünftigen Nutzung wasserbaulicher Anlagen vernachlässigbar zu sein. Der Anstieg des Bemessungshochwasserstandes um wenige Dezimeter kann sich jedoch deutlich auf die zugrundeliegende Jährlichkeit auswirken.

Idier et al. (2017) plädieren daher dafür, mögliche Änderungen des Tidehochwassers zusätzlich zum mittleren Meeresspiegelanstieg bei der Hochwasserschutzplanung zu berücksichtigen.

4.3.6 Lufttemperatur

In Deutschland hat sich die jährliche Lufttemperatur im Zeitraum 1881-2020 im Mittel um 1,60°C erhöht (DWD 2021) und liegt damit über dem mittleren Trend der globalen Erwärmung von 0,99°C im Zeitraum 2001-2020 relativ zu 1850-1900 (IPCC 2021). Der mittlere jährliche Temperaturanstieg der Luft über Land an der deutschen Nord- und Ostseeküste beträgt 0,60 – 0,90°C seit 1961 (Helmholtz-Zentrum Hereon 2021b). Tabelle 20 zeigt mögliche zukünftige Änderungen der Temperatur und von temperaturbezogenen Kenntagen.

Tabelle 20: Mögliche Änderung von Temperatur und Temperatur bezogenen Kenntagen für Nord- und Ostsee relativ zum Zeitraum 1961-1990 (Daten: Helmholtz-Zentrum Hereon 2021a).

		Nahe Zukunft (2036-2065)			Ferne Zukunft (2071-2100)		
		Kleinste Änderung/ größte Abnahme	Mittlere Änderung	Größte Änderung/ größte Zunahme	Kleinste Änderung/ größte Abnahme	Mittlere Änderung	Größte Änderung/ größte Zunahme
Nordsee							
Durchschnittliche Temperatur	Jahr	+0.9 °C	+1.8 °C	+3 °C	+0.9 °C	+2.7 °C	+5 °C
Heiße Tage ¹	Jahr	0 Tage	+2 Tage	+16 Tage	0 Tage	+4 Tage	+26 Tage
Frosttage ²	Jahr	-10 Tage	-23 Tage	-39 Tage	-11 Tage	-30 Tage	-55 Tage
Eistage ³	Jahr	-2 Tage	-8 Tage	-24 Tage	-3 Tage	-10 Tage	-28 Tage
Ostsee							
Durchschnittliche Temperatur	Jahr	+1 °C	+1.9 °C	+3 °C	+1 °C	+2.9 °C	+5.2 °C
Heiße Tage ¹	Jahr	0 Tage	+2 Tage	+18 Tage	0 Tage	+6 Tage	+32 Tage
Frosttage ²	Jahr	-14 Tage	-29 Tage	-46 Tage	-15 Tage	-39 Tage	-66 Tage
Eistage ³	Jahr	-4 Tage	-12 Tage	-36 Tage	-4 Tage	-15 Tage	-42 Tage
¹ Anzahl der Tage, an denen die Maximaltemperatur mindestens einmal am Tag 30 °C erreicht ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$).							
² Anzahl der Tage, an denen die minimale Lufttemperatur unter 0 °C sinkt ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$).							
³ Anzahl der Tage, an denen die maximale Lufttemperatur nicht über 0 °C steigt ($T_{\max} < 0 \text{ °C}$).							

Für die ferne Zukunft (2071-2100) zeigt Tabelle 20 eine mögliche größte Temperaturzunahme von rund 5°C für die deutsche Nord- und Ostseeküste (RCP8.5). Mit der Erwärmung der Lufttemperatur geht ebenso eine Abnahme der Eis- bzw. Frosttage einher (Tabelle 20). Allerdings steigt durch das Abschmelzen der Arktis und daraus entstehender Wechselwirkungen auch das Potential für kältere Winter in Europa (Dethloff et al. 2018), so dass auch im Rahmen des Klimawandels weiterhin mit Eis und Frost gerechnet werden muss.

Es ist außerdem davon auszugehen, dass die jährliche maximale Lufttemperatur stärker ansteigt als die mittlere Lufttemperatur (IPCC 2021).

4.3.7 Niederschlag

Die Niederschlagsmengen unterliegen natürlicherweise starken Schwankungen von Jahr zu Jahr. Betrachtet man die Niederschlagsmittel des meteorologischen Winters bzw. Sommers zeigt sich ein Trend zu deutlich mehr Niederschlag im Winter und etwas weniger Niederschlag im Sommer. In Deutschland hat sich seit 1881 die mittlere Niederschlagsmenge im Winter um 26% erhöht und im Sommer um 0,6 % verringert (Kaspar und Mächel 2017), wobei die Abnahme im Sommer statistisch nicht signifikant ist. Zukünftig ist an den norddeutschen Küsten eine Zunahme des mittleren jährlichen Niederschlags von 30% (RCP8.5) möglich, wobei die Zunahmen in den einzelnen Jahreszeiten noch darüber liegen können (Tabelle 21). Insbesondere für das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) ist zukünftig vor allem im Herbst und Winter mit einer deutlichen Zunahme der Ereignisse mit Dauerregen (mindestens 40 mm Niederschlag innerhalb von 72 Stunden) zu rechnen (Brienen et al. 2020).

Tabelle 21: Mögliche Änderung von Niederschlag und Niederschlag bezogenen Kenntagen für Nord- und Ostsee relativ zum Zeitraum 1961-1990 (Daten: Helmholtz-Zentrum Hereon 2021a).

		Nahe Zukunft (2036-2065)			Ferne Zukunft (2071-2100)		
		Kleinste Änderung/ größte Abnahme	Mittlere Änderung	Größte Änderung/ größte Zunahme	Kleinste Änderung/ größte Abnahme	Mittlere Änderung	Größte Änderung/ größte Zunahme
Nordsee							
Niederschlag	Sommer	-25 %	0 %	+34 %	-48 %	-7 %	+58 %
	Winter	-3 %	+14 %	+28 %	0 %	+22 %	+46 %
Starkregentage ¹	Jahr	0 Tage	+1 Tag	+4 Tage	0 Tage	+2 Tage	+7 Tage
Längste Trockenperiode ²	Jahr	-3 Tage	0 Tage	+9 Tage	-4 Tage	+1 Tag	+15 Tage
Ostsee							
Niederschlag	Sommer	-26 %	+3 %	+30 %	-44 %	-2 %	+55 %
	Winter	-2 %	+14 %	+27 %	+4 %	+21 %	+44 %
Starkregentage ¹	Jahr	0 Tage	+1 Tag	+3 Tage	0 Tage	+1 Tage	+5 Tage
Längste Trockenperiode ²	Jahr	-3 Tage	0 Tage	+11 Tage	-3 Tage	+1 Tage	+18 Tage
¹ Anzahl der Tage, an denen der gefallene Niederschlag (Schnee + Regenwasser) mindestens 20 mm beträgt.							
² Folge von zusammenhängenden Tagen mit einem Tagesniederschlag von unter 1 mm.							

Die Erfassung von Starkniederschlagsereignissen war in der Vergangenheit schwierig, da sie lokal konzentriert auftreten und häufig nicht von den räumlich verteilten Niederschlagsmessstationen registriert wurden. Heute können solche Ereignisse mit Radargeräten erfasst werden. Die Zeitreihen reichen jedoch noch nicht aus, um verlässliche

Aussagen über eine Veränderung historischer Starkregenereignissen zu treffen (Becker et al. 2016). Um Aussagen über Änderungen von Häufigkeit und Intensität von Starkregen aus der derzeitigen Generation von Klimamodellensembles abzuleiten, kann ein Schwellenwert von 20 mm Niederschlag pro Tag verwendet werden (Brienen et al. 2020). Anhand dieses Schwellenwertes zeichnet sich Brienen et al. zufolge für die historische Änderung von Starkregentagen bisher ein ähnliches Bild ab wie für mittlere Niederschläge, mit einer Zunahme der maximalen Niederschlagsmengen an Tagen mit Starkregen im Winter. Zudem geben die Autoren an, dass sich ein Trend hin zu wenigen Tagen mit viel Niederschlag im Winter, Frühling und Herbst beobachten lässt, im Sommer ein solcher Trend bisher jedoch nicht ersichtlich ist.

Zukünftig wird mit einer Zunahme der Tage mit Starkregen vor allem im Winter gerechnet (Brienen et al. 2020). Im Norddeutschen Klimaatlas findet sich eine mögliche zukünftige Zunahme von bis zu 7 Starkregentagen pro Jahr für das Szenario RCP8.5 (Tabelle 21). Die größten Zunahmen der Niederschlagsmengen von Starkregentagen sind jedoch im Sommer zu erwarten; mit Zunahmen von +1,1% bis +21% für die ferne Zukunft und das Weiter-wie-bisher-Szenario (Brienen et al. 2020). Krauß et al. (2014) haben im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Auftrag gegebenen Forschungsprojekts die Ergebnisse von zwei Modellläufen regionaler Klimamodelle (CLM) für das SRES-Szenario A1B, angetrieben von demselben Lauf des globalen Klimamodells (ECHAM5-MPIOM), anhand von statistischen Methoden herunterskaliert, um mögliche Änderungen von Niederschlagsereignissen kurzer Dauerstufen, wie sie für die Dimensionierung von Entwässerungssystemen relevant sind, zu untersuchen. Das A1B-Szenario ist ein Szenario mit eher starkem Anstieg der THG-Emissionen, welches zwischen den RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 liegt. Für die Region Hamburg-Puttgarden fanden Krauß et al. mögliche Zunahmen der Niederschlagsintensität eines 15-minütigen Regens mit einer Wiederkehrperiode von 5 Jahren von 7% bzw. 8% für die nahe Zukunft (2021-2050) und 19% bzw. 17% für die ferne Zukunft (2071-2100). Darüber hinaus bleibt zu untersuchen, wie die Einflussfaktoren der Niederschlagsbildung sowie die großräumigen Wetterlagen, welche ebenfalls das Niederschlagsgeschehen beeinflussen, durch den Klimawandel beeinträchtigt werden (DWD 2017).

Durch einen zunehmenden Feuchtegehalt der Atmosphäre, werden die Bedingungen zur Entstehung von schweren Unwettern grundsätzlich begünstigt (vgl. Allen 2018). Púčik et al. (2017) haben, basierend auf einem Ensemble von 14 regionalen Klimamodellen, selbst bei

einem starken Anstieg der Treibhausgaskonzentration (RCP8.5) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, zwar eine Zunahme der Unwettergefahr für Teile Europas, jedoch keine oder nur eine geringe Änderung der Unwettergefahr für die norddeutsche Küste festgestellt.

4.3.8 Hoch- und Niedrigwasser

Die Sensitivität gegenüber Niedrigwasser ist in Seeschiffahrtsstraßen und Kanalstrecken sowie in staugeregelten Streckenabschnitten von Binnenschiffahrtsstraßen gering. Eine aktuelle Untersuchung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Nilson et al. 2020) zeigt eine deutliche Zunahme der Betroffenheit durch Niedrigwasser insbesondere für den Rhein sowie ebenfalls eine Zunahme der Betroffenheit durch Niedrigwasser für die Binnenabschnitte von Elbe, Ems und Donau, hier jedoch erst ab der Mitte des Jahrhunderts und vor allem für die oberen Perzentile des Weiter-wie-bisher-Szenarios (RCP8.5). Zukünftig ist der Untersuchung zufolge unter dem Weiter-wie-bisher-Szenario zudem vor allem im Winter häufiger mit Hochwasserabflüssen zu rechnen. Im Gegensatz zu den Niedrigwasserereignissen ist mit diesen Änderungen unter dem Weiter-wie-bisher-Szenario bereits in der nahen Zukunft, d.h. der Mitte dieses Jahrhunderts zu rechnen. Die Zunahme von Tagen mit hohen Abflüssen, mit einer Einstellung der Schifffahrt, ist jedoch im Vergleich zu den länger andauernden Niedrigwasserphasen weiterhin gering und wird daher nicht als maßgeblich für bedeutende Einschränkungen der Binnenschifffahrt angesehen (BMVI-Expertenetzwerk 2020).

4.3.9 Wassertemperatur und -chemie

Eine Erwärmung des Meeres folgt zeitlich der Erwärmung der Luft. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird eine Zunahme der mittleren jährlichen Meeresoberflächentemperatur von 1 – 3 °C für die deutsche Nordsee und 3 – 4 °C für die deutsche Ostsee projiziert (Klein et al. 2018). Vergleicht man die Zeiträume 1961-1990 und 1981-2010 zeigt sich bereits heute an der überwiegenden Anzahl der Beobachtungsorte eine Abnahme der Häufigkeit des Eisauftretens an der deutschen Nordseeküste (Schmelzer et al. 2015) und Ostseeküste (Schmelzer und Holfort 2012). Gleichzeitig sind beispielsweise an der deutschen Ostseeküste seit den 1960er Jahren keine extrem starken Eiswinter mehr aufgetreten (Schmelzer und Holfort 2012) und auch mit dem an der deutschen Ost- und Nordseeküste quasi eisfreien Winter 2019/ 2020, welcher ebenfalls in früheren Saisonberichten des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie zu finden ist, zeichnet sich ein Trend von schwächeren Eiswintern ab (BSH 2021). Allerdings kann infolge eines stark mäandrierenden Jet-Streams zukünftig das Potential für kältere Winter in Europa steigen (Dethloff et al. 2018), so dass auch im Rahmen des Klimawandels weiterhin mit dem Vorkommen von Eis gerechnet werden muss.

Die steigenden Lufttemperaturen wirken sich ebenfalls auf die Häufigkeit von für die Gewässergüte der Fließgewässer kritischen Wassertemperaturen aus. Nilson et al. (2020) haben das Überschreiten kritischer Schwellenwerte exemplarisch für die Elbe und den Rhein untersucht. Hiernach ist im Weiter-wie-bisher-Szenario in der fernen Zukunft mit einer deutlichen Erhöhung von etwa bis zu 35 Tagen mit kritischen Wassertemperaturen ($>25^{\circ}$) in Elbe und Rhein zu rechnen. Infolge der erhöhten Wassertemperaturen könnten zukünftig daher höhere Immissionsanforderungen an Niederschlagswasserbehandlungsanlagen gestellt werden und es ist mit einer Zunahme von Keimzahlen bzw. humanpathogenen Keimen zu rechnen (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall 2010). Zudem können sich gegebenenfalls die Zeiten für die Durchführung von Unterhaltungsmaßnahmen zur Schaffung ausreichender Wassertiefen verringern.

Unter anderem durch veränderte Niederschlags- und Verdunstungsraten kommt es zu einer Änderung des Salzgehalts der Ozeane. Sowohl für die Nordsee (Schrum et al. 2016) als auch für die Ostsee (Meier 2015) wird eine Abnahme des Salzgehalts projiziert. Den Autoren zufolge ist für die deutsche Nordsee eine Abnahme bis zu 1‰ und für die deutsche Ostsee bis zu 2‰ bis zum Ende des 21. Jahrhunderts nicht ausgeschlossen. Gleichzeitig wird entlang der Tideflüsse mit dem Meeresspiegelanstieg eine Verschiebung der Brackwasserzone flussaufwärts erwartet, so dass entlang der Tideflüsse eher mit einer Zunahme des Salzgehalts zu rechnen ist (Seiffert et al. 2014).

Der Säuregehalt der Ozeane nimmt zu, weil das zusätzliche atmosphärische CO_2 teilweise in den Ozeanen gespeichert wird. Der pH-Wert des Wassers an der Ozeanoberfläche hat seit dem Industriezeitalter bereits von 8.2 auf 8.1 abgenommen (European Environment Agency 2017). Im Fall des RCP8.5 Szenarios ist eine Abnahme des pH-Werts um -0,3 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts möglich (IPCC 2019).

4.4 Verwundbarkeit und Anpassung von Anlagen und hafenbezogenen Tätigkeiten

4.4.1 Bedeutung des Klimawandels für die Anpassung von Regelwerken

Grundsätzlich orientieren sich die Häfen an allgemein gültigen Bemessungsansätzen der Ingenieurpraxis. Auch wenn teilweise bereits mit lokalen Erfahrungswerten gearbeitet wird, wie beispielsweise bei der Bemessung von Entwässerungssystemen für große Terminalflächen. Die Anpassung an den Klimawandel findet bisher nur in wenigen Regelwerken Berücksichtigung und wenn dann in wenig konkreter Weise (Kind et al. 2021). Gleichzeitig ist die zu erwartende, klimatisch begründete Änderung von vielfältigen Bemessungsparametern

in unterschiedlichsten Regelwerken von Bedeutung (Siefer et al. 2018). Beispiele für Regelwerke, welche die Anpassung an den Klimawandel bereits erwähnen bzw. berücksichtigen, sind: DWA-M 119 'Überflutungsvorsorge bei Starkregen', DWA-M 550 'Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung', DIN EN 16503 'Wasserbeschaffenheit – Anleitung zur Beurteilung der hydromorphologischen Merkmale der Übergangs- und Küstengewässer'; DIN V 18599-10 'Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung', DIN 1986-100 'Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100'; TRAS 310 – Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquelle Niederschläge und Hochwasser'. Darüber hinaus wird ein Klimazuschlag für den Bemessungswasserstand in den Küstenschutz-Generalplänen der Küstenbundesländer berücksichtigt (MELUND 2012, MLUV 2009, NLWKN 2007).

Siefer et al. (2018) haben 59 Regelwerke, inklusive derer nationaler Anhänge, mit Bezug zum Bahnbetrieb hinsichtlich eines erforderlichen Anpassungsbedarfs untersucht. Darunter waren Regelwerke des Hochbaus sowie des konstruktiven Ingenieurbaus. Bei 311 Einträgen sehen Siefer et al. einen hohen Anpassungsbedarf, darunter fällt die Mehrzahl der Einträge in dem Bereich Hitze gefolgt von Trockenheit (69 Einträge) und Sturm (66 Einträge). Die Ergebnisse ihrer Analyse wurden Siefer et al. zufolge in die zuständigen Gremien weitergetragen. Die Änderung von Stärke und Intensität zukünftiger Sturmereignisse ist allerdings aus derzeitiger Sicht als unsicher zu bewerten (vgl. Kapitel 4.3.2). Dennoch zeigt die Analyse von Siefer et al. die große Bedeutsamkeit des klimatischen Einflusses in der Anwendung von Regelwerken.

Im Allgemeinen sind Anlagen und hafenbezogene Tätigkeiten aufgrund steigender Einwirkungen, beispielsweise infolge einer Zunahme von Temperatur, Meeresspiegel oder Starkregen, negativ sowie aufgrund abnehmender Einwirkungen, beispielsweise infolge von geringeren Eislasten, positiv durch den Klimawandel betroffen. Nur in wenigen Fällen, beispielweise beim erforderlichen Steingewicht von Wellenbrechern (siehe Kapitel 4.4.2.1) oder des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite in Nicht-Tidegebieten (siehe Kapitel 4.4.2.2) wirkt sich der Anstieg des Meeresspiegels nicht zwingend negativ auf die Einwirkungen aus. Das Ausmaß der Sensitivität wird maßgeblich von den zugrunde liegenden Zusammenhängen bzw. anzusetzenden Bemessungsregeln bestimmt. Der erforderliche Anpassungsbedarf hängt darüber hinaus von der Größe der zu erwartenden klimatischen Änderungen der Bemessungsparameter ab.

4.4.2 Wasserstand und Seegang

4.4.2.1 Geschüttete Molen und Wellenbrecher

Geschüttete Molen und Wellenbrecher werden zum Schutz von Liegeplätzen bzw. Hafenzufahrten vor starkem Seegang gebaut. Nähere Informationen zu geschütteten Molen und Wellenbrechern enthält Kapitel 6 der EAK 2002. Die Wassertiefe am Bauwerk sowie der einlaufende Seegang sind relevante Parameter bei der Bemessung eines Wellenbrechers. Im Folgenden wurde im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse das erforderliche Steingewicht, die Wellenaufbauhöhe und die Wellenüberlaufhöhe an einem geschütteten Wellenbrecher am Beispielort Rostock-Warnemünde für verschiedene Meeresspiegelanstiege untersucht. Dabei wurden die Bemessungsansätze für die Bemessung der erforderlichen Steingewichte nach Hudson und nach Van der Meer aus der EAK 2002 verwendet und gegenübergestellt. Die Berechnungen der Wellenaufbauhöhe und der Wellenüberlaufhöhe wurden nach EurOtop (2018) durchgeführt. In den Bemessungsansätzen werden die ermittelten Seegangparameter der verschiedenen Klimaszenarien, welche in Kapitel 4.3.3.2.2 dargestellt sind, verwendet. Zudem werden folgende Eingangswerte gewählt:

- 2 – lagiges Deckwerk
- Deckwerk aus geschütteten, scharfkantigen Bruchsteinen
- Böschungsneigung 1:2
- Wassertiefe am Bauwerk im IST-Zustand: $d = 5,50$ m
- Freibordhöhe im IST-Zustand: 3,0 m

4.4.2.1.1 Deckwerksbemessung nach Hudson

Der Ansatz nach Hudson ist gemäß EAK 2002 (EAK 2020) auf Basis umfangreicher Untersuchungen in kleinmaßstäblichen hydraulischen Modellen entwickelt worden. Die Bemessungsformeln zur Ermittlung des erforderlichen Steingewichtes nach Hudson sind in EAK 2002 (2020) aufgeführt.

Ein Bestandteil des Bemessungsansatzes nach Hudson ist die Wellenhöhe, welche mit der dritten Potenz in die Gleichung eingeht. Der dimensionslose k_D -Wert beinhaltet die Form der Deckschichtsteine, den Grad der Verzahnung und die Form der einwirkenden Welle (brechende bzw. nichtbrechende Welle), wenn sie auf das Bauwerk auftrifft. Zudem wird zwischen der Wellenbrecherflanke und dem Wellenbrecherkopf unterschieden. Dementsprechend sind die Wellenhöhe und der k_D -Wert ausschlaggebende Stellschrauben zur Ermittlung des erforderlichen Steingewichtes eines geschütteten Wellenbrechers. Für die

Berechnung wurden die Parameter für scharfkantige Bruchsteine an der Wellenbrecherflanke gewählt.

Die ermittelten Steingewichte nach Hudson in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen für die einzelnen betrachteten Szenarien sind in Abbildung 36 dargestellt. Die signifikanten Wellenhöhen wurden mit frei gewählten Windgeschwindigkeiten im Entstehungsgebiet berechnet, wobei der kleinste ermittelte Wert mit einer Windgeschwindigkeit von 20 m/s und der größte Wert mit 36 m/s berechnet wurden. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Anstieg des erforderlichen Steingewichtes, sobald die Wellen in Abhängigkeit von der Wassertiefe am Bauwerk brechen. Die Abbildung zeigt allerdings auch, dass sich der Brechpunkt der einwirkenden Welle infolge des Meeresspiegelanstiegs ändert und aufgrund dessen die Deckschicht bei gleicher Wellenhöhe weniger Belastung erfährt. So kann sich der Klimawandel und der einhergehende Meeresspiegelanstieg unter gewissen Voraussetzungen positiv auf die Belastung des Deckwerks eines Wellenbrechers auswirken.

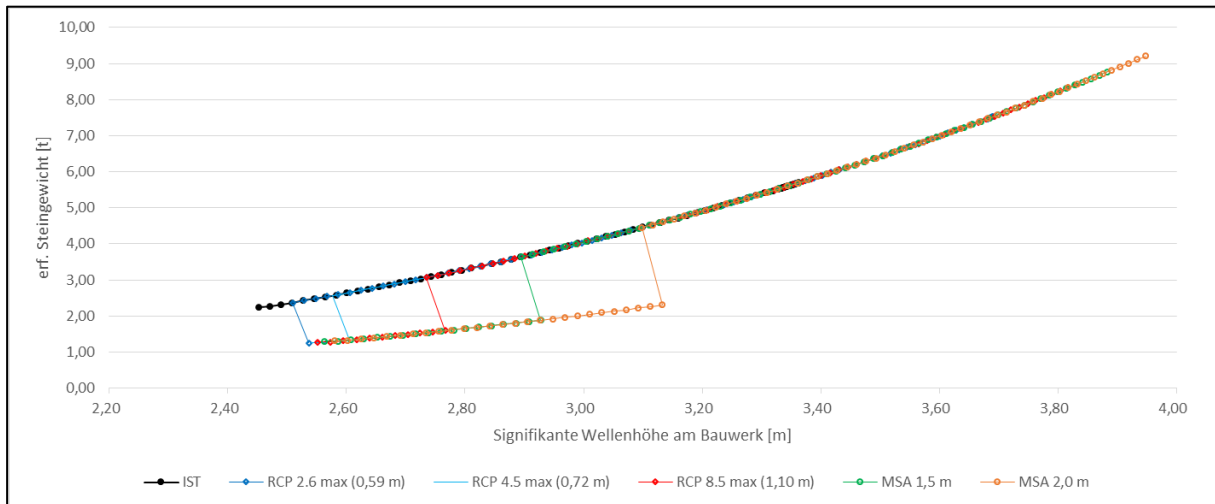


Abbildung 36: Erforderliches Steingewichte nach Hudson in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk für den IST-Zustand und den maximalen Meeresspiegelanstiegen aus den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 sowie einem extremen Meeresspiegelanstieg von 1,5 m und 2,0 m

4.4.2.1.2 Deckwerksbemessung nach Van der Meer

Auch der Ansatz nach Van der Meer basiert auf umfangreich durchgeführten Modellversuchen (EAK 2020). Bei diesem Ansatz wird allerdings genauer auf die zahlreichen Einflussgrößen wie Brechform der Welle, Sturmdauer oder zugelassener Zerstörungsgrad eingegangen. Der Ablauf des Bemessungsansatzes nach Van der Meer ist in der EAK dargestellt.

Mit dem Bemessungsansatz nach Van der Meer wird der nominale Steindurchmesser bestimmt. Dieser kann entsprechend in das erforderliche Steingewicht (W_{50}) umgeformt werden. Auch beim Berechnungsansatz nach Van der Meer ist es von Bedeutung, ob die Welle am Bauwerk ‘gebrochen’ oder ‘nicht gebrochen’ ist. Zusätzlich ist jedoch zu betrachten, welche Brechformen die Wellen beim Brechvorgang aufweisen (Sturz- oder Reflexionsbrecher). Hierfür ist die Brecherkennzahl der kritischen Brecherkennzahl gegenüberzustellen und die daraus resultierende zugehörige Formel für die Bemessung des erforderlichen Steingewichtes zu ermitteln. Weitere Eingangswerte sind die Wahl des möglichen bzw. zugelassenen Schadens sowie die Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Wellenbrecheraufbau. Für die Berechnung wurde ein Zerstörungsgrad von $S = 2$ und eine Durchlässigkeit des Wellenbrechers von $P = 0,6$ gewählt.

Anders als beim Ansatz nach Hudson ist in den Ergebnissen nach Van der Meer kein maßgeblicher Unterschied zwischen gebrochenen und nicht gebrochenen Wellen erkennbar (Abbildung 37). Der Grund hierfür liegt darin, dass im Berechnungsansatz nach Hudson der Form- und Standsicherheitsbeiwert k_D maßgeblich abhängig ist von der Frage, ob die Wellen infolge geringer Wassertiefen am Bauwerksfuß brechen oder ob sie erst im Wellenauflauf auf der Wellenbrecherflanke brechen. Dieser Einfluss einer vergleichsweise geringen Wassertiefe am Bauwerksfuß ist im Ansatz von Van der Meer geringer ausgeprägt.

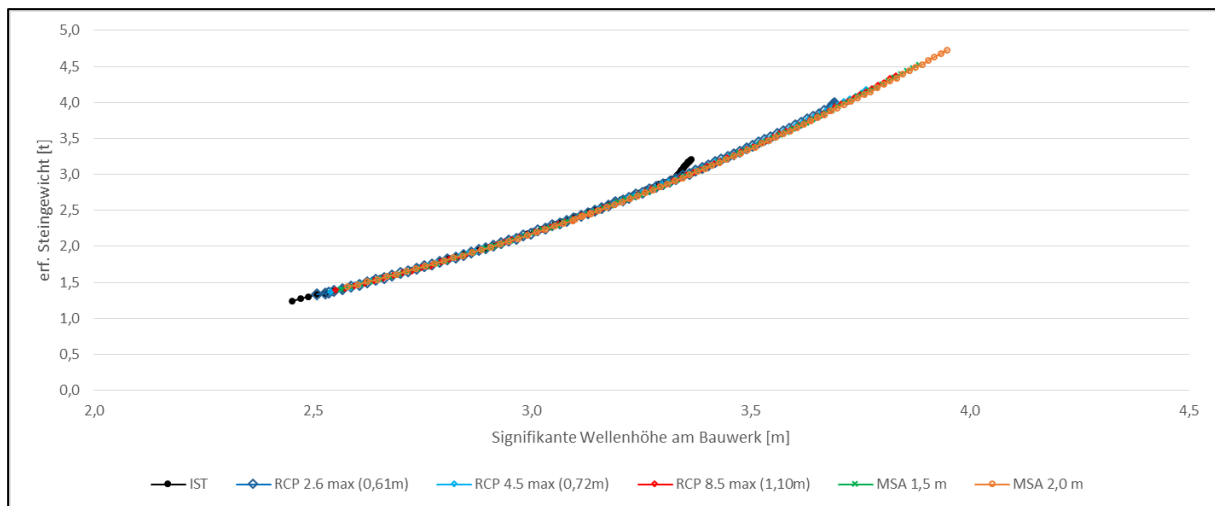


Abbildung 37: Erforderliches Steingewicht nach Van der Meer in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk für den IST-Zustand und den maximalen Meeresspiegelanstiegen aus den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 sowie einem extremen Meeresspiegelanstieg von 1,5 m und 2,0 m

Vielmehr geht in dem Ansatz von Van der Meer ein, wie lange das Ereignis auf das Bauwerk einwirkt bzw. wie groß die Anzahl der Wellen ist, die die Deckschicht belasten. In dem

Rechenbeispiel wurde ein Sturmereignis von 10 Stunden gewählt. Die Anzahl der einwirkenden Wellen ergibt sich dann aus den verwendeten Wellenperioden, die durch die Änderung der Wassertiefe infolge des Meeresspiegelanstiegs sowie unterschiedliche zugrunde gelegte Windgeschwindigkeiten variieren können. Der Ansatz nach Van der Meer zeigt eine größere Abhängigkeit von verschiedenen Wellenanzahlen während eines Sturmereignisses (Abbildung 38) als vom Einfluss des Meeresspiegels auf die Wassertiefe am Bauwerk (Abbildung 37). Dementsprechend ist bei gleichbleibender Sturmdauer die berechnete Belastung des Deckwerks bei einer größeren Anzahl an Wellen mit kürzerer Wellenperiode höher als durch eine entsprechend geringere Anzahl an Wellen mit längeren Wellenperioden.

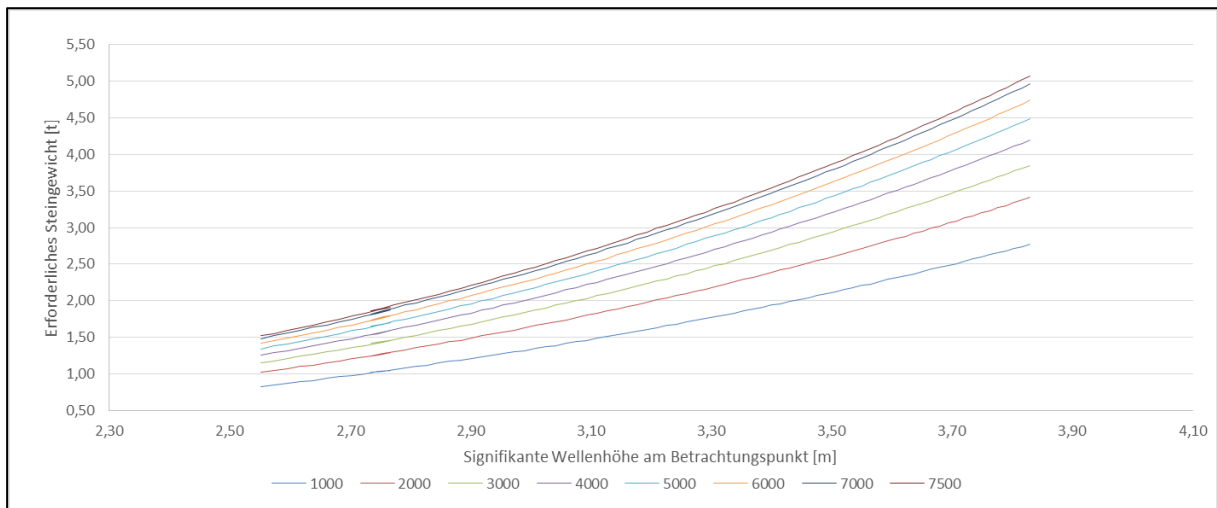


Abbildung 38: Erforderliches Steingewicht nach Van der Meer in Abhängigkeit von den berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk für das Klimaszenario RCP8.5 max und einer Anzahl der einwirkenden Wellen zwischen 1.000 ($T_P = 36$ s) und 7.500 ($T_P = 4,8$ s) Wellen

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse der Beispielrechnung für den maximalen Meeresspiegelanstieg des Szenarios RCP8.5 und die Berechnungsansätze nach Hudson sowie nach Van der Meer (1.000 und 7.000 Wellen). Der Ansatz nach Van der Meer erlaubt eine individuelle Berücksichtigung der Anzahl der Wellen bzw. der Wellenperiode, wodurch wie zuvor erläutert ein deutlicher Einfluss auf das erforderliche Steingewicht besteht. Der Ansatz nach Hudson berücksichtigt die Anzahl der während eines Sturmereignisses auftretenden Wellen hingegen nicht. Für den Fall nicht-gebrochene Welle am Bauwerk, d.h. für eine signifikante Wellenhöhe von bis zu etwa 2.8 m liefert die Berechnung nach Hudson ein Ergebnis, das etwa einer mittleren Anzahl der beiden zugrunde gelegten Wellenanzahlen nach Van der Meer entspricht. Für den Fall gebrochene Welle am Bauwerk gibt der Ansatz

nach Hudson hingegen deutlich höhere erforderliche Steingewichte aus als der Ansatz nach Van der Meer.

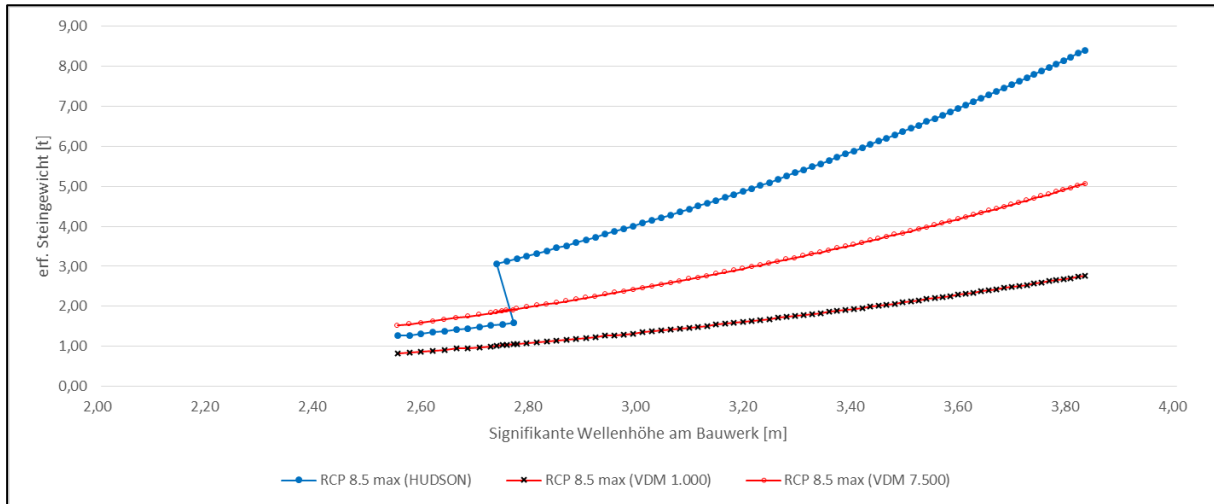


Abbildung 39: Erforderliches Steingewicht nach Hudson und nach Van der Meer in Abhängigkeit von der berechneten signifikanten Wellenhöhe am Bauwerk für das Klimaszenario RCP8.5 mit einem maximalen Meeresspiegelanstieg von 1,10 m sowie mit 1.000 und mit 7.500 Wellen

In den Ansatz von Van der Meer gehen im Vergleich zum Ansatz von Hudson zusätzliche Einflussparameter ein, die jedoch nur dann zu einer verbesserten Abschätzung der erforderlichen Deckschichtgewichte führen, wenn diese Einflussgrößen wie Sturmdauer und Anzahl der einwirkenden Wellen realitätsnah angesetzt werden können.

4.4.2.1.3 Wellenaufbauhöhe und -überlaufrate an einem geschütteten Wellenbrecher

Neben der Deckwerksbemessung eines Wellenbrechers ist zudem auch von Bedeutung mit welchem Freibord ein Wellenbrecher gebaut werden muss, um den dahinterliegenden Bereich vor Überschwemmungen zu schützen bzw. eine ausreichende Wellenruhe im Hafenbereich zu gewährleisten. In die Berechnung des Freibords gehen Eingangswerte wie Wellenaufbauhöhe und Wellenüberlaufrate ein, wobei die Wellenüberlaufrate abhängig von der Wellenaufbauhöhe am Bauwerk ist. Mit steigendem Meeresspiegelanstieg infolge des Klimawandels verringert sich jedoch das Freibord an bestehenden wasserbaulichen Anlagen, womit eine Erhöhung der Wellenüberlaufrate einhergeht und der zu schützende Bereich gefährdet sein kann. Bei zu hohen Wellenüberlaufraten können zudem durch ablaufendes Wasser auf der rückseitigen Böschung Schäden entstehen, die zum Versagen der Konstruktion führen können.

Im Folgenden wird die Auswirkung des Klimawandels auf Wellenaufbauhöhe und -überlaufrate an einem Wellenbrecher anhand des Bemessungsansatzes nach EurOtop (2018) betrachtet.

4.4.2.1.4 Ermittlung der Wellenaufbauhöhe

Die Wellenaufbauhöhe beschreibt die vertikale Höhendifferenz zwischen dem Ruhewasserspiegel und der Wellenausbreitungshöhe entlang der Böschungsoberfläche infolge einer auf der Böschung auftreffenden Welle.

Beim Berechnungsansatz zur Bemessung der Wellenaufbauhöhe wird nach EurOtop (2018) zwischen dem Mittelwertansatz sowie dem Designwertansatz unterschieden. Die Formel des Mittelwertansatzes sollte zur Vorhersage oder zum Vergleich von Testdaten verwendet werden. Der Designwertansatz basiert auf dem Mittelwertansatz, es werden jedoch Unsicherheiten in die Formel mit einbezogen, was für die Bemessung von wasserbaulichen Anlagen von Bedeutung ist. Da ein reiner Vergleich zwischen verschiedenen Wellenaufbauhöhen in Abhängigkeit unterschiedlicher Seegangparameter durchgeführt werden soll und Unsicherheiten nicht berücksichtigt werden, werden die Wellenaufbauhöhen an einem geschütteten Wellenbrecher unter Verwendung des Mittelwertansatzes wie folgt ermittelt:

$$R_{u2\%} = 1,65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \quad \text{Gl. 4-12}$$

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\left(\frac{H_{m0}}{L_{m-1,0}}\right)}} \quad \text{Gl. 4-13}$$

$$L_{m-1,0} = \frac{g}{\left(\frac{2\pi}{T_{m-1,0}}\right)} \cdot T_{m-1,0} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi}{L_{m-1,0}} \cdot d\right) \quad \text{Gl. 4-14}$$

$$T_p = 1,1 \cdot T_{m-1,0} \quad \text{Gl. 4-15}$$

$R_{u2\%}$	Wellenaufbauhöhe [m]
γ_b	Einflussfaktor infolge einer Berme [-]
γ_f	Einflussfaktor infolge der Rauigkeit des Deckwerks [-]
γ_β	Einflussfaktor infolge der Wellenanlafrichtung [-]
$\xi_{m-1,0}$	Brecherparameter [-]
H_{m0}	Spektrale Wellenhöhe [m]
$L_{m-1,0}$	Spektrale Wellenlänge [m]
$T_{m-1,0}$	Spektrale Wellenperiode [s]
T_p	Peak Wellenperiode [s]
d	Wassertiefe am Betrachtungspunkt [m]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]

Die spektrale Wellenhöhe H_{m0} wird gemäß EurOtop (2018) mit der signifikanten Wellenhöhe H_s gleichgesetzt. Der Einflussfaktor infolge einer Berme kann hier aufgrund der gewählten

Geometrie vernachlässigt werden. Auch wird eine senkrechte Wellenanlaufung angenommen, so dass eine Minderung infolge schräg einlaufender Wellen vernachlässigt werden kann. Nach EurOtop (2018) geht bei der Verwendung von Bruchsteinen mit einem 2-lagigen und durchlässigen Aufbau ein Beiwert infolge der Rauigkeit des Deckwerks von $\gamma_f = 0,4$ in die Berechnung ein.

Abbildung 40 zeigt den Wellenauflauf an der wasserseitigen Böschung des Wellenbrechers bezogen auf den Ruhewasserstand in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe am Bauwerk. Der Wellenauflauf fällt selbst bei den kleinsten berechneten Wellen (Windgeschwindigkeit 20 m/s) größer aus als das vorhandene Freibord. Dies bedeutet nicht direkt, dass es sich ungünstig auf die Stabilität des Bauwerks auswirken muss, es bedeutet lediglich, dass erhöhte Wellenüberlaufraten entstehen. Je höher der Wellenauflauf ist, desto höher ist auch die Wellenüberlaufrate.

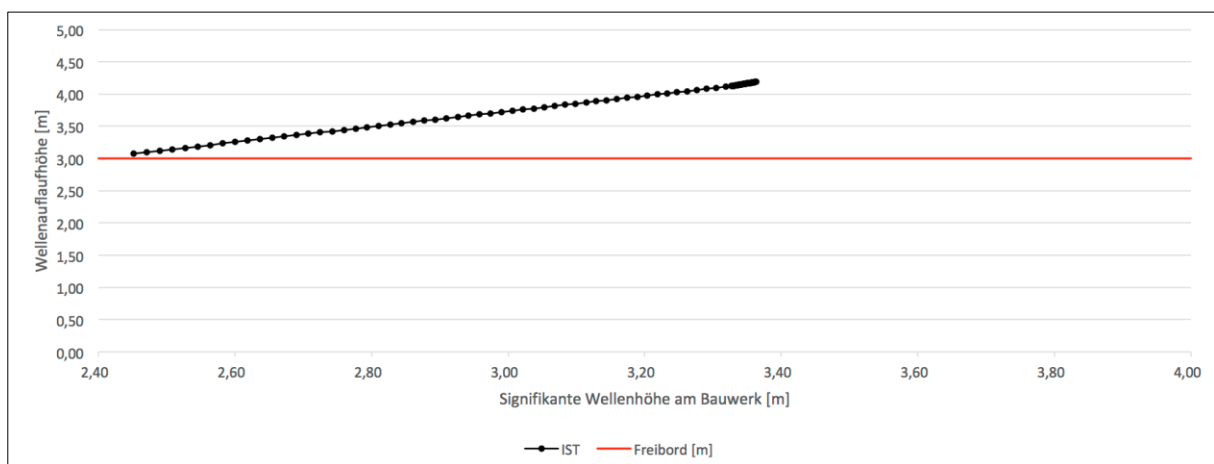


Abbildung 40: Wellenauflauf am Wellenbrecher nach EurOtop (2018) im IST-Zustand in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk

Steigt der Meeresspiegel an, so verringert sich auch der Freibord an den bestehenden Bauwerken. In Abbildung 41 wird beispielhaft der Wellenauflauf bezogen auf den maximalen Meeresspiegelanstieg von 1,1 m aus dem Klimawandelszenario RCP8.5 dargestellt. Der Betrag des eigentlichen Wellenaufbaus hat sich gegenüber dem IST-Zustand kaum verändert, da der Zuwachs in der Wellenaufbauhöhe in erster Linie auf den steigenden Mittelwasserstand und somit den verringerten Freibord zurückzuführen ist und nicht auf einen steigenden Wellenaufbau über Mittelwasser.

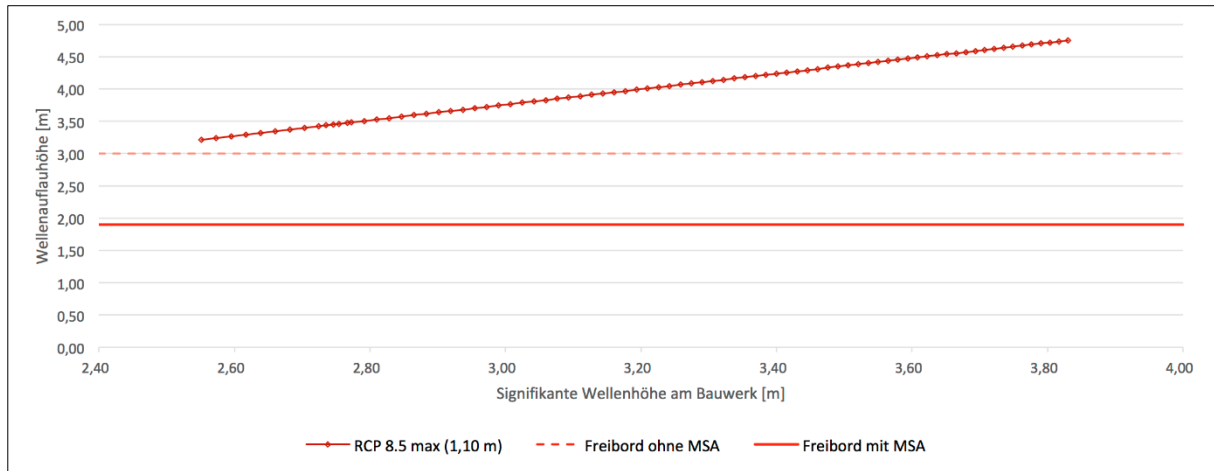


Abbildung 41: Wellenauflauf am Molenbauwerk nach EurOtop (2018) mit maximalen Meeresspiegelanstieg des RCP8.5-Szenarios (1,10 m) in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk

4.4.2.1.5 Ermittlung der Wellenüberlaufrate

Die Wellenüberlaufrate beschreibt die durchschnittliche Abflussmenge, die infolge von Welleneinwirkung über das Bauwerk strömt. Nach EurOtop (2018) können bei einer Wellenüberlaufrate von mehr als 10 l/s/m erste Erosionen auf der Binnenböschung eines geböschten Wellenbrechers entstehen. Die kritische Wellenüberlaufrate wird mit 100 l/s/m angegeben, bei der Wellen in dem zu schützenden Bereich transmittieren und die Wellenruhe hinter dem Bauwerk bzw. im Hafenbereich nicht mehr gewährleistet werden kann. Auch muss das Deckwerk auf der Wellenbrecherkrone und Binnenböschung gegen Erosionen bemessen und entsprechend dimensioniert werden.

Nach EurOtop (2018) wird für geschüttete Wellenbrecher mit einer Neigung von 1:2 folgender Berechnungsansatz zur Ermittlung der Wellenüberlaufrate angegeben:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^2}} = 0,09 \cdot \exp \left[-1,5 \left(\frac{R_c}{H_{m0} \cdot Y_f \cdot Y_\beta} \right)^{1,3} \right] \quad \text{Gl. 4-16}$$

q	Wellenüberlaufrate [l/s/m]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
H _{m0}	Spektrale Wellenhöhe [m]
R _c	Freibord [m]
Y _f	Einflussfaktor infolge der Rauigkeit des Deckwerks [-]
Y _β	Einflussfaktor infolge der Wellenanlaufrichtung [-]

In Abbildung 42 sind die berechneten Wellenüberlaufraten in Abhängigkeit von den betrachteten signifikanten Wellenhöhen und verschiedenen Klimaszenarien dargestellt.

Zudem ist der Grenzwert von $q=10$ m/s eingezeichnet, bei dem erste Erosionserscheinungen auf der Wellenbrecherkrone bzw. der Binnenböschung entstehen können. Im IST-Zustand wird der Grenzwert bei einer Wellenhöhe am Bauwerk von etwa 2,9 m bzw. bei einem Sturmereignis mit einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s überschritten. Mit zunehmenden Meeresspiegelanstieg ist auch ein erheblicher Anstieg der Wellenüberlaufrate zu verzeichnen. Bei einem Meeresspiegelanstieg von etwa 50 cm (RCP4.5 mittel) besteht während eines Sturmereignisses mit der geringsten angesetzten Windgeschwindigkeit von 20 m/s und der zugehörigen signifikanten Wellenhöhe von etwa 2,5 m bereits die Gefahr erster Erosionen auf der Krone bzw. Binnenböschung des Bauwerks.

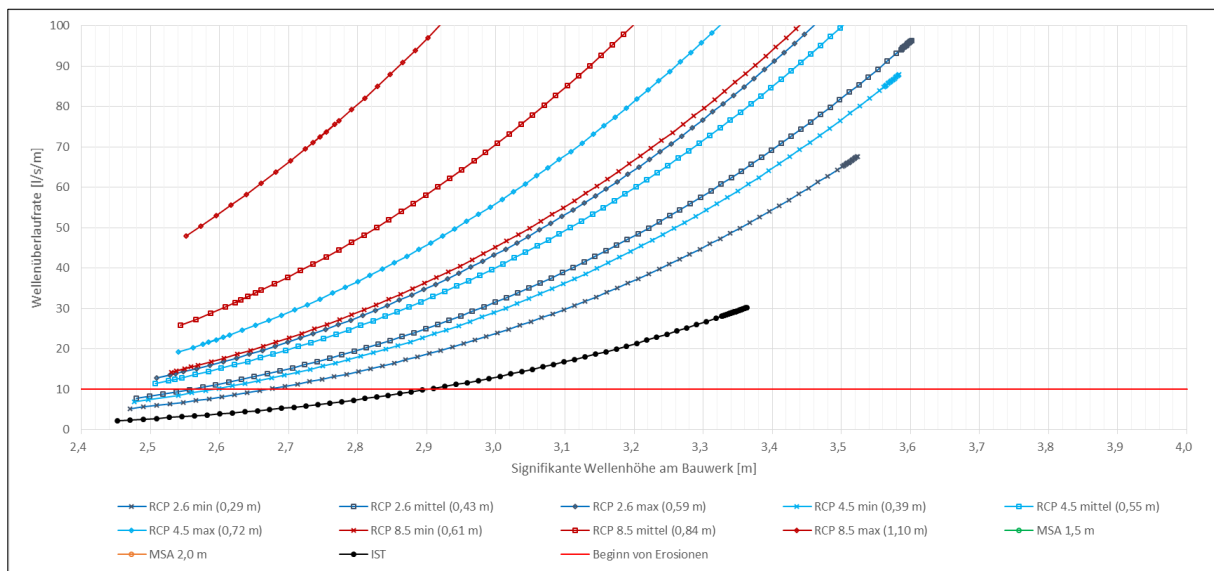


Abbildung 42: Vergleich der Wellenüberlaufraten vom IST-Zustand gegenüber den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5, 8.5 und einem extremen Meeresspiegelanstieg von 1,5 m und 2,0 m in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk. Die rote Linie zeigt den Beginn von Erosionen auf der Binnenböschung bei 10 $l/s/m$

Bei der Betrachtung der kritischen Wellenüberlaufrate von 100 $l/s/m$ bezogen auf die Klimaszenarien RCP2.6, 4.5, 8.5 und einem extremen Meeresspiegelanstieg von 1,5 m und 2,0 m zeigen die Ergebnisse in Abbildung 43, dass bereits bei einem vergleichsweise geringen Meeresspiegelanstieg der kritische Wert bei den höheren signifikanten Wellenhöhen erreicht wird. Die Klimaszenarien mit erhöhtem Meeresspiegelanstieg erreichen den Grenzwert deutlich früher. Mit einem Meeresspiegelanstieg von 1,5 m bzw. 2,0 m ist der kritische Wert bereits bei kleineren Sturmereignissen mit Windgeschwindigkeiten von 20 m/s und einer Wellenhöhe von ca. 2,55 m erreicht bzw. übersteigt den Grenzwert um ein Vielfaches.

Die Untersuchungen zeigen, dass auch wenn der Meeresspiegelanstieg nicht in kürzester Zeit deutlich ansteigen wird, Wellenbrecher oder Molenbauwerke auf lange Sicht durch die

klimawandelbedingten Änderungen der Bemessungsgrößen an die zukünftigen Belastungen angepasst werden müssen, um weiterhin einen ausreichenden Schutz vor Überschwemmungen bzw. eine ausreichende Wellenruhe im Hafengebiet bieten zu können.

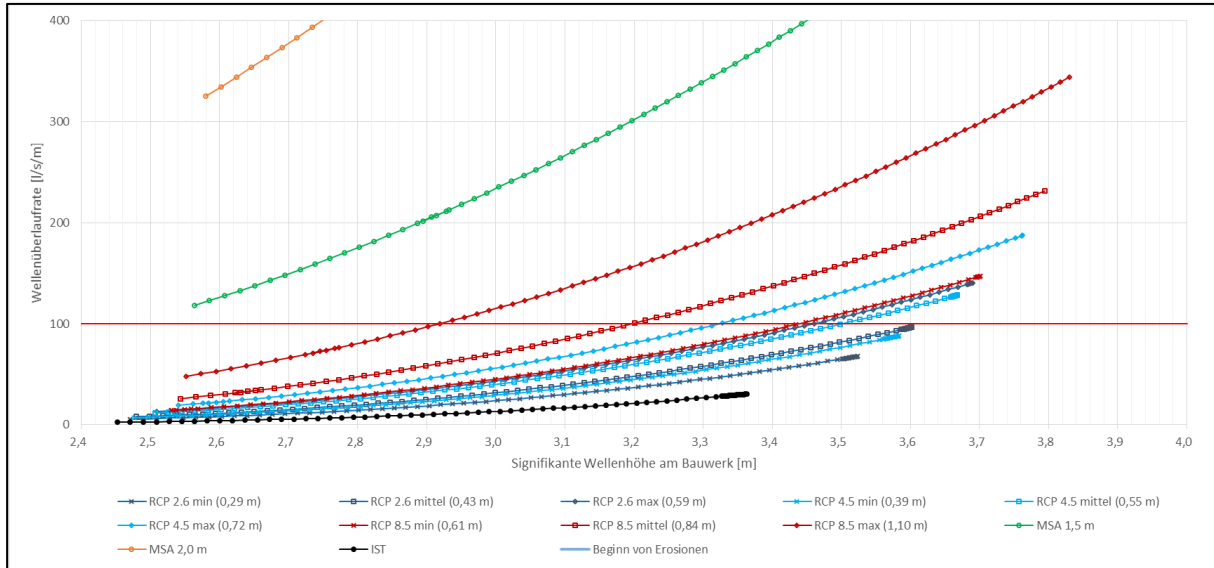


Abbildung 43: Vergleich der Wellenüberlaufarten vom IST-Zustand gegenüber den Klimaszenarien RCP2.6, 4.5, 8.5 und einem extremen Meeresspiegelanstieg von 1,5 m und 2,0 m in Abhängigkeit der berechneten signifikanten Wellenhöhen am Bauwerk. Die rote Linie zeigt die kritische Wellenüberlaufarten von 100 l/s/m

4.4.2.2 Kaianlagen

4.4.2.2.1 Höhe der Betriebsfläche

Ein wichtiger Parameter bei der Planung von Kaianlagen ist die Höhenlage der Betriebsebene, wodurch die Oberkante der Uferfassung festgelegt wird. Dabei ist zwischen Betriebsebenen in hochwassersicheren Dockhäfen, d.h. durch Schleusen vom Meer getrennten Bereichen, und Betriebsebenen in zum Meer hin offenen Häfen zu unterscheiden. Die Höhe der Betriebsebene in Dockhäfen sollte sich 2,0 bis 2,5 m, mindestens jedoch 1,5 m, über dem mittleren Betriebswasserstand im Hafen sowie über dem höchsten Grundwasserstand befinden. In offenen Häfen ist die Höhe und Häufigkeit von Hochwasser maßgebend für die Lage der Betriebsfläche. Die Betriebsebene sollte frei von Hochwasser sein, insbesondere beim Umschlag von Massengut, aber auch beim Umschlag von Stückgut bzw. Containern sollte nur in besonderen Fällen eine Ausnahme zugelassen werden. (EAU 2020)

Grundsätzlich ist die Gefahr der Überflutung der Betriebsebene auch bei einem steigenden Meeresspiegelanstieg von den jeweiligen Bedingungen vor Ort abhängig. Zur Identifizierung von durch Überflutung gefährdeter Gebiete bietet es sich an, Hochwassergefahrenkarten zu

erstellen (Abbildung 44). Im einfachsten Fall können diese Informationen auch aus topographischen Karten abgeleitet werden. Im Rahmen der Entwicklung einer Anpassungsstrategie ist darüber hinaus die Wahrscheinlichkeit der Betroffenheit und der Grad des Risikos für den Hafen abzuschätzen.

Bei der Risikoanalyse werden die Auswirkung einer potentiellen Klimagefahr und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintreffens bzw. ihrer Klassifizierung berücksichtigt. Abbildung 45 zeigt das Ergebnis einer solchen exemplarischen

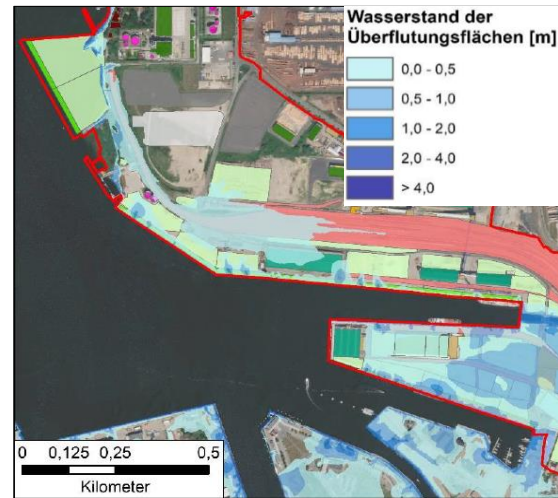


Abbildung 44: Hochwassergefahrenkarte einer Hafenfläche inklusive eines Anstiegs des Meeresspiegels (Baumgärtner 2020)

Bewertung für die Folgen des Meeresspiegelanstiegs. Letztlich unterliegen nur von der Überflutung betroffene Flächen, deren Überflutung eine mindestens moderate Bedeutung für die Funktionalität des Hafens hat, einem hohen Risiko für die entsprechende Klimagefahr bzw. das entsprechende Klimaszenario.

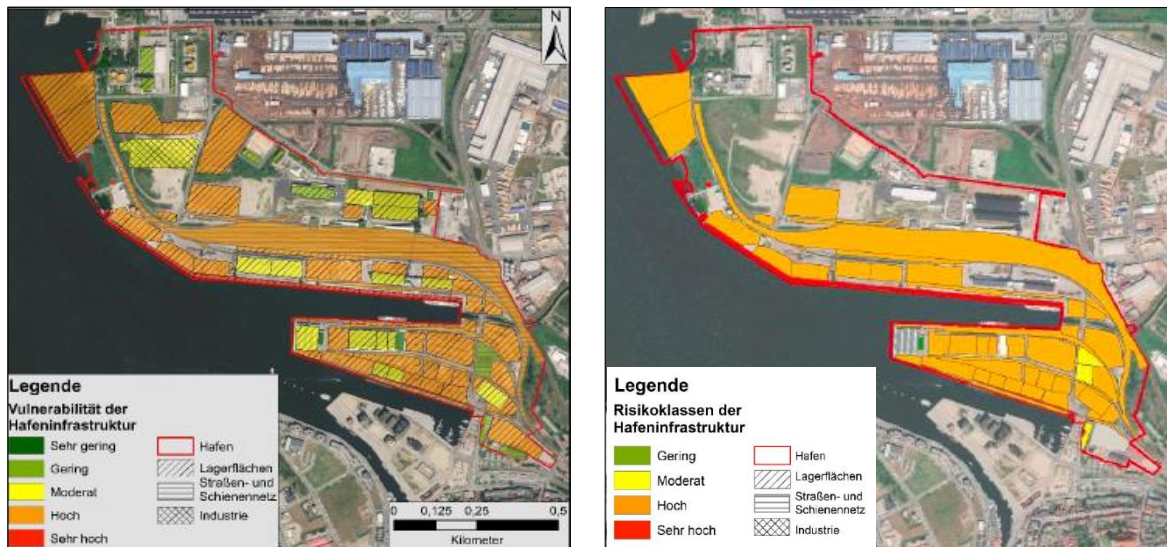


Abbildung 45: Links: Exemplarische Bewertung der Auswirkungen einer Klimagefahr (in der Abbildung als Verwundbarkeit bezeichnet) für ein Hafengelände. Bei der Klimagefahr handelt es sich um den Meeresspiegelanstieg. Rechts: Sich aus der Überlagerung von Wahrscheinlichkeit der Gefährdung -abgeleitet aus der Hochwassergefahrenkarte (Abbildung 44) - und der Auswirkung der Klimagefahr ergebendes Risiko. (Baumgärtner 2020).

4.4.2.2 Wellenüberlauf

Die Hochwassergefahrenkarten bilden eine mögliche Überflutung der Betriebsebene infolge von Hochwasserständen und unter Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs ab. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass die Kaimauer lediglich infolge von auf die Uferwand anlaufende Wellen überspült wird, ohne dass der Hochwasserstand bis auf die Höhe der Betriebsebene reicht. In diesem Zusammenhang wird vom Wellenüberlauf bzw. der Wellenüberlaufrate gesprochen, die aus Gründen der Hochwassersicherheit der Betriebsebene minimal sein sollte. Die Wellenüberlaufrate kann nach EurOtop (2018) bemessen werden.

Bei der Berechnung der Wellenüberlaufrate an einer vertikalen Uferwand haben verschiedene Randbedingungen Einfluss auf den Berechnungsansatz nach EurOtop (2018) und müssen beachtet werden. Hierzu zählen:

- Auswirkung des Vorlands auf den Seegang
- Aufbau der Kaje
- Wellenbrechen
- Höhe des Freibords

Diese Einflussfaktoren sind wiederum abhängig vom anzusetzenden Sturmereignis zur Ermittlung des Seegangs sowie den Wassertiefen vor der Kaje, welche zudem infolge des Meeresspiegelanstiegs zunehmen können. Abbildung 46 zeigt das Berechnungsschema zur Ermittlung der Wellenüberlaufrate nach EurOtop (2018). Es wird zwischen dem Designwert- und dem Mittelwertansatz unterschieden (siehe Kapitel 4.4.2.1.4). Da im Rechenbeispiel die Wellenüberlaufraten an einer bestehenden Kaianlage untersucht werden sollen, wird der Designwertansatz mit Einbindung von Unsicherheiten verwendet. Die spektrale Wellenlänge ($L_{m-1,0}$) kann nach Gl. 4-14 berechnet werden.

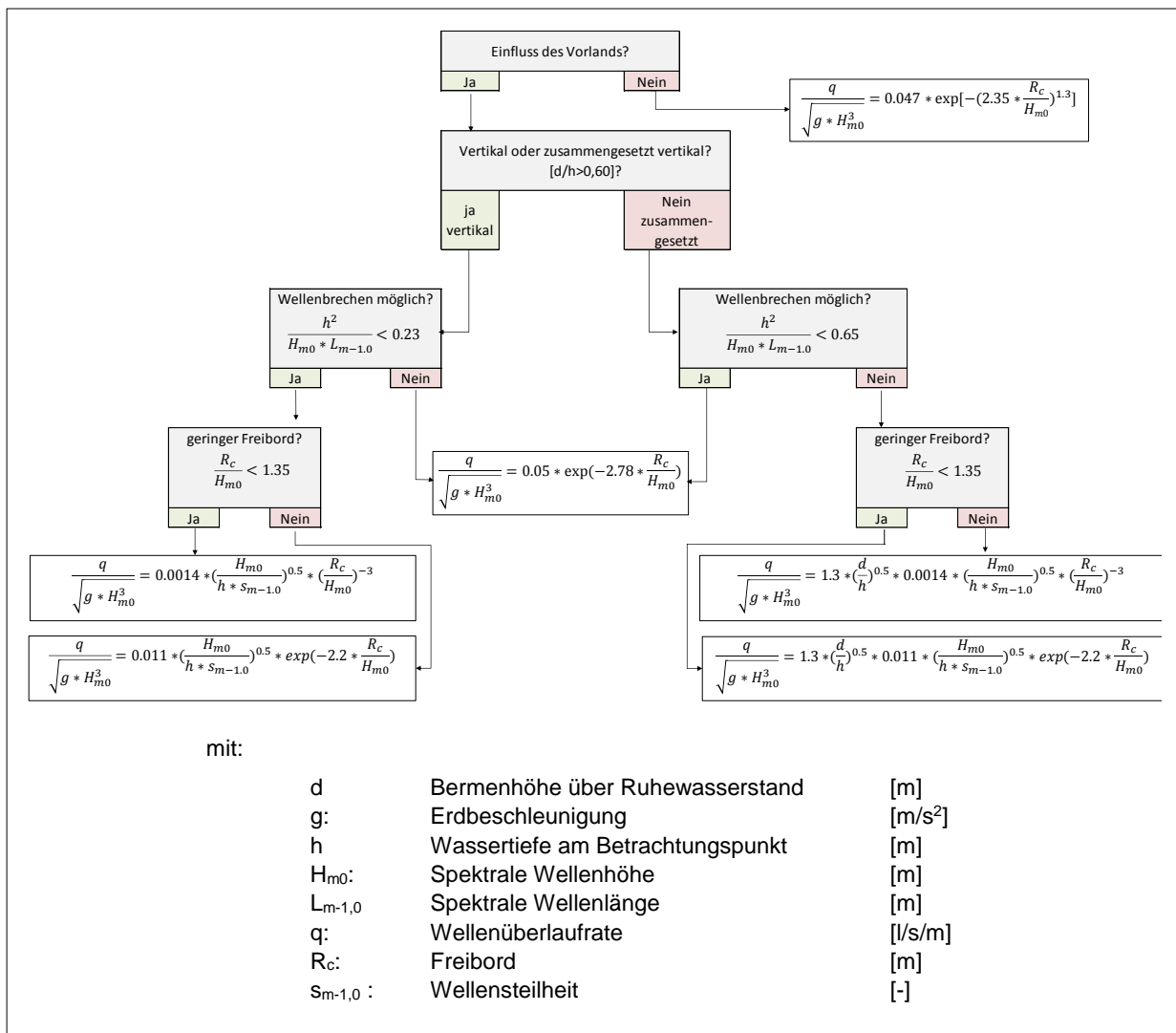


Abbildung 46: Berechnungsschema des Designwertansatzes der Wellenüberlauffrate einer vertikalen/ zusammengesetzten vertikalen Wand nach EurOtop (2018)

Als Fallbeispiel wird hier eine Kaianlage mit einer Geländeoberkante von +7,50 mNN in Bremerhaven untersucht. Für die Berechnungen wurde eine Wassertiefe an der Spundwand mit der Solltiefe von -18,5 m NN gewählt. Zudem sind Tidehochwasserstände zu berücksichtigen. In Mai (2004) wurden umfangreiche Untersuchungen bezüglich der Auswirkung des Klimawandels auf den Anstieg der Tidehochwasserstände (Thw) im Weserästuar durchgeführt. In Anlehnung an die Untersuchungen nach Mai (2004) konnten die in Tabelle 22 dargestellten Eingangswerte für die Berechnungen der Wellenüberlaufmengen am Pegel Bremerhaven entnommen werden.

Tabelle 22: Ermittelte Tidehochwasserstände nach den betrachteten Szenarien und Wiederkehrintervallen am Pegel Bremerhaven

Szenario	20-jähriges Ereignis	50-jähriges Ereignis	100-jähriges Ereignis
Ist-Zustand (0 m)	Thw: +5,10 NN	Thw: +5,55 NN	Thw: +5,85 NN
RCP 2.6 mittel (0,43 m)	Thw: +5,50 NN	Thw: +5,80 NN	Thw: +6,15 NN
RCP 4.5 mittel (0,55 m)	Thw: +5,60 NN	Thw: +6,00 NN	Thw: +6,20 NN
RCP 8.5 mittel (0,84 m)	Thw: +6,00 NN	Thw: +6,30 NN	Thw: +6,50 NN
RCP 8.5 max (1,1 m)	Thw: +6,15 NN	Thw: +6,50 NN	Thw: +6,70 NN

Weiterhin wurden in Mai (2004) auch die Seegangparameter für den Bereich an der Kaianlage in Bremerhaven untersucht. Für den Standort am Überseehafen in Bremerhaven wurden maximale signifikante Wellenhöhen von rund 1,40 m ermittelt, die in Abhängigkeit vom gewählten Szenario etwa einem 250 bis 3.000 jährigem Sturmereignis entsprechen. Auf Grundlage der von Mai (2004) ermittelten Seegangparameter wird die Untersuchung der Wellenüberlaufrate mit signifikanten Wellenhöhen von 0,5 m bis 1,40 m durchgeführt. In der Betrachtung der Wellenperioden hinsichtlich der Überschreitungswahrscheinlichkeiten in Mai (2004) wurden für ein 100– bzw. 1.000–jähriges Sturmereignis Wellenperioden zwischen $T_P = 6,1$ s und $6,8$ s ermittelt. Für die Berechnung der Wellenüberlaufraten wurde die Wellenperiode zu $T_P = 6,5$ s gewählt.

Die ermittelten Wellenüberlaufraten werden mit den für eine Kaianlage relevanten zulässigen mittleren Überlaufmengen q_{zul} nach EurOtop (2007) und (2018) verglichen, die wie folgt gegliedert sind:

- Bei zu schützenden Bauwerkselementen: $q_{zul} = < 1,0$ l/s/m
- Bei zu schützenden Werten in einem Abstand von 5 bis 10 m hinter der Schutzlinie: $q_{zul} = < 1,0$ l/s/m
- Bei einer Nutzung des Geländes hinter der Schutzeinrichtung durch Menschen: $q_{zul} = 1$ l/s/m bei einer signifikanten Wellenhöhe bis 2,0 m, $q_{zul} = 10-20$ l/s/m bei einer signifikanten Wellenhöhe bis 1,0 m
- Bei einer Nutzung des Geländes hinter der Schutzeinrichtung von Fahrzeugen oder Zügen: $q_{zul} = 10-20$ l/s/m bei einer signifikanten Wellenhöhe bis 2,0 m, $q_{zul} = < 75$ l/s/m bei einer signifikanten Wellenhöhe bis 1,0 m

- Zum Schutz einer gepflasterten oder geteerten Fläche hinter einem senkrechten Bauwerk $q_{zul} = 200 \text{ l/s/m}$

Abbildung 47 zeigt das Erreichen des untersten Grenzwertes $q_{zul}=1,0 \text{ l/s/m}$, d.h. für zu schützende Werte in einem Abstand von 5 bis 10 m hinter der Kaje, im IST-Zustand bei Auftreten eines 20-, 50- bzw. 100-jährigen Tidehochwasserstands in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe. Bei einem 20- und 50-jährigen Sturmflutereignis besteht demnach ab einer signifikanten Wellenhöhe von etwa 1,20 m die Gefahr, dass Schäden an auf der Kaje gelagerten Schutzgütern entstehen können. Auch ist der Aufenthalt von Arbeitskräften an der Kaje zu untersagen. Im Falle eines 100-jährigen Ereignisses bestehen diese Gefahren bereits bei einer signifikanten Wellenhöhe von 0,95 m. Die größeren tolerierbaren Überlaufraten von $q_{zul} = 20 \text{ l/s/m}$, bei den der Fahrzeug- bzw. Zugverkehr am Containerterminal einzustellen ist, wird mit den betrachteten signifikanten Wellenhöhen im IST-Zustand nicht erreicht. Gleiches gilt für die Gefährdung des Belags bei einer Wellenüberlauftrate von 200 l/s/m .

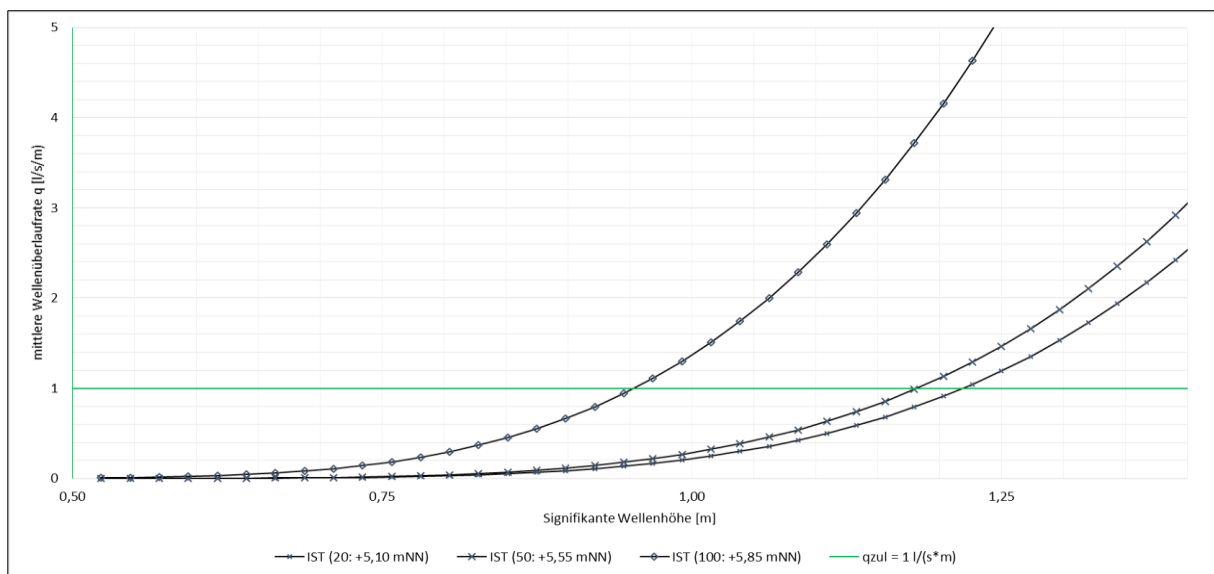


Abbildung 47: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand für ein 20-, 50- und 100-jährliches Tidehochwasser in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlauftrate von $q_{zul} = 1 \text{ l/s/m}$

Werden für ein 20-jährliches Sturmereignis die Auswirkungen des Klimawandels für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 mit dem IST-Zustand verglichen, wird der Grenzwert von $q_{zul}=1,0 \text{ l/s/m}$ infolge des Meeresspiegelanstieg erheblich früher, d.h. je nach Szenario ab einer signifikanten Wellenhöhe von etwa 0,8 m, erreicht (Abbildung 48).

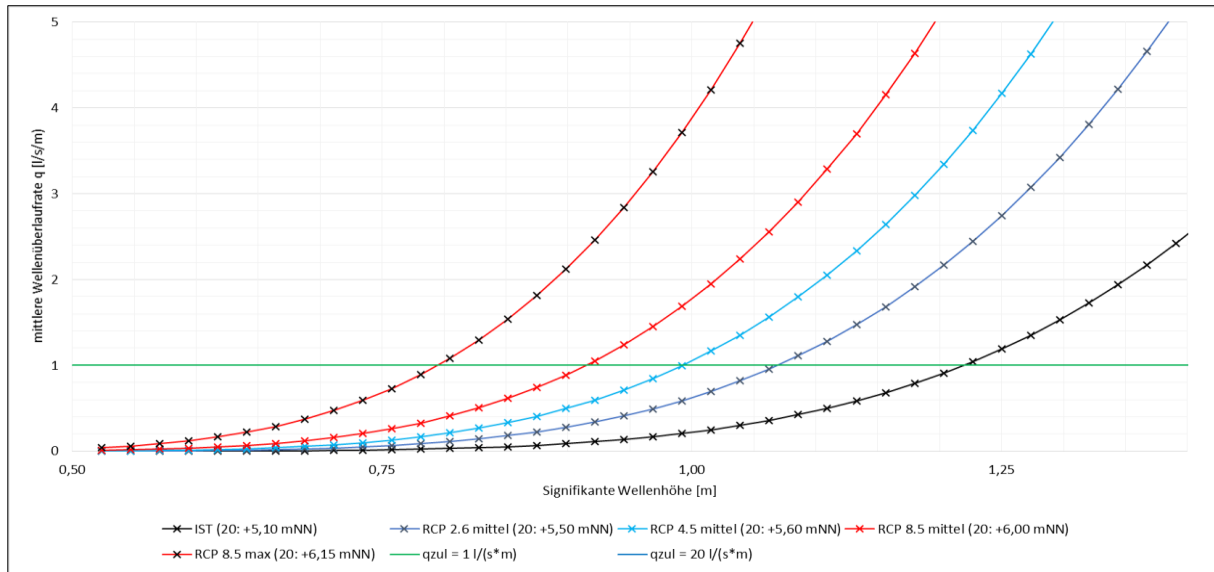


Abbildung 48: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 mit einer statistischen Wiederkehr von 20 Jahren in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 1 \text{ l/s/m}$

Die Einstellung des Fahrzeug- bzw. Zugverkehrs an der Kaianlage bei einer Wellenüberlaufrate von ($q_{zul} = 20 \text{ l/s/m}$) wird bei einem 20-jährlichen Sturmereignis lediglich bei dem Szenario RCP8.5 erreicht. (Abbildung 49). Eine Gefährdung der Beschädigung der Oberfläche der Kaianlage mit $q_{zul} = 200 \text{ l/s/m}$ besteht bei den betrachteten Meeresspiegelanstiegsszenarien für ein 20-jährliches Sturmereignisses nicht.

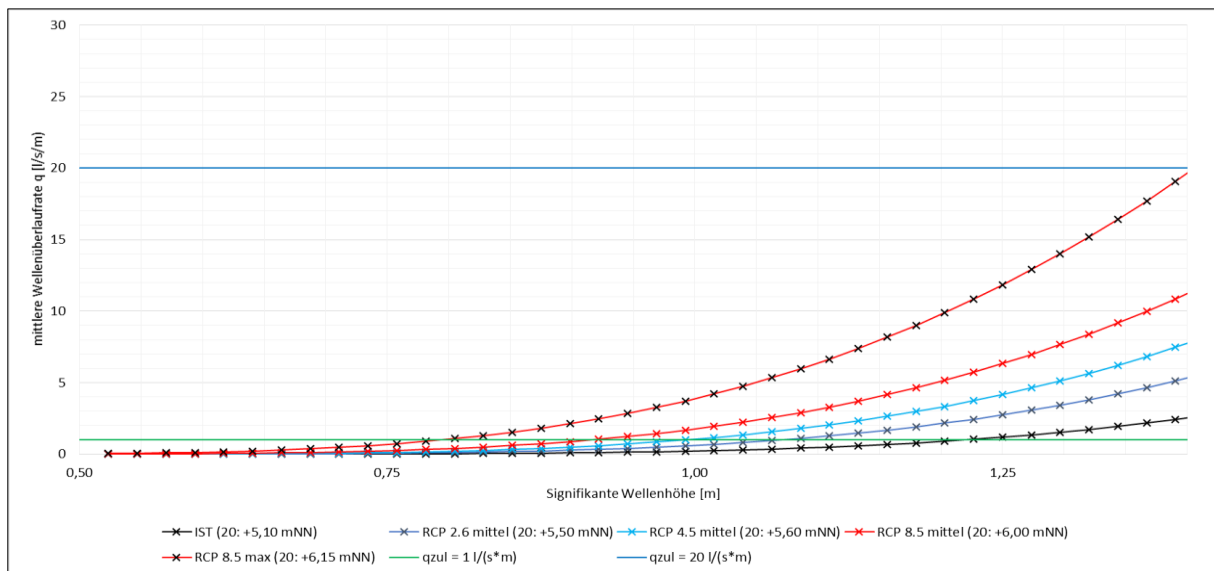


Abbildung 49: Wellenüberlaufraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 mit einer statistischen Wiederkehr von 20 Jahren in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufrate von $q_{zul} = 1 \text{ l/s/m}$ und $q_{zul} = 20 \text{ l/s/m}$

Die berechneten Wellenüberlaufsraten und der Grenzwert von $q_{zul}=20$ l/s/m für die betrachteten Szenarien mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren sind in Abbildung 50 dargestellt. Auch hier zeigen die Ergebnisse erwartungsgemäß, dass je größer der Meeresspiegelanstieg und der zugehörige Tidehochwasserstand sind, desto früher tritt die Gefahr ein, dass Schäden an Sachgütern und Einrichtungen an der Kaianlage auftreten können. Gleiches gilt für den Aufenthalt von Personen an der Kaianlage bzw. die Einstellung des Umschlagbetriebes für Fahrzeuge.

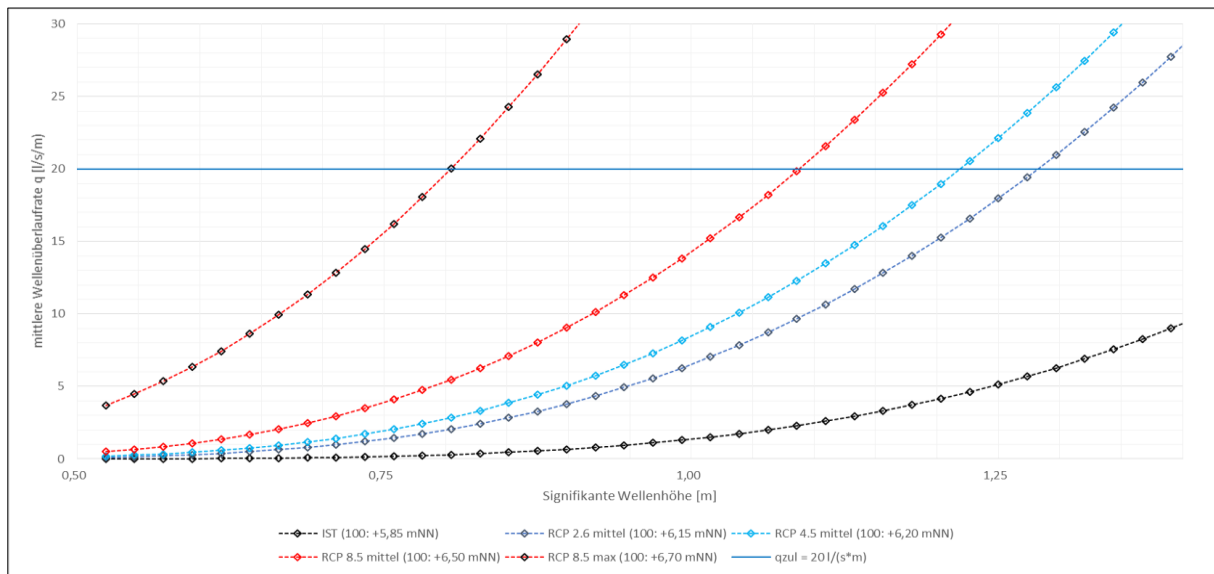


Abbildung 50: Wellenüberlaufsraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 mit einer statistischen Wiederkehr von 100 Jahren in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufsraten von $q_{zul} = 20$ l/s/m

Schäden an der Oberfläche der Kaianlage infolge extremer Wellenüberlaufsraten mit $q_{zul}=200$ l/s/m werden auch mit maximalem Meeresspiegelanstieg von 1,10 m bzw. einem 100-jährigen Tidehochwasserstand von +6,70 mNN bei einer signifikante Wellenhöhe von 1,40 m nicht erreicht (Abbildung 51).

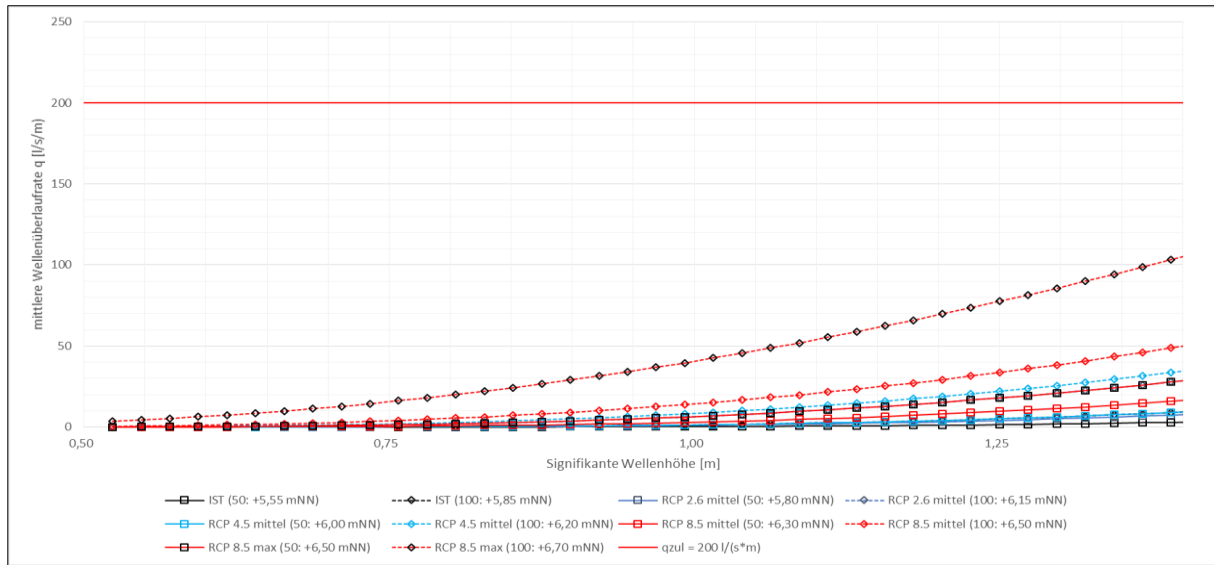


Abbildung 51: Wellenüberlaufsraten im IST-Zustand und den ausgewählten Klimawandelszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 mit einer statistischen Wiederkehr von 20 Jahren in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe im Vergleich zu einer zulässigen Wellenüberlaufsraten von $q_{zul} = 1 \text{ l/s/m}$, $q_{zul} = 20 \text{ l/s/m}$ und $q_{zul} = 200 \text{ l/s/m}$

Die Sensitivitätsanalyse bezüglich der Wellenüberlaufsraten nach EurOtop (2018) am Beispiel einer Kaianlage in Bremerhaven zeigen, dass eine starke Abhängigkeit zwischen dem zu erwartendem Meeresspiegelanstieg, den daraus resultierenden Tidehochwasserständen und Wellenhöhen sowie der Gewährleistung eines sicheren Umschlagsbetriebs am Terminal besteht. Wird ein kritischer Tidehochwasserstand in Kombination mit entsprechend hohem einwirkenden Seegang erreicht, kann die Wellenüberlaufsraten stark ansteigen und den fortlaufenden Betrieb am Hafen bereits bei einem Sturmereignis mit geringer Jährlichkeit gefährden.

4.4.2.2.3 Anpassung von Ufermauern an Wasserstände bzw. Wellenüberlauf

Tatsächlich werden bereits heute tiefliegende Kaianlagen mithilfe von Hochwasserschutzwänden vor hohen Wasserständen geschützt, etwa in Brake oder in Hamburg (Abbildung 52). Das vorgestellte Rechenbeispiel für die Wellenüberlaufsraten an einer Kaianlage in Bremerhaven wurde unter der Annahme einer senkrechten Wand durchgeführt. Die Stromkaje in Bremerhaven ist aufgrund ihrer Ausrichtung und der relativ offenen Ausrichtung in Richtung der Nordsee für einen Seehafen verhältnismäßig großen Seegangsbelastungen ausgeliefert. Daher wurde bei der Planung der Stromkaje am Container Terminal eine Wellenkammer vorgesehen (Abbildung 52), mit der sich die Seegangsbelastungen bzw. der Wellenaufwurf auf die Kaje deutlich reduzieren lässt. Die

Überlaufraten wurden für diesen Spezialfall allerdings anhand von physikalischen Modellversuchen bestimmt.



Abbildung 52: Links: Hochwasserschutzwand am Burchardkai in Hamburg (Alexander Hoernigk (2011), Wikipedia); rechts: Wellenkammer der Stromkaje am Containerterminal in Bremerhaven.

Eine Hochwasserschutzwand bietet die Möglichkeit, eine Kaianlage auch nachträglich vor hohen Wasserständen und Wellenüberlaufraten zu schützen, diese also an den Meeresspiegelanstieg anzupassen. Bei Neubauten kann empfohlen werden, vorrausschauend eine Hochwasserschutzwand vorzusehen oder bei höheren Seegangbelastungen gegebenenfalls an die Planung einer Wellenkammer zu denken. Werden Hafenterminals komplett neu geplant, ist es gegebenenfalls sinnvoll, das Niveau der Hafensfläche von vornherein ausreichend hoch zu legen. Bei bestehenden Terminalflächen erfordert eine solche Maßnahme massive Eingriffe und wird in der Regel unwirtschaftlich sein.

4.4.2.2.4 Wasserdruck

Uferwände in Seehäfen müssen oft relativ hohe Geländesprünge abfangen, da aufgrund der Schiffgrößen vergleichsweise große Wassertiefen vorherrschen. Daher werden in Seehäfen häufig rückverankerte Spundwände und Pfahlrostkonstruktionen, ggf. mit vorgesetzter Spundwand, verwendet. Beim Lastansatz auf Spundwände spielt neben Erddruck und Erdwiderstand der resultierende Wasserdruck in Richtung der Wasserseite eine maßgebliche Rolle. Der Wasserdruck in Richtung der Landseite wirkt dem Erddruck entgegen und ist somit stabilisierend. Somit wirkt sich der Meeresspiegelanstieg wasserseitig positiv auf die Lasteinwirkung einer Spundwand aus. Die Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU) enthalten in Kapitel 3 eine Übersicht anzusetzender resultierender Wasserdrücke auf Ufereinfassungen (EAU 2020). Der landseitige Wasserdruck ist grundsätzlich in Abhängigkeit vom wasserseitigen Wasserstand anzusetzen. Bei fallenden wasserseitigen Wasserständen kann somit nach einem Hochwasserereignis bzw. bei hohen

Grundwasserständen ein resultierender Wasserdruck in Richtung der Wasserseite entstehen. Zu unterscheiden ist die Situation in einem Tidegebiet und einem Nicht-Tidegebiet. In einer Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen auf eine Spundwand untersucht, wenn die nach EAU anzusetzenden Lastannahmen aufgrund des Klimawandels beispielsweise infolge eines extremen Hochwasser- oder Niederschlagsereignisses bzw. aufgrund einer Zunahme des Tidehubs nicht mehr gültig sind. Es wurden die folgenden zwei Fälle untersucht:

Nicht-Tidegebiet:

- Große Wasserstandsschwankungen ohne Durchlaufentwässerung (Fall 2b)
- $\Delta h = a + 0,3 \text{ m}$, mit $a = \frac{1}{2} \cdot (\text{MHW} - \text{MNW})$

Tidegebiet:

- Große Wasserstandsschwankungen ohne Entwässerung – Grenzfall abfließendes Hochwasser (Fall 3c)
- $\Delta h = 0,3 \text{ m} + 2a$, mit $a = \frac{1}{2} \cdot (\text{MThw} - \text{MTnw})$

Änderung:

- Meeresspiegelanstieg: +0,5 m und +1,0 m im Nicht-Tidegebiet und im Tidegebiet
- Δh : +0,1 m und +0,2 m im Nicht-Tidegebiet und im Tidegebiet
- a : +5%, +10% und +15% im Tidegebiet, aufgrund einer Zunahme des Tidehubs

Eingangsparameter:

- Homogene Sandschicht ($\varphi = 32,5^\circ$)
- Kombinierte Spundwand, volle Einspannung
- Unendliche Ankerlänge, 20° Neigung
- 60 kN/m^2 Flächenlast
- Weitere Eingangsparameter wie die Höhenlage der Uferwand sind in Abbildung 53 dargestellt

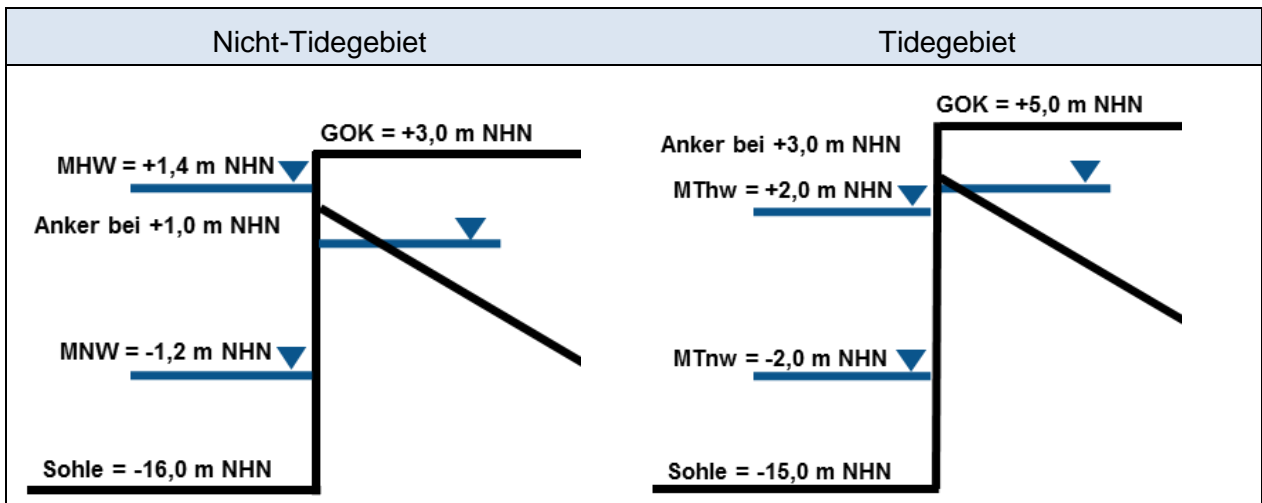


Abbildung 53: IST-Zustand für die Sensitivitätsuntersuchung bzgl. des Wasserüberdrucks in Richtung der Wasserseite. Links: Nicht-Tidegebiet, rechts: Tidegebiet.

Auf Basis der Lastannahmen ergeben sich eine erforderliche Spundwandlänge von rund 34 m für das Nicht-Tidegebiet bzw. 35 m für das Tidegebiet und eine Einbindetiefe von rund 15 m unabhängig davon, ob es sich um das Nicht-Tide oder das Tidegebiet handelt. Infolge der Zunahme des relativen Wasserüberdrucks ergibt sich eine rechnerische Zunahme der erforderlichen Spundwandlänge von maximal 0,35% im Nicht-Tidegebiet und 1,2% im Tidegebiet. Im Nicht-Tidegebiet wirkt sich der Meeresspiegelanstieg positiv auf die Einwirkung, d.h. das Biegemoment, aus, so dass eine etwaige Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite kompensiert wird mit einer Abnahme des Biegemoments von bis zu -1,5% (Abbildung 54).

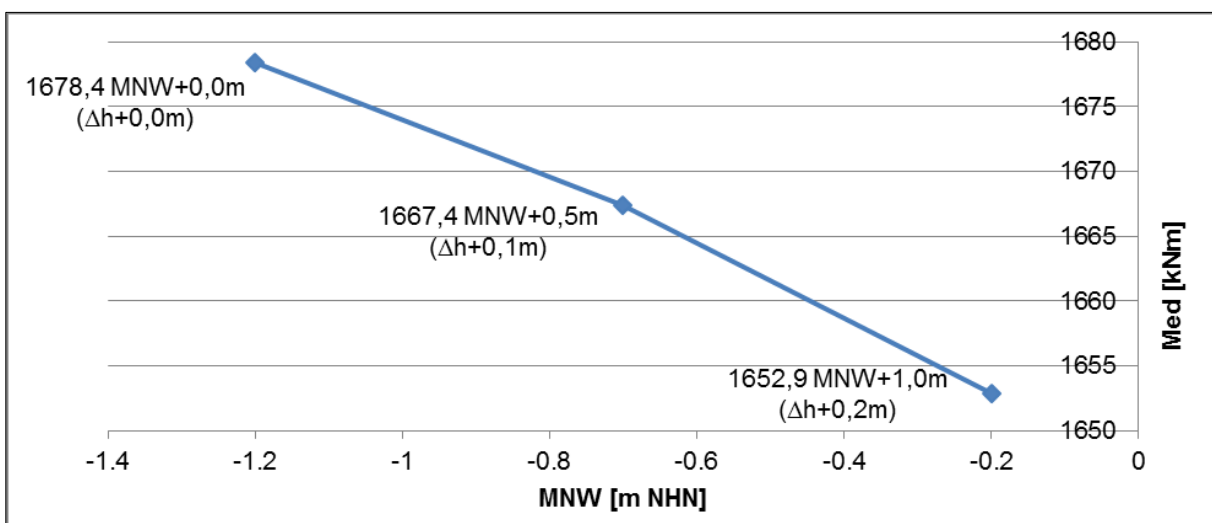


Abbildung 54: Änderung der Einwirkung, d.h. des Biegemoments M_{ed} , für eine kombinierte Spundwand unter Annahme eines infolge des Klimawandels zunehmenden Meeresspiegels von 0,5 m bzw. 1,0 m und einer Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite von bis zu +0,2 m für ein Nicht-Tidegebiet.

Im Tidegebiet kann der Meeresspiegelanstieg die Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite nicht kompensieren, wenn gleichzeitig der Tidenhub und der landseitig anzusetzende Grundwasserstand zunehmen (Abbildung 55), so dass es in dem aufgezeigten Beispiel zu einer Zunahme des Biegemoments von bis zu +8,0% kommt. Die Größenordnung der Zunahme der Einwirkung im Tidegebiet kann die Wahl eines Profils mit größerem Widerstandsmoment erfordern (Tabelle 23). Für weitere Standsicherheitsnachweise, wie den Nachweis gegen Knicken oder die vertikale Tragfähigkeit, zeigt sich sowohl im Nicht-Tidegebiet als auch im Tidegebiet kein signifikanter Einfluss im Rahmen der dargestellten Sensitivitätsuntersuchung.

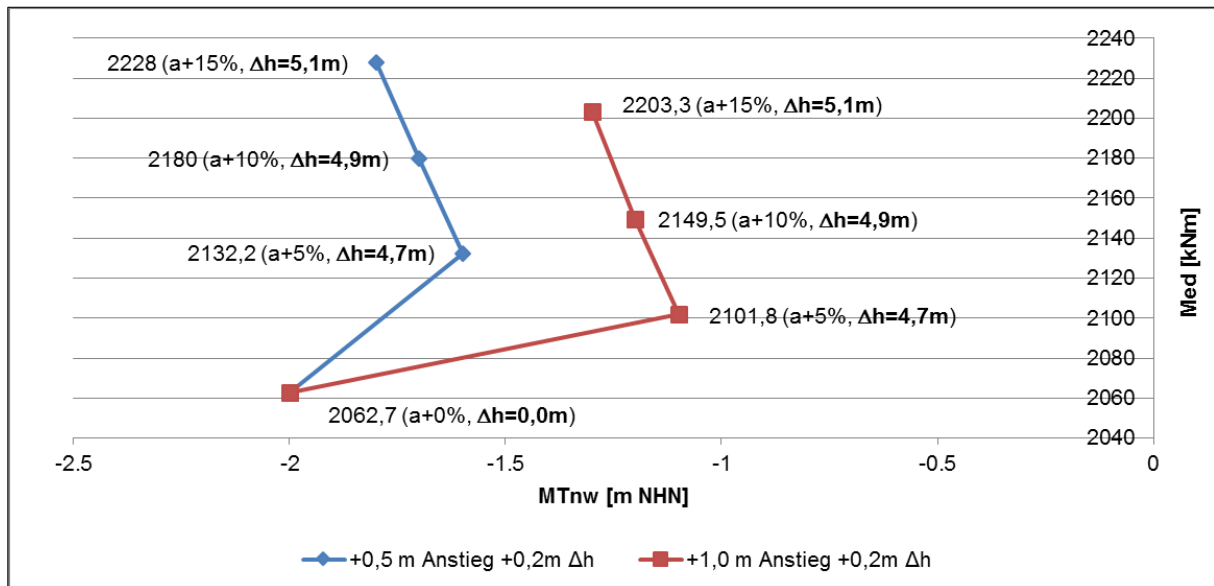


Abbildung 55: Änderung der Einwirkung, d.h. des Biegemoments M_{ed} , für eine kombinierte Spundwand unter Annahme eines infolge des Klimawandels zunehmenden Meeresspiegels von 0,5 m bzw. 1,0 m und einer Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite von $\Delta h +0,2$ m sowie $a + 5\%$ bis $+15\%$ für ein Tidegebiet.

Tabelle 23: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Tidegebiet und die Änderung des erforderlichen Widerstandsmoments W_{erf} bei sich im Rahmen des Klimawandels ändernden Bemessungsparametern.

W_{erf} Ausgangssituation=6391,5 cm³		
Δh	MSA = +0,5 m	MSA = +1,0 m
$a = +5\%$, 0,3m+0,2m	$W_{erf}=6606,8$ cm ³	$W_{erf}=6512,6$ cm ³
$a = +10\%$, 0,3m+0,2m	$W_{erf}=6754,9$ cm ³	$W_{erf}=6660,4$ cm ³
$a = +15\%$, 0,3m+0,2m	$W_{erf}=6903,7$ cm ³	$W_{erf}=6827,1$ cm ³

Der Anstieg des Meeresspiegels und die Zunahme des resultierenden Wasserdrucks in Richtung der Wasserseite im Tidegebiet haben eine Zunahme der optimalen Ankerlänge von bis zu +5,5% bzw. der erforderlichen Ankerkraft von bis zu 11,7% zur Folge (Tabelle 24). Damit kann der Nachweis der Tiefen Gleitfuge bei großem Auslastungsgrad ggf. nicht mehr erfüllt werden.

Aus derzeitiger Sicht scheint eine Zunahme des Tidehubs von 10% und mehr infolge eines Meeresspiegelanstiegs in den deutschen Nordseehäfen jedoch nicht sehr wahrscheinlich. Allerdings sind Aussagen bzgl. der Änderung der Tidedynamik aufgrund komplexer zugrunde liegender Wirkmechanismen mit Unsicherheiten belegt (siehe Kapitel 4.3.5).

Tabelle 24: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für das Tidegebiet und die Änderung der optimalen Ankerlänge bzw. Ankerkraft bei sich im Rahmen des Klimawandels ändernden Bemessungsparametern.

Ausgangssituation: Optimale Ankerlänge: 26,7 m Ankerkraft: 844,5 kN/m				
	MSA = +0,5 m		MSA = +1,0 m	
Δh	Optimale Ankerlänge [m]	Ankerkraft [kN/m]	Optimale Ankerlänge [m]	Ankerkraft [kN/m]
a = +5%, 0,3m+0,2m	27,4	892,6	27,5	902,8
a = +10%, 0,3m+0,2m	27,6	911,0	27,8	922,1
a = +15%, 0,3m+0,2m	27,8	929,6	28,1	942,9

4.4.3 Lufttemperatur

4.4.3.1 Bedeutung der Lufttemperaturzunahme

Der Anstieg der Lufttemperatur bzw. die Zunahme von heißen Tagen (siehe Tabelle 20) wirkt sich auf die Gesundheit und das Wohlbefinden von Menschen aus, mit dem Risiko der Überhitzung und von Kreislaufproblemen. Zudem kommt es an Bauwerken zu einer Materialausdehnung und folglich zu einer Längenausdehnung von Bauteilen oder Gleisen. Außerdem ändern sich Materialparameter wie Elastizität und Festigkeit, welches sich letztlich auf die Materialermüdung auswirken kann. Entstehende Wärme von elektronischen Anlagen und Bremsvorgängen kann schlechter abgeführt werden, so dass hier ebenfalls eine Überhitzung droht. Zudem können giftige Stoffe, beispielsweise Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) aus Kunststoffen, vermehrt freigesetzt werden. (Siefer et al. 2018)

Vermeint hohe Temperaturen können das Maß, in dem Arbeiten im Freien ausgeführt werden können, verringern. Gleichzeitig kann sich eine Abnahme von Tagen mit Frost oder Eis positiv auf die Anzahl der Tage, an denen Arbeiten im Freien ausgeführt werden können, auswirken. Arbeitsschutzmaßnahmen für Tage mit besonders hohen Temperaturen sind in den Sommermonaten vorrausschauend einzuplanen.

Im Nationalen Anhang des Eurocode 1 'Einwirkungen auf Tragwerke' Teil 5 'Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen' wird eine maximale Außenlufttemperatur von +37°C genannt (DIN EN 1991-1-5/NA). Es ist zu diskutieren, ob dieser Wert zukünftig Bestand hat. Die Materialeigenschaften von Straßenbaubitumen weisen eine Temperaturabhängigkeit auf (siehe FGSV (2013)), so dass bei hohen Temperaturen Verformungen auftreten können. Hohe Temperaturen können bei langen Stahlbauteilen, wie Gleisen oder Brücken aus Stahl, zu maßgebenden Längenausdehnungen führen.

4.4.3.2 Terminalbeläge

Die Beläge der Terminalflächen zählen zu der Hafensuprastruktur und liegen somit häufig in der Verantwortung der Terminalbetreiber. Wie im Straßenbau werden Asphalt, Beton und Pflasterungen zur Befestigung der Terminalflächen eingesetzt. Die Materialien weisen verschiedene Vor- und Nachteile auf. Asphalt wird häufig eingesetzt, da es schnell und einfach zu erstellen ist. Es weist allerdings den Nachteil auf, dass sich in stark belasteten Bereichen schnell Spurrillen bzw. Verformungen bilden können und Asphalt eine reduzierte Leistungsfähigkeit bei hohen Temperaturen hat. Beton hingegen ist beständig gegenüber Verformungen und hohen Temperaturen, hat jedoch unter anderem den Nachteil, dass höhere Baukosten und eine längere Bauzeit erforderlich sind und dass die Dehnungsfugen gewartet werden müssen. Pflaster ist ebenfalls beständig gegenüber hohen Temperaturen und hat gegenüber Beton den Vorteil, dass beschädigte Stellen durch Austausch einzelner Steine repariert werden können. Nachteilig bei diesem Belag sind jedoch ebenfalls die höheren Baukosten und die längere Bauzeit. Zudem ist eine regelmäßige Inspektion erforderlich. Diese und weitere Informationen zu Terminalbelägen finden sich im PIANC-Bericht Nr. 165 (PIANC 2015).

Die in Deutschland verwendeten Richtlinien zur Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO, FGSV 2012), d.h. von öffentlichen Straßen, sowie zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten (RDO Asphalt 09, FGSV 2009) bzw. Betondeckschichten (RDO Beton 09, FGSV 2010) können sinngemäß

für andere Verkehrsflächen angewendet werden. Die anzusetzenden Flächenlasten hängen von der Art des Umschlags ab, z.B. Auto-, Container- oder Schwerlastumschlag, und es können große Flächenlasten auftreten. Spezielle Empfehlungen für anzusetzende Flächenlasten, die über die für Verkehrsflächen anzusetzenden Lasten hinausgehen, finden sich ebenfalls im PIANC-Bericht Nr. 165.

Zukünftig ist mit einem Anstieg der Häufigkeit von heißen Tagen zu rechnen (siehe Tabelle 20). Vor allem Asphaltbauweisen sind durch die zunehmende thermische Belastung gefährdet. Allerdings kommen Wellner et al. (2017) im Rahmen einer Studie für unterschiedliche Belastungsklassen (entsprechend Bk100, Bk1,8/ 3,2 und Bk0,3 nach RStO 2012), Bauweisen (ATS auf FSS und ATS auf HGT auf FSS), Klimaszenarien (B1, A1B, A2) sowie Regionen in Deutschland, für die Region Flensburg, d.h. den norddeutschen Raum, zu dem Schluss, dass innerhalb dieses Jahrhunderts keine Anpassungsmaßnahmen erforderlich sind.

Grundsätzlich mögliche Anpassungsmaßnahmen stellen eine Erhöhung des Reflexionsvermögens der Asphaltdeckschicht durch die Verwendung hellerer Gesteine dar oder eine Optimierung der Zusammensetzung des Asphalts zur Erhöhung des Verformungswiderstands dar (Wellner et al. (2017), Norpoth et al. (2020)). In Wellner et al. sind zudem Hinweise zur Anpassung der RDO Asphalt an steigende thermische Anforderungen an Asphaltbelägen enthalten. Für Betonbeläge sehen Wellner et al. keinen Anpassungsbedarf.

Die Abnahme der Frosttage (siehe Tabelle 20) kann sich durch eine Abnahme der mittleren jährlichen Frosteindringtiefe zukünftig positiv auf die erforderliche Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus auswirken. Für entsprechende Empfehlungen sind allerdings detaillierte Informationen wie die Wiederholraten der Frosteindringung und die Zeiträume zwischen Kälteperioden erforderlich. Derzeit können daher keine diesbezüglichen Empfehlungen ausgesprochen werden. (Wellner et al. 2017)

4.4.3.3 Gleisanlagen und Brücken

Stahlbauteile können sich bei langanhaltender Hitze sehr stark erwärmen. Insbesondere bei Brücken aus Stahl und Gleisanlagen kann es zu maßgebenden Längenausdehnungen infolge der Materialerwärmung kommen. Bei beweglichen Stahlbrücken kann die Längenausdehnung dazu führen, dass die Brücke nicht mehr gängig ist. Bei langen Gleisstrecken kann es zu Verwerfungen kommen. Aber auch bei Weichen kann es aufgrund von Materialverformungen

bei hohen Temperaturen zu Ausfällen kommen. Schalthäuser sollten ausreichend isoliert sein, um enthaltene Elektronik vor Überhitzung zu schützen. Werden die Stahlbauteile beispielweise mit Wasser gekühlt, können die Verformungen vermindert werden und die Anlagen können wieder nutzbar gemacht werden. Zukünftig kann es zur Verhinderung von Gleisverwerfungen bei Hitzeeinwirkung gegebenenfalls sinnvoll sein, die Schienen bei höheren Temperaturen bzw. höheren Neutralisierungstemperaturen zu verschweißen.

4.4.4 Windeinwirkungen

4.4.4.1 Bedeutung von Windeinwirkungen in Seehäfen

Einwirkungen aus Wind spielen in Häfen bei vielerlei Anlagen und hafenenbezogenen Tätigkeiten eine Rolle. Einwirkungen aus Windlasten auf Gebäude und ingenieurtechnische Bauwerke regelt die DIN EN 1991-1-4 (Eurocode 1-4). Die Nutzung des Vorläufers, die DIN 1055-4, wurde mit verbindlicher Einführung der Eurocodes am 01.07.2012 hinfällig⁷⁸. Damit stellt der Teil 4 des Eurocodes 1 das maßgebende Bemessungsregelwerk dar, wenn es um die Einwirkungen aus Wind geht. Darüber hinaus sind Windeinwirkungen ebenfalls bei der Navigation und Vertäuung von Schiffen von Bedeutung. Zudem existieren operative Schwellenwerte, bei denen die hafenenbezogenen Tätigkeiten eingeschränkt sind oder eingestellt werden müssen (Tabelle 31). Im Fall von Sturmereignissen sind zudem Sicherungsmaßnahmen von Bedeutung, um allgemein Schäden oder Verletzungen infolge von herumfliegenden Teilen oder abstürzenden Leercontainern zu verhindern.

4.4.4.2 Windlasten auf Gebäude und ingenieurtechnische Bauwerke

Einwirkungen aus Windlasten auf Gebäude und ingenieurtechnische Bauwerke regelt die DIN EN 1991-1-4 (Eurocode 1-4). Ausgangspunkt der Windeinwirkungen nach Eurocode 1 ist der 'Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit' ($v_{b,o}$) - das 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit, welches unabhängig von der Windrichtung statistisch gesehen 1-mal in 50 Jahren auftritt. Aus dem Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit wird die Basiswindgeschwindigkeit (v_b) abgeleitet, diese berücksichtigt die tatsächlich anzusetzende Geländekategorie sowie einen Erhöhungsfaktor für hohe Lagen über Meereshöhe, wobei letzterer Faktor bei Seehäfen nicht anzusetzen ist. Der Geschwindigkeitsdruck, d.h. der infolge des Windes wirkende Staudruck, enthält neben dem konstanten Anteil einen veränderlichen

⁷⁸ <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/beuth-verlag-gmbh/Bauaufsichtliche-Einfuehrung-der-Eurocodes-zum-1-Juli-2012-Beuth-Verlag-bietet-Fachliteratur-und-Online-Dienst-an/boxid/518709>

Anteil (Turbulenz). Anhand der Basiswindgeschwindigkeit kann die Turbulenzintensität, d. h. der veränderliche Anteil des Geschwindigkeitsdrucks infolge der Windeinwirkung, abgeschätzt werden. Der Basisgeschwindigkeitsdruck fließt ebenfalls in die Bestimmung von mittleren und kurzzeitigen Geschwindigkeitsänderungen - dem Böengeschwindigkeitsdruck, welcher letztlich bei der Bemessung von Tragwerken zu berücksichtigen ist - ein.

Basisgeschwindigkeitsdruck (Gl. 4-17) sowie Böengeschwindigkeitsdruck für die Geländekategorie I (z.B. Küstennähe) (Gl. 4-18) bzw. Geländekategorie III (z.B. Gewerbegebiete) (Gl. 4-19 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) berechnen sich nach dem nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-4 wie folgt:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad \text{Gl. 4-17}$$

$$q_p = 2,6 \cdot q_b \left(\frac{z}{10} \right)^{0,19} \quad \text{für } z > 2 \text{ m} \quad \text{Gl. 4-18}$$

$$q_p = 1,6 \cdot q_b \left(\frac{z}{10} \right)^{0,31} \quad \text{für } z > 2 \text{ m} \quad \text{Gl. 4-19}$$

q_b	Basisgeschwindigkeitsdruck [kN/m ²]
q_p	Böengeschwindigkeitsdruck [kN/m ²]
ρ	Dichte der Luft [kg/m ³], empfohlen: 1,25 kg/m ³
v_b	Basiswindgeschwindigkeit je nach Windzone [m/s]
z	Höhe über Gelände [m]



Abbildung 56: Windzonenkarte für Deutschland (Störfix 2005)

Die Gl. 4-18 und Gl. 4-19 des nationalen Anhangs weichen von den allgemeinen Empfehlungen der DIN EN 1991-1-4 ab. Die Böengeschwindigkeit wird in Deutschland in Abhängigkeit der Geländekategorie (I-IV) berechnet. Die Bereiche in Küstennähe können aufgrund ihrer flachen Topographie auf der sicheren Seite liegend in die höchste Geländekategorie (I) eingeordnet werden. Da der Zusammenhang zwischen Basisgeschwindigkeitsdruck und Windgeschwindigkeit quadratisch ist, hat eine Zunahme der Windgeschwindigkeit eine überproportionale Zunahme des Geschwindigkeitsdrucks zur Folge. Im Nationalen Anhang des Eurocodes 1 ist eine Windzonenkarte (Abbildung 56)

enthalten, welche die aktuell gültigen Basiswindgeschwindigkeiten für Deutschland enthält.

Die in der Windzonenkarte angegebenen Werte sind unabhängig von der Windrichtung und gelten für die Geländekategorie II. Wenn entsprechende, statistisch belastbare Informationen vorliegen, darf der Einfluss der Windrichtung berücksichtigt werden. Lasten können allerdings auch aus Originalmessungen bestimmt werden. Für Zunahmen der Windgeschwindigkeit, wie sie im Rahmen des Klimawandels zu erwarten sind, führt eine Zunahme der Windgeschwindigkeit aufgrund des quadratischen Zusammenhangs zu einer etwa doppelt so großen Zunahme des Geschwindigkeitsdrucks. Für Gebäudehöhen bis zu 25 m kann nach Eurocode ein vereinfachter Ansatz basierend auf Tabellenwerten für den Böengeschwindigkeitsdruck als konstant über die gesamte Gebäudehöhe angesetzt werden. Wird dieser Ansatz gewählt, zeigen sich je nach Geländekategorie erhebliche Unterschiede zu dem Berechnungsansatz nach Gl. 4-18 bzw. Gl. 4-19 für den Böengeschwindigkeitsdruck. Die Ergebnisse der Sensitivitätsuntersuchung für den Einfluss der Windgeschwindigkeit und die Wahl des Berechnungsansatzes nach Eurocode sind in Tabelle 25 bzw. Tabelle 26 dargestellt.

Die Windzonenkarte wurde erst im Zusammenhang mit der Überarbeitung der DIN 1055-4 im Jahr 2005 eingeführt. Davor galten in Abhängigkeit der Höhe über Gelände einheitliche Böengeschwindigkeitsdrücke (in der Norm noch als Staudruck bezeichnet) für ganz Deutschland, wobei für besonders exponierte Gebäude ein Staudruck von mindestens $1,1 \text{ kN/m}^2$ anzusetzen war (DIN 1055-4:1986). Durch die Änderung der Bemessungsvorschrift hat sich vor allem in der Windzone 4 eine deutliche Erhöhung des anzusetzenden Böengeschwindigkeitsdrucks ergeben (Tabelle 26). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei Gebäuden und ingenieurtechnischen Bauwerken im Küstenbereich, die noch nach der DIN 1055-4:1986 bemessen wurden, geringere Einwirkungen aus Wind berücksichtigt wurden, als sie nach der derzeit gültigen Norm anzusetzen sind. Es bedeutet ebenfalls, dass es bereits in der Vergangenheit deutliche Zuschläge bei den Einwirkungen auf Tragwerken, wie sie auch aufgrund der Folgen des Klimawandels auftreten können, gegeben hat.

Tabelle 25: Einfluss der Zunahme der Basiswindgeschwindigkeit um +5% bzw. +10% auf den Böengeschwindigkeitsdruck nach DIN EN 1991. Dargestellt sind die Ergebnisse für zwei verschiedene Windzonen und Geländekategorien.

	WZ IV GK I	WZ III GK III	WZ IV GK I	WZ III GK III	WZ IV GK I	WZ III GK III
	Eurocode nat. Anhang		+5%		+10%	
Basiswindgeschwindigkeit* v_b [m/s]	30,00	27,50	31,50	28,88	33,00	30,25
Basisgeschwindigkeitsdruck q_b [kN/m ²]	0,56	0,47	0,57	0,48	0,68	0,57
Böengeschwindigkeitsdruck q_p in 10 m Höhe [kN/m ²]	1,46	0,76	1,61	0,83	1,77	0,92
Änderung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p [%]	-	-	10,30	10,30	21,00	21,00

WZ: Windzone, GK: Geländekategorie, I: offene See, III: Gewerbegebiet; Übergangsbereiche zwischen den Geländekategorien (Mischprofile der Geländekategorien) wurden in der Betrachtung vernachlässigt.
 * Richtungsfaktor und Jahreszeitenbeiwert = 1, so dass der Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit der Basiswindgeschwindigkeit entspricht

Tabelle 26: Vergleich unterschiedlicher Bemessungsansätze nach DIN EN 1991-1-4 und DIN 1055-4:1986-08 für den Böengeschwindigkeitsdruck

	WZ IV GK I	WZ III GK III	WZ IV GK III	WZ III GK I
Basiswindgeschwindigkeit* v_b [m/s]	30,0	27,5	30,0	27,5
Basisgeschwindigkeitsdruck q_b [kN/m ²]	0,56	0,47	0,56	0,47
Böengeschwindigkeitsdruck q_p in 10 m Höhe ($q_p = f(z)$) nach DIN EN 1991 [kN/m ²]	1,46	0,76	0,90	1,23
Konstanter Böengeschwindigkeitsdruck** $q_{p,k}$ für eine Gebäudehöhe ≤ 10 m nach DIN EN 1991 [kN/m ²]	1,25	1,05	1,25	1,05
Abweichung ($q_{p,k} - q_p = f(z)$) [%]	-14,5	+38,8	+38,9	-14,6
Böengeschwindigkeitsdruck q_p [kN/m ²] nach DIN 1055 für $8 < z < 20$ m	1,1	0,80	0,80	1,1
Abweichung (DIN EN 1991 - DIN 1055) [%]	+33,0	-5,5	+12,5	+11,7

WZ: Windzone, GK: Geländekategorie, I: offene See, III: Gewerbegebiet. Übergangsbereiche zwischen den Geländekategorien (Mischprofile der Geländekategorien) wurden in der Betrachtung vernachlässigt.
 * Richtungsfaktor und Jahreszeitenbeiwert = 1, so dass der Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit der Basiswindgeschwindigkeit entspricht
 ** Tabelle NA.B.3 – Vereinfachte Geschwindigkeitsdrücke für Bauwerke bis 25 m Höhe - q_p ist als konstant über Bauwerkshöhe anzusetzen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass neben der Wahl des Bemessungsansatzes auch geringe Änderungen der Windgeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Bemessung von Tragwerken haben können. Gleichzeitig sind die nach Eurocode ermittelten Einwirkungen charakteristische Werte (DIN EN 1991-1-4), die noch mit Teilsicherheitsbeiwerten zu multiplizieren sind. Bei veränderlichen ungünstigen Einwirkungen kann für Tragwerke ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 angenommen werden (DIN EN 1990/NA/A1).

Im Fall von Gebäuden besteht darüber hinaus die Möglichkeit, bauliche Änderungen vorzunehmen, um beispielsweise die Resilienz besonders gefährdeter Gebäudeteile wie Dachvorstände zu erhöhen (siehe Stock (2015), Weller et al. (2016)).

4.4.4.3 Windlasten auf Schiffe

Windlasten auf Schiffe, welche Beispielsweise für die Navigation und die Vertäuung von Schiffen von Interesse sind, können nach EAU (2020) anhand Gl. 4-20 bzw. Gl. 4-21 berechnet werden:

$$W_t = (1 + 3,1 \sin \alpha) \cdot k_t \cdot A_W \cdot v^2 \cdot \varphi \quad \text{Gl. 4-20}$$

$$W_l = (1 + 3,1 \sin \alpha) \cdot k_l \cdot A_W \cdot v^2 \cdot \varphi \quad \text{Gl. 4-21}$$

A_W	Windangriffsfläche [m ²]
v	Maßgebende Windgeschwindigkeit [m/s]
W_t, W_l	Windlastkomponenten [kN], t: tangential, l: longitudinal
k_t, k_l	Windlastkoeffizienten [kN s ² /m ⁴], t: tangential, l: longitudinal
α	Winkel zwischen Windrichtung und Längsachse des Schiffes
φ	Faktor für dynamische und andere, nicht erfassbare Einflüsse [-], im Allgemeinen: $\varphi = 1,25$

Eine maßgebende Eingangsgröße ist neben der Windgeschwindigkeit die Richtung des Windes. Der quadratische Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsdruck ist ebenfalls bei der Berechnung der Windlast auf Schiffe enthalten, d.h. eine Änderung der Windgeschwindigkeit von bis zu 10% hat eine etwa doppelt so große Änderung der Windlast zur Folge. Aufgrund der Trägheit des Schiffes wird nach EAU (2020) das 10-Minuten Mittel der Windgeschwindigkeit angesetzt. Für die maßgebende Windgeschwindigkeit können die Werte nach Eurocode 1-4 verwendet werden, falls keine örtlichen Messwerte vorliegen (EAU 2020).

In Tabelle 27 ist das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse dargestellt, in deren Rahmen Windlasten für eine Änderung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtungen berechnet wurden. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass bei Winkeln α mit einer Windrichtung mehr oder weniger rechtwinklig zur Längsachse des Schiffes die Änderung der Windgeschwindigkeit den größeren Einfluss hat. Bei maßgeblichen Windrichtungen, welche mehr in Richtung der Längsachse wirken, spielt eine Änderung der vorhandenen Windrichtung eine größere Rolle. Je nach Ausrichtung der Kaianlage und maßgeblicher Windrichtung spielt also nicht nur die Zunahme der Windgeschwindigkeit, sondern gegebenenfalls auch die Änderung der Windrichtung eine maßgebende Rolle bei der Ermittlung der auf das Schiff

wirkenden Windlast. Eine solche Betrachtung ist allerdings nur zielführend, wenn die Untersuchung der Windlastkomponenten differenziert nach Windrichtungen erfolgt. Andernfalls wird die größte Windlast immer durch Winde quer zur Längsachse des Schiffes generiert.

Tabelle 27: Windlastkomponenten W (t: tangential, l: longitudinal) pro m^2 auf ein vertäutes Schiff in Abhängigkeit der Windrichtung ($\alpha = 90^\circ, 80^\circ, 30^\circ, 0^\circ$) sowie bei einer Änderung der maßgebenden Windgeschwindigkeit (v_b) nach Eurocode von +5% und +10%. Windlastkoeffizienten nach Arbeitsausschuss Ufererfassungen (2020) für ein Schiff über 50.000 dwt. Der Einfluss des vertikalen Geschwindigkeitsprofils wurde vernachlässigt.

	Eurocode (EC) WZ IV	EC WZ IV +5%	EC WZ IV +10%
v_b (z = 10 m) [m/s]	30,00	31,50	33,00
$\alpha = 90^\circ$			
W_t [N/m ²]	742,61	818,73	898,56
Änderung [%]-	-	+10	+21
W_l [N/m ²]	0	0	0
Änderung [%]-	-	-	-
$\alpha = 80^\circ$			
W_t [N/m ²]	703,69	775,81	851,46
Änderung [%]	-	+10	+21
W_l [N/m ²]	0,03	0,03	0,04
Änderung [%]	-	+10	+21
$\alpha = 30^\circ$			
W_t [N/m ²]	318,43	351,07	385,30
Änderung [%]	-	+10	+21
W_l [N/m ²]	86,06	94,88	104,14
Änderung [%]	-	+10	+21
$\alpha = 0^\circ$			
W_t [N/m ²]	0	0	0
Änderung [%]-	-	-	-
W_l [N/m ²]	102,38	112,87	123,87
Änderung [%]	-	+10	+21

Eine weitere maßgebliche Rolle bei der Bestimmung der auftretenden Windlasten spielt die Windangriffsfläche eines Schiffes. In der Vergangenheit hat für alle Schiffstypen ein deutliches Größenwachstum stattgefunden (vgl. EAU 2020). Bei einem Winkel $\alpha = 90^\circ$ ergibt sich für ein Ultra Large Container Ship (ULCS) der neuesten Generation bei einer maßgebenden Windgeschwindigkeit von 30 m/s und einer geschätzten Windangriffsfläche $A_w = 20.000 m^2$ eine jeweils an Bug und Heck von dem Vertäuungssystem aufzunehmende Windlast von etwa 7.500 kN, welche infolge der Zunahme der Windgeschwindigkeit von 10% auf etwa 9.000 kN ansteigen würde. Bei einer maximalen Arbeitslast von rund 1.000 kN pro Leine bzw. Bremshaltekraft der Winde von rund 1.500 kN wären, bei zuvor voller Auslastung des

Vertäusystems und einer vertikalen Neigung der Leinen von 25° sowie einer mittleren horizontalen Neigung von 35°, etwa zwei weitere Leinen am Bug bzw. Heck notwendig (Tabelle 28).

Tabelle 28: Tangentiale Windlastkomponenten W_t für Bug (W_{tb}) bzw. Heck (W_{th}) für die Windrichtung $\alpha = 90^\circ$ und eine Windangriffsfläche von $A = 20.000 \text{ m}^2$ bei einer Änderung der maßgebenden Windgeschwindigkeit nach Eurocode von +5% und +10%. Windlastkoeffizienten nach Arbeitsausschuss Ufereinfassungen (2020) für ein Schiff über 50.000 dwt. Der Einfluss des vertikalen Geschwindigkeitsprofils wurde vernachlässigt.

	Eurocode (EC) WZ IV	EC WZ IV +5%	EC WZ IV +10%
$v_b (z = 10 \text{ m}) [\text{m/s}]$	30,00	31,50	33,00
$W_t [\text{kN}]$	14.852,3	16.374,6	17.971,2
$W_{tb}, W_{th} [\text{kN}]$	7.426,1	8.187,3	8.985,6
$W_{tb}^*, W_{th}^* [\text{kN}]$	8.193,8	9.033,7	9.914,5
$W_{tb}^{**}, W_{th}^{**} [\text{kN}]$	10.002,8	11.028,1	12.103,4

* Unter Berücksichtigung eines vertikalen Winkels der Leine von 25°

** Unter Berücksichtigung eines mittleren horizontalen Winkels der Leinen von 35°

Vor der Überarbeitung der Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU) im Jahr 2020 wurde in der EAU empfohlen für Schiffe bis 50.000 dwt das Mittel der Windgeschwindigkeit aus 30 Sekunden und für Schiffe größer 50.000 dwt das Mittel aus einer Minute anzusetzen (EAU 2004; EAU 2012). Weitere für die Vertäuung von Schiffen relevante Richtlinien der OCIMF (2009) und der IACS (2020) nehmen ebenfalls das Mittel der Windgeschwindigkeiten aus 30 Sekunden an. Die OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) empfiehlt eine Windgeschwindigkeit von 60 kn (31 m/s) und die IACS (International Association of Classification Societies) berücksichtigt Windgeschwindigkeiten je nach Schiffstyp von bis zu 25 m/s - jeweils in der üblichen Höhe von 10 m. Eine Übersicht der Empfehlungen ist in Tabelle 29 dargestellt. Für die Umrechnung der Windgeschwindigkeiten in ein 10-Minuten Mittel kann ein Faktor von 1,21 (30-Sekunden) bzw. 1,15 (1 Minute) angesetzt werden (EAU 2020). D.h. infolge der aktuellen Überarbeitung der EAU wurden die in dem Berechnungsansatz verwendeten Bemessungswerte je nach Schiffsgröße um etwa 15% bis 20% verringert. Damit entspricht die heutige Empfehlung in der EAU jedoch wieder den Empfehlungen der EAU aus dem Jahr 2004, welche die DIN 1055-4: 1986, d.h. vor Einführung der Windzonenkarte und basierend auf dem Böenstaudruck, zugrunde gelegt hat. Die Empfehlung in der EAU 2020 entspricht damit in etwa der Windgeschwindigkeit wie sie von der IACS verwendet wird, aus deren Richtlinie sich für ein bestimmtes Schiff, in Abhängigkeit der Windangriffsfläche sowie der Ausrüstungsnummer (Equipment Number EN), die Anzahl und Art der zu verwendenden Leinen ergibt.

Tabelle 29: Gegenüberstellung von Windgeschwindigkeiten für unterschiedliche Zeitspannen, welche der Berechnung von Windlasten auf Schiffe nach EAU 2004, 2012 und 2020 zugrunde gelegt werden, falls keine örtlichen Messungen vorliegen sowie Windgeschwindigkeiten, welche von OCIMF und IACS für die Vertäuung von Schiffen zugrunde gelegt werden. Die fett gedruckten Werte, sind die Angaben, welche in der jeweiligen Richtlinie gemacht werden. Die für die Umrechnung zugrunde gelegte Umrechnungsfaktoren basieren auf Thoresen (2018).

Richtlinie		10-Min. Mittel [m/s]	30-Sek. Mittel [m/s]	3-Sek. Mittel [m/s]
EAU 2004	DIN 1055-4:1986, Höhe über Gelände 20-100 m (extrem exponiert)	31,1	37,6	42,0
	DIN 1055-4:1986, Höhe über Gelände 8-20 m	26,5	32,1	35,8
EAU 2012	DIN 1055-4:2005, Windzone 4	24,8	30	49,0
	DIN 1055-4:2005, Windzone 3	22,7	27,5	44,9
EAU 2020	DIN EN 1991-1-4, Windzone 4	30	36,3	40,5
	DIN EN 1991-1-4, Windzone 3	27,5	33,3	37,1
OCIMF 2009		25,6	31	50,6
IACS 2018		20,7	25	40,8

Die Pollerzuglasten werden nach EAU allerdings üblicherweise ohne Berücksichtigung der Windlasten dimensioniert. Neben den Pollern sind nämlich zwei weitere Stellschrauben im Vertäusystem vorhanden – die Winde an Bord des Schiffes sowie die Festmacherleine. Der Poller versagt im Optimalfall als letztes, nach der Bremse der Winde und der Festmacherleine (EAU 2020). Die Windlasten spiegeln sich in dem erforderlichen Vertäusystem wider, welches neben den technischen und materiellen Eigenschaften der Schiffsausrüstung von der Anzahl der zu vertäuenden Leinen abhängt. Die Verantwortung für das Vertäusystem liegt beim Kapitän des Schiffes (PIANC 1995) und ist daher sozusagen wasserseitig vorgegeben. Bis zur 11. Auflage der EAU wurde die Pollerzugkraft anhand von Tabellenwerten in Abhängigkeit der Schiffsgröße festgelegt (siehe Tabelle 30. Aufgrund geänderter Teilsicherheiten unterscheiden sich zudem charakteristische Werte und Bemessungswerte. Durch die Pollerzugkraft war somit die zulässige Trossenkraft bzw. die Anzahl der aufzulegenden Trossen festgelegt. Seit der 12. Auflage der EAU aus dem Jahr 2020 wird die Pollerzugkraft aus den maximal durch das Vertäusystem eingetragenen Kräften berechnet, d.h. durch die Bremshaltekraft der Winde und die Anzahl sowie der Bruch- bzw. Arbeitslast der verwendeten Leinen. Eine differenzierte Betrachtung der örtlich vorhandenen Windgeschwindigkeiten unterteilt nach Windrichtung ist i.d.R. nur dann sinnvoll, wenn sich dadurch bei einer Anpassung an vergrößerte Schiffsgrößen die Anforderungen an die Poller verringern lassen.

Tabelle 30: Entwicklung der nach EAU anzusetzenden charakteristischen Werte und der Bemessungswerte für die Pollerzuglast in Abhängigkeit der Wasserverdrängung eines Schiffs (Turban 2019)

Wasserverdrängung [t]	Pollerzuglast [kN] Charakteristischer Wert				Pollerzuglast [kN] Bemessungswert					
	EAU Auflage				EAU Auflage					
	1.	2.	5./ 9./ 10.	11.	1.	2.	5.	9.	10.	11.
2.000	100	100	100	-	100	100	100	130	143	-
10.000	300	300	300	300	300	300	300	390	429	429
20.000	600	600	600	600	600	600	600	780	858	858
50.000	800	800	800	800	800	800	800	1.040	1.144	1.144
100.000	-	1.000	1.000	1.000	-	1.000	1.000	1.300	1.430	1.430
200.000	-	-	1.500	2.000	-	-	1.500	1.950	2.145	2.860
250.000	-	-	2.000	2.500	-	-	2.000	2.600	2.860	3.575
>250.000	-	-	-	>2.500	-	-	-	-	-	>3.575

Das Vertäusystem ist von einer Vielzahl weiterer Einflüsse geprägt, zu denen neben den zuvor genannten, auch Seegang, die Vorbeifahrt eines Schiffes sowie gegebenenfalls die Strömung im Fließgewässer zählt. Es wird daher empfohlen, individuell zu prüfen, ob Vertäukonzepte gegebenenfalls durch eine Erhöhung der Anzahl der Leinen anzupassen sind und ob Anzahl und Pollerzugkraft vorhandener Poller ausreichen, um die benötigten Leinen entsprechend an Land zu vertäuen. Besonders relevant kann eine solche Untersuchung für Kaianlagen sein, bei denen Sturmereignisse ablandigen Wind an der Kaianlage zur Folge haben. Vertäusysteme an Kaianlagen mit eher auflandigen Sturmereignissen sind hingegen nicht negativ von einer potentiellen Zunahme der Windgeschwindigkeit betroffen. Bei auflandigem Wind sind allerdings die Lagerkräfte des Fendersystems infolge einer Zunahme der Windlast negativ betroffen. Zudem bleibt abzuwarten, wie sich das Schiffsgrößenwachstum und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Vertäuerung entwickeln.

Allerdings werden bezüglich der Möglichkeit, das Vertäusystem an zunehmende Windstärken anzupassen, praktische Herausforderungen gesehen, da das Vertäusystem wie bereits erwähnt unterschiedliche Stellschrauben - Poller, Winde, Festmacherleine - sowohl schiffs- als auch landseitig enthält, welche alle aufeinander abgestimmt sein müssen.

4.4.4.4 Windeinwirkungen und deren Bedeutung für hafenbezogene Tätigkeiten

Neben den technischen Anforderungen, welche sich aus den Einwirkungen aus Wind ergeben, ist das operative Geschehen in den Häfen durch Windeinwirkungen geprägt. Tabelle 31 zeigt operative Schwellenwerte im Zusammenhang mit Umschlags- und Anlegevorgängen, ab denen der Betrieb in Seehäfen beeinflusst wird. Grundsätzlich ist etwa ab Windstärke 6 mit Einschränkungen im Hafenbetrieb zu rechnen. Dabei müssen nicht alle Anlagen gleich stark betroffen sein. Zum Beispiel weisen unterschiedliche Containerumschlagsgeräte bis zu einem

gewissen Grad verschiedene Empfindlichkeiten gegenüber hohen Windgeschwindigkeiten auf, bei der auch die Richtung des Windes eine Rolle spielen kann (van den Bos 2005). Letztlich müssten für eine gesteigerte Anpassung daher sowohl das Vertäusystems als auch die Möglichkeiten der Umschlagstätigkeit angepasst werden. Davon abgesehen ist aus Gründen der Sicherheit angeraten, Aufenthalt und Tätigkeiten im Hafen ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit einzustellen. Es ist somit anzunehmen, dass operative Schwellenwerte für Windgeschwindigkeiten aufgrund technischer Maßnahmen nicht wesentlich erhöht werden, sondern Tätigkeiten, wie bisher auch, bei bestimmten Windgeschwindigkeiten eingestellt werden müssen. Somit beschränken sich die Anpassungsmaßnahmen darauf, das Ausmaß von sturmbedingten Schäden bzw. Risiken für Unfälle zu minimieren.

Tabelle 31: Kritische Schwellenwerte der Windgeschwindigkeit für den Betrieb von Seehäfen (Gaythwaite 2004, verändert, eigene Übersetzung)

Beaufort Skala/ Bezeichnung der Windstärke	Windgeschwindigkeit [m/s]*	Effekt auf Betrieb**	
		Schiffe	Anlagen
6 Starker Wind	11,5 – 14,0	Anlegemanöver einstellen	Kranbetrieb einstellen
7 Steifer Wind	14,5 – 17,0	Schlepperdienst einstellen	
8 Stürmischer Wind	17,5 – 20,5	Fährtätigkeit einstellen	Verladearme abkoppeln
9 Sturm	21,0 – 24,0	Sturmleinen festmachen	
10 Schwerer Sturm	24,5 – 28,5	Große Schiffe verlassen den Hafen	Anlagen sichern, Krane laschen etc.
11 Orkanartiger Sturm	29,0 – 32,5		
12 Orkan	≥ 33,0		
* Auf 0,5 m/s gerundet			
** Infolge Wind, in exponierten Lagen kann Seegang zu größeren Einschränkungen führen			

Im Norddeutschen Klimamonitor (Helmholtz-Zentrum Hereon 2021b) werden für die Norddeutsche Küste im Zeitraum 1961-1990 im Schnitt etwa 40 Sturmtage pro Jahr angegeben, d.h. 40 Tage an denen die maximale Windgeschwindigkeit mindestens Windstärke 8 erreicht. An solch einem Sturmtag ist mit Verzögerungen bis hin zur Unterbrechung der Umschlagstätigkeiten zu rechnen. Klimaprojektionen zeigen je nach Modelllauf für das 21. Jahrhundert sowohl eine mögliche Zu- als auch Abnahme der Anzahl der Sturmtage von +14 bis -8 im Vergleich zu 1961-1990 (Helmholtz-Zentrum Hereon 2021a). Demnach ist eine Zunahme der Häufigkeit von windbedingten operativen Einschränkungen in Seehäfen in Deutschland zukünftig nicht zwingend zu erwarten.

In Häfen sollten Sicherungsmaßnahmen gegen windbedingte Projekttilbildung, d.h. umherfliegende Gegenstände, besonders beachtet werden. Die Technischen Regeln für Anlagensicherheit (TRAS) 320 enthalten die folgenden Hinweise und Empfehlungen im Umgang mit der Gefahrenquelle Wind (Krätzig et al. 2016). Potenzielle Gefahrenquellen sind (1) nicht sicher befestigte Anlagenteile wie Blechverkleidungen, (2) nicht bauliche Anlagen, die umstürzen können und (3) Lagerflächen im Freien mit z.B. Container oder Ersatzteilen. Mitarbeitende sollten regelmäßig für Gefahrenquellen sensibilisiert und das Gelände sollte regelmäßig sowie im Fall von Sturmwarnungen begutachtet werden. Bei vorgefundenen Mängeln sollten diese mit wirksamen Maßnahmen wie beispielsweise einer Erneuerung der Befestigung oder Anbringen von stabilisierenden Strukturen beseitigt werden.

Insbesondere leere Container sollten, aufgrund ihres verhältnismäßig geringen Gewichts bei gleichzeitig relativ großer Windangriffsfläche, nicht zu hoch gestapelt werden. Außerdem ist es empfehlenswert, die Längsachse der Container quer zur Hauptwindrichtung auszurichten, um so wenig Windangriffsfläche wie möglich zu bieten. Lässt es sich nicht verhindern, dass Leercontainer in maximal zwei Lagen gestapelt werden, sollte die windabgewandte Seite des Containerstapels stufenförmig ausgebildet werden, da so die ungünstig wirkenden Kräfte auf die Container minimiert werden. Diese und weitere Hinweise zum Umgang mit starken Windereignissen auf Hafenterminals sind in den Empfehlungen des TT Club (2009) zu finden.

Bei Umschlag und Lagerung von Schüttgut kann sich Staub im Hafen entwickeln. Der Ausschuss für Hafenumschlaggeräte (AHU 1977) hat die folgenden Empfehlungen gegen Staubentwicklung bei Umschlag und Lagerung von Schüttgütern im Hafen veröffentlicht. Staubentwicklungen treten demnach häufig beim Einsatz von Greifern auf, pneumatische Anlagen entwickeln hingegen keinen Staub. Abdeckbleche oder geringe Fallhöhen können helfen, die Staubentwicklung beim Umschlag von Schüttgut zu minimieren. Offene Lagerplätze können mit Matten abgedeckt, die Oberfläche mit entsprechenden Sprühmitteln verfestigt oder die Feuchtigkeit des Lagergutes mit Regneranlagen erhöht werden, um so das Material gegen Wind zu sichern.

4.4.5 Starkniederschlag

4.4.5.1 Entwässerungssysteme von Terminals

Eine Entwässerung von Terminals ist erforderlich, um einen ungehinderten Umschlag zu gewährleisten und die Güter vor Nässe zu schützen. Ein steiles Gelände fördert die Entwässerung, behindert allerdings den Fahrzeugverkehr und die Lagerung von Gütern. Eine

typische Neigung ist 1%, wobei eine Neigung von 2% nicht überschritten werden sollte. Ein Gefälle <0,5% kann, nicht zuletzt infolge von Bautoleranzen, zu stehendem Wasser führen. Entwässerungssysteme werden in Punkt- und Linienentwässerung unterschieden. Zur Entwässerung der Fläche wird das Gelände in unterschiedliche Hoch- und Tiefpunkte geteilt. Bei Linienentwässerungen verlaufen die Hoch- und Tiefpunkte parallel, so dass das Niederschlagswasser linienförmig entlang des tiefsten Punktes in Kasten- oder Schlitzrinnen gesammelt wird. Die Rinnen sind in Seehäfen aufgrund der hohen Einwirkungen infolge des Umschlagbetriebs als Schwerlastrinnen auszuführen. Kastenrinnen haben eine größere Öffnungsweite und sind daher hydraulisch effizient und bei Bedarf einfach zugänglich. Schlitzrinnen sind aufgrund ihrer schmalen Öffnung hydraulisch weniger effizient, sind jedoch besser vor groben Schmutzstoffen geschützt. Wird ein Linienentwässerungssystem großzügig bemessen, bietet es Retentionsraum. Dieser fördert jedoch in Zeiten geringerer Niederschlagsmengen das Absetzen von Ablagerungen. Bei einer Punktentwässerung wird die Terminalfläche in quadratische Abschnitte unterteilt. Der tiefste Punkt liegt jeweils in der Mitte der Abschnitte, so dass das Niederschlagswasser der jeweiligen Fläche konzentriert an diesem Punkt gesammelt wird. Punktentwässerungen empfehlen sich bei höherem Gefälle, sind jedoch aufgrund der konzentrierten Niederschlagserfassung anfälliger gegenüber Verstopfung. (PIANC 2015)

4.4.5.2 Bemessungsansätze für Entwässerungssysteme

Für die Bemessung von Entwässerungssystemen wird häufig das Zeitbeiwertverfahren verwendet, in dem eine Bemessungsregenspende der Dauerstufe D und der Jährlichkeit n berücksichtigt wird (DWA-Arbeitsblatt 118). Früher wurde die Regenspende nach Reinhold angesetzt (Reinhold 1940); seit 1987 wird diese durch die koordinierten Starkniederschlags-Regionalisierungsauswertung (KOSTRA) des DWD ersetzt (Malitz 2005) die in den Jahren 1990, 2000 sowie 2010 aktualisiert wurde (Malitz und Ertel (2015)) und aktuell in der revidierten Version aus dem Jahr 2010 vorliegt (Junghänel et al. 2017). Je nach Geländeneigung, Befestigungsgrad und Überflutungsprüfung (Prüfung, ob das betroffene Grundstück eine Überflutung schadlos überstehen würde) des Systems kommen bei der Bemessung von Entwässerungssystemen Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit und Dauerstufe in Betracht. Ohne Überflutungsprüfung kann für Industriegebiete beispielsweise eine Jährlichkeit von 1 mal in 5 Jahren (DIN EN 752) und eine Dauerstufe von 10 Minuten (Befestigungsgrad >50%, mittlere Geländeneigung 1%) für die Bemessung von Entwässerungssystemen angesetzt werden (DWA-Arbeitsblatt 118). Der Ansatz nach DWA-

A118 ist laut DIN EN 1986-100 – Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – auch für Grundleitungen außerhalb von Gebäuden anzusetzen. Für Straßen, die mit Rohrleitungen entwässert werden, ist nach dem Teil Entwässerung der Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS-Ew) eine Jährlichkeit von einem Jahr anzusetzen.

Der Vergleich zweier KOSTRA Bezugszeiträume mit der Regenspende nach Reinhold für ausgewählte Standorte zeigt zumindest für geringere Jährlichkeiten, wie sie bei der Bemessung von Entwässerungssystemen verwendet werden, keine wesentlichen Änderungen (siehe Tabelle 32 und Tabelle 33). Für seltenere Ereignisse sind die Abweichungen zwischen den KOSTRA-Daten und der Regenspende nach Reinhold allerdings erheblich. Für diese seltenen Niederschlagsereignisse werden Entwässerungssysteme aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel jedoch nicht ausgelegt.

Tabelle 32: Starkniederschlagshöhen aus KOSTRA 2010R (DWD 2020) und KOSTRA 1997 (Bartels 1997) für die Dauerstufe 15 Minuten und die Jährlichkeit 5 bzw. 100 Jahre für unterschiedliche Küstenstandorte

Ort	KOSTRA 2010R (Basiszeitraum 1951-2010)		KOSTRA 1997 (Basiszeitraum 1951-1981)	
	D = 15 min n = 5 a	D = 15 min n = 100 a	D = 15 min n = 5 a	D = 15 min n = 100 a
Bremerhaven	14,3 mm	24,1 mm	13-14 mm	22-24 mm
Hamburg	15,2 mm	26,1 mm	14-16 mm	24-26 mm 26-28 mm*
Brake	14,0 mm	23,3 mm	13-14 mm	21-22 mm
Lübeck	15,0 mm	25,8 mm	13-14 mm	21-22 mm 22-24 mm*
Wismar	13,7 mm	22,4 mm	13-14 mm	21-22 mm
Rostock	13,6 mm	22,3 mm	12-13 mm	21-22 mm

* Je nach Standort

Tabelle 33: Starkniederschlagshöhen nach Reinhold (1940) für die Dauerstufe 15 Minuten und die Jährlichkeit 1, 5 bzw. 100 Jahre sowie unterschiedliche Küstenstandorte bzw. -regionen

Ort	Reinhold		
	D = 15 min, n = 1 a	D = 15 min, n = 5 a	D = 15 min, n = 100 a
Bremen	7,0 mm	12,5 mm	34,6 mm
Hamburg	8,7 mm	14,0 mm	31,0 mm
Lübeck	8,1 mm	14,4 mm	35,8 mm
Nordwestdeutschland	7,7 mm	13,6 mm	33,8 mm
Nordostdeutschland	8,5 mm	15,2 mm	37,6 mm

Bei der Dimensionierung werden Entwässerungssysteme nicht auf Vollfüllung ausgelegt. Nach DWA-Arbeitsblatt 118 sollte das System einen maximalen Auslastungsgrad von 90% aufweisen. Bei diesem Auslastungsgrad tritt unter Freispiegelabfluss die größte Abflusskapazität auf, welche infolge eines zunehmenden Einflusses der Wandreibung bei

Vollfüllung gegenüber einer 90%-igen Füllung abnimmt (DWA 2009). Das zulässige Verhältnis von Wasserstand zu Durchmesser (h/d_i) für Grundleitungen wird in der DIN EN 1986-100 mit 0,7 angegeben. Wird zudem der Durchmesser der Entwässerungsleitungen großzügig gewählt, können durchaus ausreichende Reserven vorhanden sein. Gleichzeitig muss mit der Zeit jedoch mit Ablagerungen im System gerechnet werden, wodurch die Reserven aufgebraucht werden können, so dass diese faktisch nicht mehr oder nicht mehr vollumfänglich zur Verfügung stehen. Spezifische Aussagen über gegebenenfalls vorhandene Überkapazitäten eines Entwässerungssystems erfordern eine individuelle Betrachtung des Gesamtsystems. Zudem spielt die Kapazität bzw. Höhe des Vorfluters eine Rolle, welche ebenfalls durch den Klimawandel bzw. Meeresspiegelanstieg maßgeblich beeinträchtigt werden kann. Belastbare allgemeine Aussagen können somit nicht getroffen werden.

4.4.5.3 Anpassung von Entwässerungssystemen

Aufgrund der bestehenden Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur und Feuchtegehalt der Luft und der damit erwarteten erhöhten Starkniederschlagsintensitäten und -mengen scheint es plausibel, Entwässerungssysteme an steigende Starkniederschlagsmengen anzupassen. DIN EN 1986-100 und DIN EN 752 enthalten zwar Aussagen, nach denen mögliche Auswirkungen des Klimawandels bei der Bemessung von Entwässerungssystemen in Betracht zu ziehen sind, enthalten jedoch keine konkreten Aussagen darüber, wie eine solche Anpassung zu erfolgen hat. Die Bund-/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA 2020) empfiehlt hingegen bei Neubauten oder signifikanten Änderungen die Sensitivität gegenüber einem größeren Bemessungsregenereignis von beispielsweise +10% zu prüfen. Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU Bayern 2009) weist auf die Möglichkeit der vorsorglichen Berücksichtigung hin, indem die Jährlichkeit des Bemessungsregens verringert wird. Indem zum Beispiel ein 10-jährliches Ereignis anstatt eines 5-jährlichen Ereignisses für die Dimensionierung des Systems angesetzt wird. Grundsätzlich ist es als unwirtschaftlich anzusehen, ein bestehendes Entwässerungssystem vor Erreichen seiner Lebensdauer anzupassen, zumal die Systeme ohnehin nicht auf sehr seltene und somit schadensträchtigere Ereignisse ausgelegt werden. Daher muss bereits heute aber auch zukünftig mit Überschwemmungen infolge von Starkregen gerechnet werden. Eine Form der Anpassung ist daher, das Ausmaß der Überflutung anhand von Starkregengefahrenkarten zu bestimmen. Gegebenenfalls auftretende kurzfristige Einschränkungen der Umschlagstätigkeit infolge Überstau des Entwässerungssystems können durchaus hinnehmbar sein. Bei sehr großzügig dimensionierten Entwässerungssystemen bzw. unterdurchschnittlichen Regenmengen

erfordert das Thema der Feststoffablagerung im System zudem erhöhte Aufmerksamkeit bzw. Vorsorge.

Werden Entwässerungssysteme neu erstellt, kann insbesondere bei kleineren Querschnitten, die Wahl des nächst größeren Nenndurchmessers bereits ausreichend sein (Abbildung 57). Abbildung 57 zeigt ebenfalls, dass sich bei größeren Nenndurchmessern, wie sie für die Entwässerung von großen Terminalflächen von Bedeutung sind, die starke Kapazitätzunahme bei der Wahl des nächst größeren Nenndurchmesser verliert. Dennoch nimmt auch bei einem Nenndurchmesser von 1000 mm und mehr der Abfluss um 25% zu, wenn der nächstgrößere Nenndurchmesser gewählt wird. Vor allem, wenn das Niederschlagswasser in eine vom Meeresspiegel beeinflusste Vorflut eingeleitet wird, kann der Meeresspiegelanstieg zukünftig einen wesentlichen Einfluss auf das System haben.

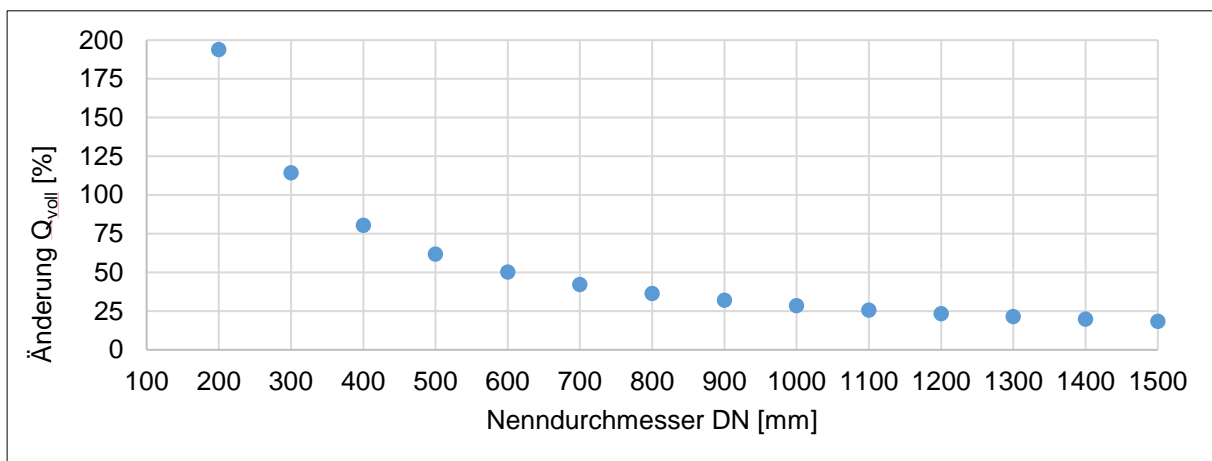


Abbildung 57. Änderung von Q_{voll} bei Wahl des nächst größeren Nenndurchmessers

4.4.5.4 Starkregengefahrenkarten

Durch Überflutung infolge von Starkregen gefährdete Gebiete können mithilfe von Starkregengefahrenkarten dargestellt werden. Im einfachsten Fall können diese Informationen aus topographischen Karten abgeleitet werden. Insbesondere für Starkregenanalysen gibt es unterschiedliche Methoden, die unterschiedliche Anforderungen an Aufwand und Datenbedarf stellen und entsprechend differenziertere Aussagen bezüglich der Ergebnisse erlauben (siehe LAWA (2018), DWA (2013)) Abbildung 58 zeigt das Ergebnis einer mit einem Geoinformationssystem (GIS) durchgeführten topographischen Starkregenanalyse. Anhand einer solchen Analyse können beispielsweise Fließwege und Senken identifiziert werden. Für spezifische Aussagen über Fließtiefen ist eine hydraulische Analyse erforderlich.

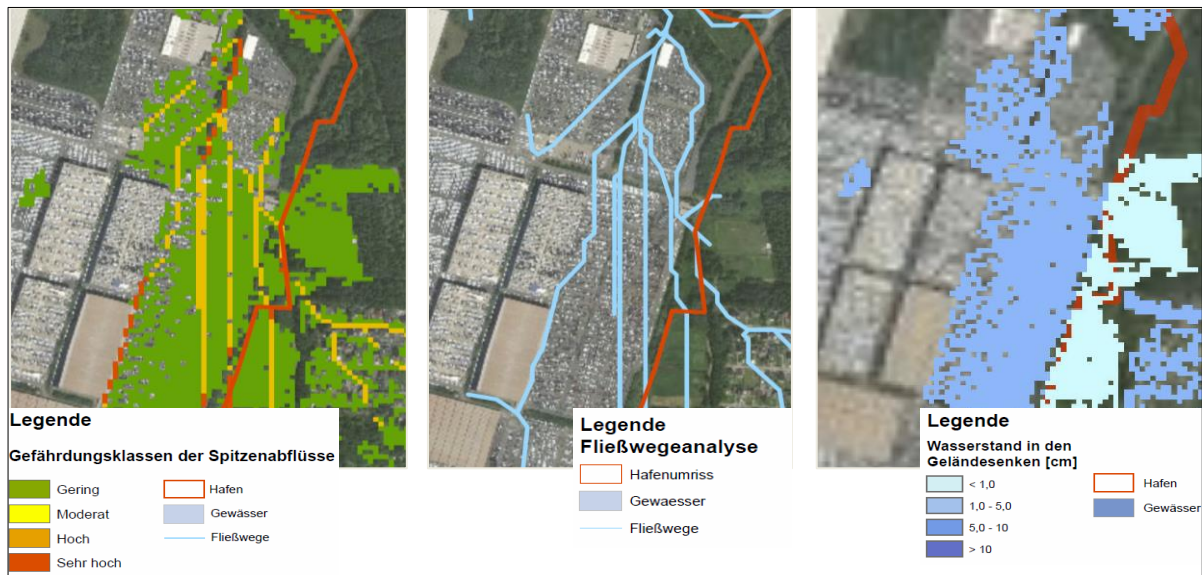


Abbildung 58: GIS-gestützte topographische Starkregenanalyse einer Terminalfläche (Baumgärtner 2020)

Auf Basis der Gefahrenkarte kann ein erforderlicher baulicher Objektschutz identifiziert und gegebenenfalls dezentrale Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung können geprüft werden. Die LAWA hat 2018 Strategien für ein effektives Starkregenrisikomanagement veröffentlicht. Der Leitfaden kommunales Starkregenrisikomanagement der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg enthält ebenfalls wichtige Hinweise zur Risikobewertung infolge von Starkregen (LUBW 2016), welche auch auf Seehäfen übertragbar sind.

4.4.6 Eislasten auf wasserbauliche Anlagen

Grundlagen bezüglich Eislasten auf wasserbauliche Anlagen sind in Kapitel 7 der EAK (EAK 2020) sowie in Kapitel 4.11 der EAU (2020) dargestellt. Die Lasteinwirkungen hängen u.a. von der Größe der Eismassen und der maßgebenden Festigkeit des Eises, welche wiederum vom Salzgehalt sowie von der Temperatur an Eisunterseite und -oberseite abhängen (EAU 2020). Demnach haben sowohl eine Änderung der Wasser- als auch der Lufttemperatur, wie sie im Rahmen des Klimawandels zu erwarten sind, eine Auswirkung auf die Eislasten auf wasserbauliche Anlagen. Tabelle 34 zeigt das Ergebnis einer Sensitivitätsstudie für die einaxiale Eisdruckfestigkeit, welche unter anderem die mechanische Eisdruckkraft bestimmt. Die einaxiale Eisdruckfestigkeit würde infolge einer Abnahme der Salinität zu- und infolge eines Anstiegs der Lufttemperatur abnehmen. Die Berechnungen beruhen auf Ansätzen und Annahmen, welche in der EAU (EAU 2020) dargestellt sind. Der Anstieg der Luft- und Wassertemperatur kann zur Folge haben, dass die Häufigkeit von Eis und die Stärke von Eiswintern an der deutschen Küste abnehmen. Eine entsprechende Änderung ist an der

deutschen Küste bereits zu beobachten (vgl. Kapitel 4.3.9). Eine Abnahme der Eisedecke hätte nach EAU (2020) eine Änderung der mechanischen Eisdruckkraft in gleicher prozentualer Größenordnung zur Folge. Die auf der Sensitivitätsanalyse basierenden Aussagen sind grundsätzlich auf andere Eislasten auf wasserbauliche Anlagen übertragbar, in denen die Festigkeitseigenschaften der Eisedecke eine maßgebliche Rolle spielen, wie beispielsweise waagerechte oder vertikale Eislasten auf Pfähle. Der rechnerische Ansatz zur Bestimmung der Eisdruckfestigkeit wurde mit der 11. Auflage der EAU eingeführt. In vorherigen Auflagen der EAU wurde für die deutsche Nordsee eine Eisdruckfestigkeit von 1,5 MN/m² und für die Ostsee eine Eisdruckfestigkeit von 1,8 MN/m² angenommen. Nach DIN 19704-1: Stahlwasserbauten ist in Küstengewässer eine horizontale Flächenlast von 250 kN/m² und eine Dicke von 0,5-0,8 m anzusetzen.

Tabelle 34: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse bzgl. einer Änderung der Eisdruckfestigkeit bzw. mechanischen Eisdruckkraft infolge einer Abnahme der Salinität von 1‰ (Nordsee) bzw. 2‰ (Ostsee) und einer Abnahme der Lufttemperatur bzw. Eistemperatur an der Oberseite von 2°C an der deutschen Nord- und Ostseeküste für verschiedene Ist-Szenarien welche sich in den Annahmen für Salinität und Lufttemperatur unterscheiden. Die Berechnungen beruhen auf Ansätzen und Annahmen, welche in der EAU (EAU 2020) dargestellt sind.

	Nordsee						Ostsee					
Salinität d. Eises [‰]	14	13	14	14	18	17	8	6	8	6	12	10
Lufttemperatur [°C]	-3	-3	-1	-1	-3	-3	-3	-3	-1	-1	-3	-3
Mittl. Eistemperatur [°C]	-2,5	-2,5	-1,5	-1,5	-2,5	-2,5	-2	-2	-1	-1	-2	-2
Porosität [‰]	231,6	217,8	321,3	301,6	286,2	272,6	168,2	133,9	259,4	204,1	234,6	201,7
Druckfestigkeit [MN/m²]	1,17	1,24	0,84	0,90	0,94	0,99	1,61	2,02	1,04	1,32	1,15	1,34
Höhe der Eisedecke	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Mechan. Eisdruckkraft [MN/m]	0,154	0,164	0,111	0,118	0,125	0,131	0,265	0,333	0,172	0,218	0,190	0,221
Änderung [%]	-	6,4	-27,9	-23,2	-	-15,0	-	25,6	-35,2	-17,6	-	-16,6

4.4.7 Luft- und Wasserchemie

Bauwerke an Land und im Wasser stehen mit ihrer Umgebung in Kontakt. Daher haben die chemischen Eigenschaften von Luft und Wasser grundsätzlich einen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken. Bei Wasserbauwerken an der Küste ist insbesondere die Korrosion von Stahl von Bedeutung. In Thoresen (2018) sind die Grundlagen zur Korrosion von Stahl im Wasserbau dargestellt. Die größten Korrosionsraten treten im Bereich des Niedrigwassers und des Spritzwasserbereichs aufgrund des Wechsels von Feuchtigkeit und

Luft auf. Im Wasser hängt die Korrosionsrate des Stahls von Salzgehalt, pH-Wert bzw. Säuregehalt, Sauerstoffgehalt sowie Temperatur ab. Grundsätzlich hat ein Anstieg des Salz-, Säure-, oder Sauerstoffgehalts oder der Temperatur einen Anstieg der Korrosionsrate zur Folge.

Es bestehen keine Untersuchungen zur Änderung der marinen Korrosion im Rahmen des Klimawandels. Anhand von theoretischen Überlegungen zeichnen sich die folgenden Zusammenhänge ab (vgl. Cai et al. 2018):

- Die im Rahmen des Klimawandels erwartete Abnahme des pH-Werts hat zwar in ihrer Tendenz einen negativen Einfluss auf die Korrosionsraten, der Einfluss ist aber wahrscheinlich gering und somit vernachlässigbar.
- Eine Abnahme des Salzgehalts würde sich positiv auf die Korrosionsraten auswirken
- Die Zunahme der Luft- bzw. Wassertemperatur wirkt sich negativ aus, hat jedoch gleichzeitig zur Folge, dass weniger Sauerstoff im Wasser gelöst wird, was sich wiederum positiv auf die Korrosionsrate auswirken würde.

Nguyen et al. (2013) haben eine mögliche Änderung der atmosphärischen Korrosion für ein Stahlbauteil in Melbourne sowie Brisbane (Australien) im Rahmen des Klimawandels untersucht. Die Autoren finden unterschiedliche Änderungssignale. In ihren Ergebnissen zeigt sich ein komplexes Zusammenwirken unterschiedlicher Faktoren wie relative Luftfeuchte, Salzgehalt der Luft und Niederschlagsmuster bzw. –menge. Für den Salzgehalt der Luft spielt auch die zukünftige Windrichtung und –stärke eine Rolle, da hiermit Salze vom Meer in Richtung Land transportiert werden. Die Lufttemperatur ist gemäß ihrer Untersuchungen weniger maßgebend. Je nach Klimamodell und Region zeigen sich zukünftig Zu- oder Abnahmen der Korrosionsrate von bis zu $\pm 40\%$ für das A1F1-Szenario (etwa RCP8.5), mit Änderungsraten $>10\%$ etwa ab dem Jahr 2050.

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird maßgeblich durch das Eindringen von Chlorid und die Karbonatisierung des Betons beeinflusst. Dringt Chlorid in den Beton ein, kann die Bewehrung korrodieren. Durch Karbonatisierung, d.h. der chemischen Reaktion des CO_2 in der Luft mit dem Zement im Beton, wird der pH-Wert des Betons herabgesetzt und somit das basische Milieu des Betons, welches die Bewehrung vor Korrosion schützt, nachteilig verändert. Aufgrund der Nähe zum Meer spielt in Seehäfen der Eintrag von Chlorid die größere Rolle. Auch Bereiche, in denen im Winter Streusalz ausgebracht wird, sind besonders von dem Chlorideintrag betroffen.

Saha und Eckelman (2014) haben den Einfluss des Klimawandels auf die Eindringtiefe der Karbonatisierung bzw. des Chlorids exemplarisch für ein Betonbauwerk in Boston (Vereinigte Staaten von Amerika) und die SRES-Szenarien A1F1 (etwa RCP8.5) sowie B1 (etwa RCP4.5) untersucht. In ihren Ergebnissen zeigt sich deutlich der Einfluss eines steigenden CO₂-Gehalts der Luft auf die Eindringtiefe der Karbonatisierung mit einer Abnahme der Bauwerkslebensdauer von bis zu 26 Jahren. Der Einfluss des Klimawandels auf die Eindringtiefe des Chlorids ist hingegen deutlich weniger maßgeblich, mit einem vernachlässigten Einfluss des B1-Szenarios und einer Abnahme der Bauwerkslebensdauer von etwa 10 Jahren im Fall des A1F1-Szenarios.

Mögliche zukünftige Änderungen von Korrosionsraten im Stahl- bzw. Betonbau sind aufgrund der komplexen Wirkzusammenhänge schwer vorauszusagen. Nach bisherigem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Klimawandels auf Stahlbauwerke im Wasser sowie Betonbauwerke an Land und im bzw. am Wasser, zumindest in einer maritimen Umgebung, gering ist, da hier der bereits vorhandene hohe Feuchtigkeitsgehalt bzw. Einfluss des Salzgehalts als maßgeblich angesehen wird. Insbesondere für Stahlbauteile an Land bleibt zu beobachten, ob und wie sich die Korrosionsraten an Land infolge sich ändernder klimatischer Bedingungen verändern werden. Grundsätzlich ist zu empfehlen, im Rahmen des üblichen Bauwerksmonitorings so weit möglich ein Augenmerk auf etwaige klimatische Trends zu richten.

4.4.8 Bewertung der Vulnerabilität von Anlagen und hafenbezogenen Tätigkeiten

Basierend auf den an der deutschen Küste zu erwartenden Änderungen relevanter Klimaparameter und –prozesse wurde eine allgemeine Bewertung der Gefährdung bzw. Verwundbarkeit für unterschiedliche Anlagen und Tätigkeiten in deutschen Seehäfen für ein Szenario mit starkem Klimaschutz (etwa RCP2.6), ein moderates Treibhausgas-Szenario (etwa RCP4.5) sowie ein 'Weiter-wie-bisher'-Szenario (etwa RCP8.5) durchgeführt. Dabei muss das RCP4.5-Szenario derzeit als realistisches Szenario angesehen werden (Hausfather und Peters 2020). Die Bewertung der Gefährdung bzw. Verwundbarkeit erfolgt in Anlehnung an den PIANC-Leitfaden (PIANC 2020) qualitativ anhand der Kategorien signifikante Abnahme, Abnahme, keine Änderung, Zunahme, signifikante Zunahme. Die Einordnung in die qualitativen Kategorien erlaubt allerdings teilweise keine differenzierte Unterscheidung zwischen den einzelnen Klimaszenarien, da die zu erwartenden Änderungen zu nah beieinander liegen. Tabelle 35 zeigt das Ergebnis der übergeordneten

Verwundbarkeitsanalyse für Seehäfen in Deutschland in Anlehnung an Stufe 3 des PIANC-Leitfadens für das moderate und Tabelle 36 das Ergebnis für das 'Weiter-wie-bisher'-Szenario.

Tabelle 35: Exemplarisches Ergebnis einer übergeordneten Verwundbarkeitsanalyse für Seehäfen in Deutschland in Anlehnung an PIANC (2020) für die nahe und ferne Zukunft des Klimaschutz- und Moderaten-Szenarios sowie die nahe Zukunft des Weiter-wie-bisher-Szenarios

Beispiele relevanter Klimaparameter und -prozesse → Beispiele kritischer Anlagen, Tätigkeiten, Systeme ↓	Im Vergleich zu historischen Daten, wie verändert sich die Gefährdung aufgrund der potentiellen Klimagefahren innerhalb des Planungshorizonts					Unter Berücksichtigung relevanter Schwellenwerte und vorhandener Anpassungskapazitäten, wie verändert sich wahrscheinlich die Verwundbarkeit?				
	Extreme Hitze	Meeresspiegel	Sturmintensität	Seegang	Starkregen	Extreme Hitze	Meeresspiegel	Sturmintensität	Seegang	Starkregen
Zufahrt zum Liegeplatz - Fahrrinne	↑↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↓ ¹	⇒	⇒	⇒
Schleusen	↑↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒
Kaianlagen	↑↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒
Sonstige Landeanlagen	↑↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↑ ³	⇒	⇒	⇒
Vertäu- und Festmacheinrichtungen	↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒
Anlegen, Be- und Entladen	↑	↑	⇒	⇒	↑	↑	⇒/↑ ²	⇒	⇒	↑
Umschlaggeräte	↑	↑	⇒	⇒	↑	↑	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒
Hochwasserschutzanlagen	↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒
Lagerflächen	↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒/↑ ⁴	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒/↑ ²
Lagerhallen	↑	↑	⇒	⇒	↑	↑	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒/↑ ²
Straßen	↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒/↑ ⁴	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒/↑ ²
Gleisanlagen	↑	↑	⇒	⇒	↑	↑	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒/↑ ²
Entwässerungssysteme	↑	↑	⇒	⇒	↑	⇒	⇒/↑ ²	⇒	⇒	↑
Gebäude	↑	↑	⇒	⇒	↑	↑	⇒/↑ ²	⇒	⇒	⇒/↑ ²

¹ Je nach Entwicklung des Sedimenttransports
² In Abhängigkeit des vorhandenen Freibords/ der Höhenlage/ der Topographie
³ Je nach Anlage und Lebensdauer
⁴ Je nach Belag (Asphalt, Beton, Pflaster) und Lebensdauer

Tabelle 36: Ergebnis einer übergeordneten Verwundbarkeitsanalyse für Seehäfen in Deutschland in Anlehnung an PIANC (2020) für die ferne Zukunft und das Weiter-wie-bisher-Szenario.

Beispiele relevanter Klimaparameter und -prozesse → Beispiele kritischer Anlagen, Tätigkeiten, Systeme ↓	Im Vergleich zu historischen Daten, <u>wie verändert sich die Gefährdung</u> aufgrund der potentiellen Klimagefahren innerhalb des Planungshorizonts					Unter Berücksichtigung relevanter Schwellenwerte und vorhandener Anpassungskapazitäten, <u>wie verändert sich wahrscheinlich die Verwundbarkeit?</u>				
	Extreme Hitze	Meeresspiegel	Sturmintensität	Seegang	Starkregen	Extreme Hitze	Meeresspiegel	Sturmintensität	Seegang	Starkregen
Zufahrt zum Liegeplatz - Fahrrinne	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↓ ¹	↑	⇒/↑ ²	⇒
Schleusen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↑↑ ³	↑	⇒/↑ ²	⇒
Kaianlagen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↑↑ ³	↑	⇒/↑ ²	⇒
Sonstige Landeanlagen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↑↑ ⁴	↑	⇒/↑ ²	⇒
Vertäu- und Festmacheinrichtungen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↑↑ ³	⇒/↑ ⁵	⇒/↑ ²	⇒
Anlegen, Be- und Entladen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	⇒/↑↑ ³	↑	⇒/↑ ²	↑↑
Umschlaggeräte	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	⇒/↑↑ ³	↑	⇒	⇒
Hochwasserschutzanlagen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↑↑ ³	↑	⇒/↑ ²	⇒
Lagerflächen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒/↑↑ ⁶	⇒/↑↑ ³	↑	⇒	⇒/↑↑ ³
Lagerhallen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	⇒/↑↑ ³	↑	⇒	⇒/↑↑ ³
Straßen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒/↑↑ ⁶	⇒/↑↑ ³	⇒	⇒	⇒/↑↑ ³
Gleisanlagen	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	⇒/↑↑ ³	⇒	⇒	⇒/↑↑ ³
Entwässerungssysteme	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	⇒	⇒/↑↑ ³	⇒	⇒	↑↑
Gebäude	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	⇒/↑↑ ³	↑	⇒	⇒/↑↑ ³

¹ Je nach Entwicklung des Sedimenttransports
² In Abhängigkeit relevanter Wellenhöhen –größere relative Änderungen bei größeren Wellenhöhen
³ In Abhängigkeit der Lebensdauer und des vorhandenen Freibords/ der Höhenlage/ der Topographie
⁴ Je nach Anlage und Lebensdauer
⁵ Je nach Ausrichtung der Kaianlage relativ zur maßgeblichen Windrichtung
⁶ Je nach Belag (Asphalt, Beton, Pflaster) und Lebensdauer

Das Ergebnis der Analyse ähnelt sich für die Szenarien 'Klimaschutz' und 'Moderat' in der nahen und fernen Zukunft sowie das Szenario 'Weiter-wie-bisher' in der nahen Zukunft, aufgrund der zuvor erwähnten geringen Differenzierung der qualitativen Kategorien. Die

Aussagen sind in Teilen von den individuellen Gegebenheiten vor Ort abhängig (Freibord, signifikante Wellenhöhe, geographische Ausrichtung der Landanlagen). Aus der Analyse geht hervor, dass für die entsprechenden Szenarien vor allem der Anstieg von Lufttemperatur und mittlerem Meeresspiegel sowie Starkregen eine Zunahme der Verwundbarkeit von Seehäfen in Deutschland zur Folge haben wird. Der wesentliche Unterschied zu der fernen Zukunft des 'Weiter-wie-bisher'-Szenarios ist neben der Stärke der Zunahme von Lufttemperatur, Meeresspiegelanstieg und Starkregenintensität, dass zusätzlich die Gefährdung durch die Sturmintensität zunimmt, wobei diese Aussage jedoch als unsicher zu bewerten ist.

Schröder et al. (2013) haben zehn Häfen an der Ostseeküste dazu befragt, wann ein Meeresspiegelanstieg für den jeweiligen Hafen problematische Auswirkungen haben würde. 20% der Befragten gaben einen Meeresspiegelanstieg von 40-59 cm und 90% einen Anstieg von 80-99 cm als problematisch an. In einer von Becker et al. (2012) weltweit durchgeführten Umfrage mit 89 teilnehmenden Häfen, wobei allerdings etwa die Hälfte der Teilnehmenden aus Nordamerika stammte, gaben 12% der Befragten einen Meeresspiegelanstieg von bis zu 0,5 m und 39% einen Anstieg von 0,5-1,0 m als problematisch an. Überträgt man die Ergebnisse der beiden Studien auf die gesamte deutsche Küste, wäre ein Großteil der Häfen erst von einem Meeresspiegelanstieg, wie er im Rahmen des 'Weiter-wie-bisher'-Szenarios am Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten ist, maßgeblich betroffen. Zur Einschätzung der tatsächlichen Beurteilung der Betroffenheit der deutschen Häfen durch den Meeresspiegel sind jedoch die Höhenlagen der Kai- und Hochwasserschutzanlagen im Detail zu betrachten.

Beim Einfluss extrem hoher Temperaturen ist neben der Belastung der Mitarbeitenden in nicht-klimatisierten Räumen eine erhöhte Verwundbarkeit der bzw. ein erhöhter Bedarf an Klimatisierung zu nennen. Darüber hinaus können auch Materialien von den extremen Temperaturen betroffen sein. Hier sind neben Asphaltbelägen, welche jedoch je nach Lebensdauer ggf. bei Neubau angepasst werden können, vor allem sonnenexponierte Bauteile aus Stahl und elektronische Schaltelemente zu nennen. Starkregen belastet vor allem Entwässerungssysteme bzw. bei deren Überlastung von Überflutung betroffene Flächen sowie Gebäude und führt bei Umschlagstätigkeiten zu Beeinträchtigungen.

4.4.9 Empfehlungen zur Anpassung von deutschen Seehäfen an den Klimawandel

Die Anpassung an den Klimawandel wird bisher unterschiedlich, von sehr stark bis sehr gering, in den am Projekt PortKLIMA beteiligten Hafenmanagementgesellschaften berücksichtigt (Abbildung 59). Gleichzeitig wird aus den Umfrageergebnissen des Abschlussworkshops des

Projekts PortKLIMA ersichtlich, dass das Thema bei quasi allen Teilnehmenden zukünftig stärkere Berücksichtigung finden wird (Abbildung 60).

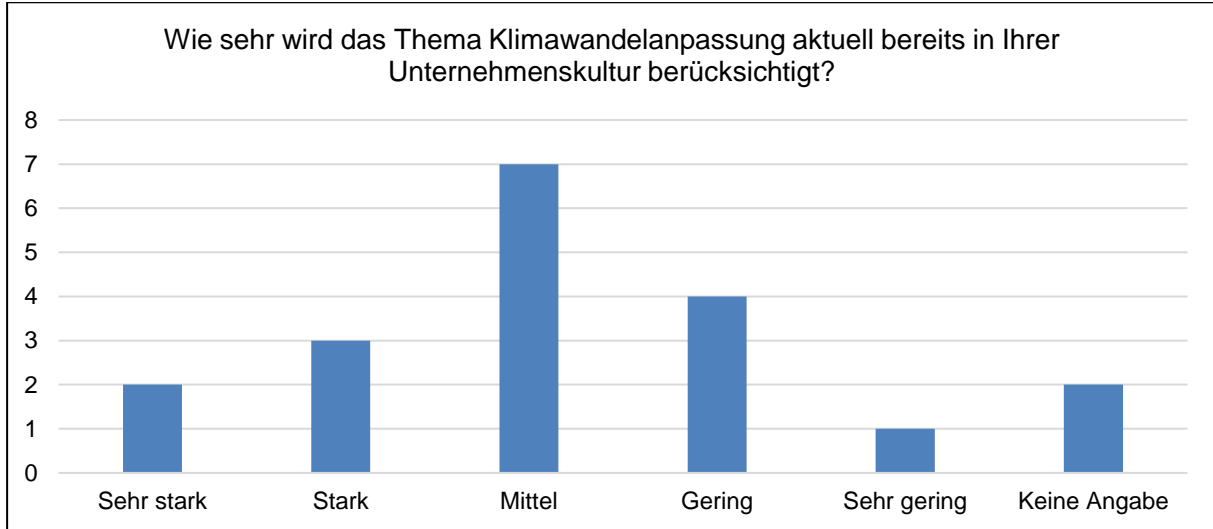


Abbildung 59: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. der aktuellen Berücksichtigung des Themas Klimawandelanpassung in der Unternehmenskultur

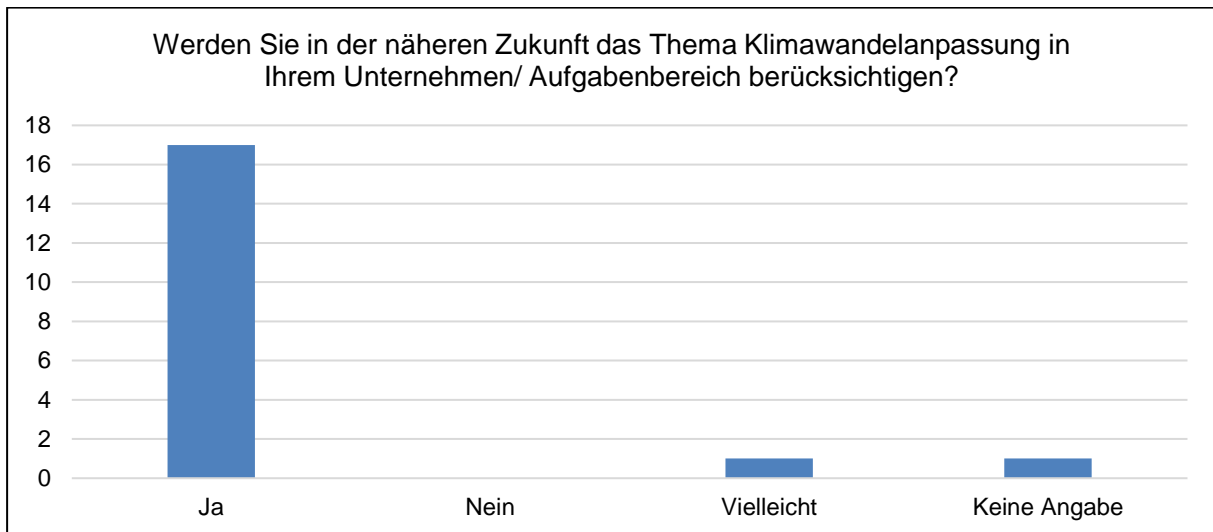


Abbildung 60: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. der zukünftigen Einbindung des Themas Klimawandelanpassung im Unternehmen bzw. Aufgabenbereich

Zudem schätzt die überwiegende Anzahl der Teilnehmenden, dass bis zu fünf Jahre Zeit bleiben, um das Thema Klimawandelanpassung ausreichend in das Unternehmen bzw. den Aufgabenbereich zu integrieren (Abbildung 61).

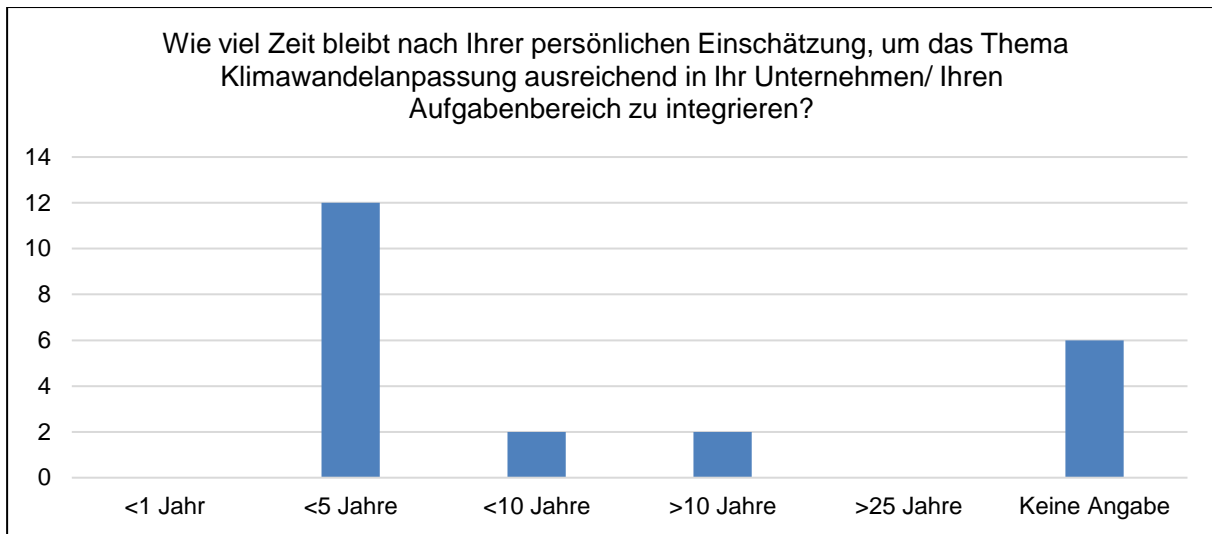


Abbildung 61: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. des zur Verfügung stehenden Zeithorizonts zur ausreichenden Integration des Themas Klimawandelanpassung in die Unternehmenskultur

Grundsätzlich existieren mit den im PIANC-Leitfaden (PIANC 2020) dargestellten Portfolios umfassende Maßnahmenkataloge, um die Widerstandsfähigkeit von Häfen gegenüber dem Klimawandel maßgeblich zu erhöhen. Dabei werden die Anpassungsmöglichkeiten im PIANC-Leitfaden in physische, soziale und institutionelle Maßnahmen untergliedert. Vor allem physische Maßnahmen erfordern wirtschaftliche Investitionen, die je nach den zu erwartenden Auswirkungen erheblich sein können. Soziale und institutionelle Maßnahmen erfordern i.d.R. geringere Investitionen. Der Zeitbedarf für die Umsetzung von Maßnahmen ist stark abhängig von verfügbaren personellen und finanziellen Ressourcen und kann je nach Maßnahme gering bis erheblich sein.

Zum aktuellen Zeitpunkt ist als wichtigste Maßnahme die Implementierung einer Anpassungsstrategie in den Seehäfen zu sehen. Deren Bedeutung liegt vor allem darin, sich mit der zukünftigen Betroffenheit durch den Klimawandel frühzeitig auseinanderzusetzen, so dass Maßnahmen gegebenenfalls bereits präventiv geplant und unter größtmöglicher wirtschaftlicher Effizienz, z.B. im Rahmen von Neubaumaßnahmen, umgesetzt werden können. Auch wenn die klimatischen Änderungen und die damit in Zusammenhang stehenden Auswirkungen sich erst zukünftig deutlicher zeigen werden, ist bereits heute die Wahrscheinlichkeit für Extremwetterereignisse wie Hitzewellen erhöht (Vautard et al. 2020; Ciavarella et al. 2021). Darüber hinaus ist insbesondere bei Neubau- und Planungsvorhaben mit langem Zeithorizont eine frühzeitige Einbindung der Folgen des Klimawandels sinnvoll. Zudem ist zu empfehlen, Monitoring-Programme einzurichten, um eine unterstützende, einen

möglichst langen Zeitraum umfassende Datengrundlage zur eigenen Betroffenheit für zukünftige Entscheidungen aufzubauen. Es ist zu empfehlen, das Thema Klimawandelanpassung bereits heute mitzudenken, auch wenn vom Grundsatz her Zeit zur Anpassung bleibt und der aktuelle Handlungsbedarf tendenziell überschaubar ist. Der von der Mehrzahl der Teilnehmenden des Abschlussworkshops des Projekts PortKLIMA angegebene Zeitraum von bis zu 5 Jahren zur angemessenen Integration des Themas Klimawandelanpassung kann daher als realistisch angesehen werden. Ob bereits aktuell oder in naher Zukunft konkreter Handlungsbedarf an physischen Maßnahmen besteht, hängt von den individuellen Gegebenheiten der einzelnen Häfen ab, die vor allem aufgrund naturräumlicher Gegebenheiten - wie beispielsweise Topographie oder Lage am Gewässer - teilweise sehr unterschiedlich ausfallen. Weiterhin maßgebend ist der Vergleich aus Kosten und Nutzen einer solchen Maßnahme, sind die relevanten Klimaparameter sowie die Reststandzeit bei technischen Anlagen.

Die Teilnehmenden des Abschlussworkshops wurden ebenfalls zu ihrer Einschätzung der größten Herausforderung im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel befragt. Die größte Herausforderung wird demnach im Umgang mit den Unsicherheiten gefolgt von der technischen Machbarkeit sowie der Finanzierung gesehen (Abbildung 62).

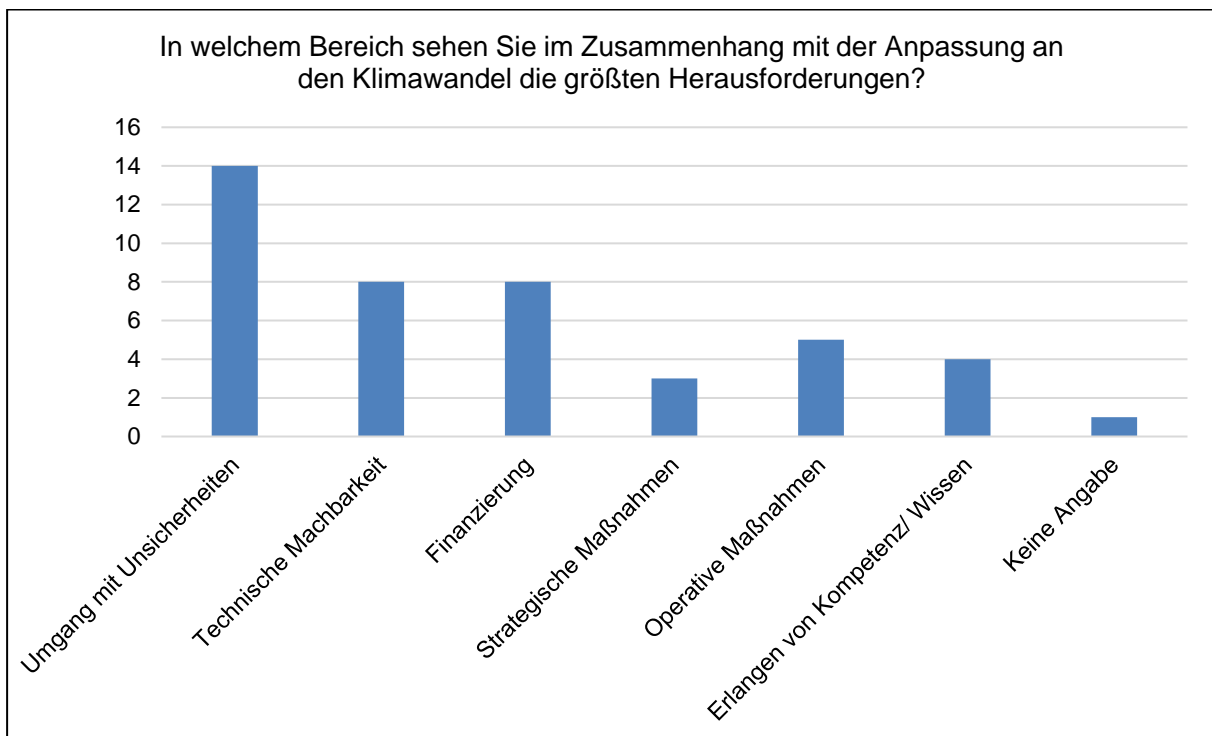


Abbildung 62: Ergebnis der im Rahmen des Abschlussworkshops durchgeführten Befragung bzgl. der größten Herausforderungen im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel

Die Unsicherheiten werden sich aufgrund der nicht bekannten zukünftigen Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen nicht ausräumen lassen. Den Unsicherheiten kann begegnet werden, indem der Zeitpunkt der Umsetzung mithilfe sogenannter Anpassungspfade (Schritt 4.5 des PIANC-Leitfadens (PIANC 2020)) flexibel gehalten wird. Um bestehende Unsicherheiten über die aktuelle Betroffenheit zu minimieren, ist der Aufbau von Monitoringprogrammen sinnvoll. Maßnahmen, die keine Nachteile haben oder keine besonderen Erfordernisse aufweisen, können sofort umgesetzt werden (No-regret Maßnahme). Flexibilität bzw. Ausbaureserven in Konstruktionen vorzusehen, für besonders anfällige bzw. bedeutende Anlagen oder Systeme Redundanzen einzubeziehen sowie die Folgen des Versagens mit einzuplanen bzw. abzumildern und ein geeignetes Notfallmanagement zu implementieren sind ebenfalls geeignete Maßnahmen, um mit Unsicherheiten umzugehen (siehe Kapitel 4.1.3 des PIANC-Leitfadens). Weitere Unsicherheiten bestehen zudem darin, wie sich die Änderungen des Klimas im eigentlichen, aus operativer und technischer Sicht relevanten Wettergeschehen niederschlagen werden. In diesem Zusammenhang auftauchende Fragen sind beispielsweise, ob es zukünftig häufigere Frost-Tau-Wechsel geben wird oder wie sich die Änderung der Wasser- und Luftchemie auf die Dauerhaftigkeit von Baumaterialien wie Stahl und Beton auswirken.

Die technische Machbarkeit wird sicherlich in einigen Fällen an ihre Grenzen stoßen, wie beispielsweise beim Umschlag von Gütern während eines Sturmereignisses, vor allem steht die technische Machbarkeit aber im Zusammenhang mit der Herausforderung einer entsprechenden Finanzierung. Größere Investitionen allein zum Zweck der Anpassung an den Klimawandel werden aktuell und voraussichtlich auch in naher Zukunft nicht getätigt werden. Bei geplanten Neubauten bzw. Erweiterungen ist es jedoch zwingend notwendig, die Aspekte der Klimawandelanpassung zu berücksichtigen. Der zusätzliche Aufwand um etwa Gebäude und Verkehrswege im Rahmen von anstehenden Investitionen an den Klimawandel anzupassen wird auf 10% des Investitionsvolumens geschätzt (Wenzel und Treptow 2014).

Empfehlungen können sich darauf beziehen, Klimazuschläge zu berücksichtigen bzw. mindestens Sensitivitätsstudien durchzuführen, Gefahrenkarten zu erstellen, so dass an gefährdeten Stellen Maßnahmen zur Abwehr getroffen werden können, oder im Fall von Gebäuden bauliche Änderungen vorzunehmen, um beispielsweise die Resilienz besonders gefährdeter Gebäudeteile wie Dachvorstände zu erhöhen. Tabelle 37 zeigt eine zusammenfassende Übersicht von Klimaparameter, deren Änderungswahrscheinlichkeit und Empfehlungen zur Anpassung.

Tabelle 37: Klimaparameter, deren Änderungswahrscheinlichkeit und Empfehlungen zur Anpassung.

Klimaparameter	Wahrscheinlichkeit der Änderung	Empfehlungen zur Anpassung
Meeresspiegel	Sicher	+0,5 bis +1,0 m bis 2100 im Bereich des privaten Hochwasserschutz – in Anlehnung an aktuelle Entwicklungen im Bereich des öffentlichen Hochwasserschutzes Ausbaureserve vorsehen Überflutungsflächen identifizieren Einfluss auf Entwässerungskapazität der Vorfluter und Grundwasserstände identifizieren
Temperatur	Sicher	Hitzebedingte Betriebseinschränkungen insbesondere bei exponierten Stahlbauteilen, z.B. Brücken und Weichen, beachten, ggf. Bauteile kühlen Ggf. Anpassung des Arbeitsschutzes für Mitarbeiter vorsehen Ausfallzeiten infolge hoher Temperaturen einplanen Erhöhten Kühlbedarf für Gebäude, Maschinen und Elektronik berücksichtigen
Starkregen	Wahrscheinlich	Bei Neuplanung Sensitivitätsanalyse durchführen: Bemessungswert +10% Fließwege identifizieren und Starkregengefahrenkarten erstellen Wenn möglich, Schaffung von Rückhaltevolumina Bei Bedarf Schutz von Anlagen vor Oberflächenwasser
Wind	Unsicher	Kein robustes Änderungssignal erkennbar. Daher derzeit keine Empfehlung zur Erhöhung der Bemessungswerte Überprüfung und Training von Sicherheitsmaßnahmen gegen windinduzierte Projektile Ggf. Warnsysteme implementieren
Luft-/ Wasserchemie	Unsicher	Betroffenheit beobachten und dokumentieren

5 Literaturverzeichnis

ISO 14091, 02-2021: Adaptation to climate change — Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment.

Allen, John T. (2018): Climate Change and Severe Thunderstorms - Oxford Research Encyclopedia of Climate Science: Oxford University Press (1).

Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J.; Pattiaratchi, C. (2017): Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: Scientific reports 7, S. 40171. DOI: 10.1038/srep40171.

AHU (1977): Gesundheits- und Umweltschutz bei Umschlag und Lagerung von Schüttgütern in Häfen. Empfehlungen des Ausschusses für Hafenumschlaggeräte. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V..

Bartels, H. (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA. Offenbach am Main: Dt. Wetterdienst.

Baumgärtner, J. (2020): Klimawandel und dessen Auswirkungen in norddeutschen Häfen: Eine GIS gestützte Risikoanalyse. Masterthesis. RWTH Aachen, Aachen.

Becker, A.; Inoue, S.; Fischer, M.; Schwegler, B. (2012): Climate change impacts on international seaports. Knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrators. In: *Climatic Change* 110 (1-2), S. 5–29. DOI: 10.1007/s10584-011-0043-7.

Becker, P.; Becker, A.; Dalelane, C.; Deutschländer, T.; Junhändel, T.; Walter, A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Deutscher Wetterdienst (DWD). Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

BMVI-Expertennetzwerk (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019. Unter Mitarbeit von S. Hänsel, C. Herrmann, K. Jochumsen, M. Klose, E. Nilson, M. Norpoth et al. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/TF1_3Auflage.pdf;jsessionid=4BE6F4D649C94E179FD734BABDBDE4DF.live21302?__blob=publicationFile&v=5.

Brienen, S.; Walter, A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M. et al. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02.

Brinkmann, B. (2005): Seehäfen. Planung und Entwurf. Berlin, Heidelberg: Springer.

BSH (2019): Gezeitenkalender 2020. Hoch- und Niedrigwasserzeiten für die Deutsche Bucht und deren Flussgebiete. Hamburg: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.

BSH (2021): Beschreibung-Eiswinter-2019-2020. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Online verfügbar unter https://www.bsh.de/DE/DATEN/Vorhersagen/Eisberichte-und-Eiskarten/Anlagen/Downloads/Beschreibung-Eiswinter/Beschreibung-Eiswinter-2019-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Bundesfinanzministerium (2020): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Hafenbetriebe". Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Hafenbetriebe.html.

BMU (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt und Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.

Cai, Y. K.; Zhao, Y.; Zhang, Z. K.; Ma, X. B.; Cheng, B. (2018): Atmospheric and Marine Corrosion: Influential Environmental Factors and Models. In: Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering. IWEMSE: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, Lda, S. 178–186.

Ciavarella, A.; Cotterill, D.; Stott, P.; Kew, S.; Philip, S.; van Oldenborgh, G. J. et al. (2021): Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. In: *Climatic Change* 166 (1-2), S. 6995. DOI: 10.1007/s10584-021-03052-w.

CERC (1984): Shore Protection Manual. Volume 1. Fourth Edition. Coastal Engineering Research Center. U.S. Army Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi.

Committee on Climate Change (2017): UK Climate Change Risk Assessment 2017. Evidence Report. Online verfügbar unter <https://www.theccc.org.uk/uk-climate-change-risk-assessment-2017/>.

de Winter, R. C.; Sterl, A.; Ruessink, B. G. (2013): Wind extremes in the North Sea Basin under climate change. An ensemble study of 12 CMIP5 GCMs. In: *J. Geophys. Res. Atmos.* 118 (4), S. 1601–1612. DOI: 10.1002/jgrd.50147.

Dethloff, K.; Rinke, A.; Handorf, D.; Jaiser, R.; Dorn, W.; Sommerfeld, A. (2018): Regionale und globale Wechselwirkung zwischen arktischem Meereis und der atmosphärischen Zirkulation. In: Jörg Rapp und Burghard Brümmer (Hg.): *Atmosphärische Prozesse im arktischen Klimasystem*. Offenbach/M: Deutscher Wetterdienst Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek (Promet, Heft 102 (2018)).

Dreier, N.; Schlamkow, C.; Fröhle, P.; Salecker, D.; Xu, Z. (2015): ASSESSMENT OF CHANGES OF EXTREME WAVE CONDITIONS AT THE GERMAN BALTIC SEA COAST ON THE BASIS OF FUTURE CLIMATE CHANGE SCENARIOS. In: *Journal of Marine Science and Technology*, 23 (6), S. 839–845. DOI: 10.6119/JMST-015-0609-3.

DIN 1055-4, 1986-08: Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken.

DIN 1055-4, 2005-03: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten.

DIN EN 1986-100, 2016-12: Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke - Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056.

DIN 4049-3, 1994-10: Hydrologie. Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.

DIN 19704-1, 11 2014: Stahlwasserbauten - Teil 1: Berechnungsgrundlagen.

DIN EN 752, 2017-07: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement.

DIN EN 1990/NA/A1, 08-2012: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung A1.

DIN EN 1991-1-4, 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten.

DIN EN 1991-1-5/NA, 2010: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen.

DWA (2009): Abwasserableitung. Bemessungsgrundlagen, Regenwasserbewirtschaftung, Fremdwasser, Netzsanierung, Grundstücksentwässerung. Weiterbildendes Studium "Wasser und Umwelt" Bauhaus-Universität Weimar. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. e.V.. 2., unveränd. Aufl. Weimar: Univ.-Verl.

DWA (2010): Klimawandel - Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. e.V.. Hennef.

DWA (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten. Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. August 2013. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. e.V.. Hennef.

DWA-Arbeitsblatt 118, 2006: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. e.V.. Hennef.

DWD (2017): Nationaler Klimareport. Klima - gestern, heute und in der Zukunft. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. DWD. Offenbach am Main (3. korrigierte Auflage). Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report_aufgabe-3.pdf;jsessionid=7A678EEC944361551BE16FE4DBD52D2A.live11053?_blob=publicationFile&v=5.

DWD (2020): KOSTRA-DWD Rasterdaten. Online verfügbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/.

DWD (2021): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. Deutscher Wetterdienst, Geschäftsbereich Klima und Umwelt. Offenbach. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2020.pdf?_blob=publicationFile&v=3.

EAK (2020): EAK 2002. Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken. Ausschuss für Küstenschutzwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. und der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V.. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. 3. korrigierte Ausgabe. Die Küste, Heft 88.

EAU (2004): Empfehlungen des Arbeitsausschusses 'Ufereinfassungen' - Häfen und Wasserstraßen EAU 2004. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V., Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.. 10. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.

EAU (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses 'Ufereinfassungen'. Häfen und Wasserstraßen EAU 2012. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V., Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.. 11. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.

EAU (2020): Empfehlungen des Arbeitsausschusses 'Ufereinfassungen' Häfen und Wasserstraßen EAU 2020. Hafenbautechnische Gesellschaft e.V., Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.. 12. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.

EC Directorate-General Climate Action (2011): Non-Paper – Guidelines for Project Managers: Making Vulnerable Investments Climate Resilient. Hg. v. European Commission. Online verfügbar unter <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/guidances/non-paper-guidelines-for-project-managers-making-vulnerable-investments-climate-resilient/guidelines-for-project-managers.pdf>.

European Environment Agency (2017): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. Luxembourg: Publications Office of the European Union (EEA report, no 2017,1). Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>.

EurOtop (2007): Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen. Die Küste, Heft 73. Online verfügbar unter http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EAK-K073_EurOtop_2007.pdf.

EurOtop (2018): Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Unter Mitarbeit von Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H, Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B. Online verfügbar unter www.overtopping-manual.com.

Feser, F.; Barcikowska, M.; Krueger, O.; Schenk, F.; Weisse, R.; Xia, L. (2015): Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe-A review. In: *Q.J.R. Meteorol. Soc* 141 (687), S. 350–382. DOI: 10.1002/qj.2364.

FGSV (2009): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht. RDO Asphalt 09. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (2010): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen. RDO Beton 09. Ausg. 2009. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. RStO 12. Ausgabe 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

FGSV (2013): Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen. TL Bitumen-StB 07/13. Ausg. 2007, Fassung 2013. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.

Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Groll, N. (2013): Changes in North Sea storm surge conditions for four transient future climate realizations. In: *Nat Hazards* 66 (3), S. 1501–1518. DOI: 10.1007/s11069-012-0279-1.

Gaythwaite, J. W. (2004): Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels. 2nd ed. Reston: American Society of Civil Engineers.

Gaythwaite, John W. (2016): Design of marine facilities. Engineering for port and harbor structures. Third edition. Reston, Virginia: ASCE Press.

Goda, Y. (2010): Random seas and design of maritime structures. 3rd ed. New Jersey: World Scientific (Advanced series on ocean engineering, v. 33).

Gönnert, G.; Siefert, W. (1999): Windstauanalysen in Nord- und Ostsee. Abschlussbericht KFKI-Forschungsvorhaben. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/kfki-projekte-berichte/0/052_2_1_e33239.pdf.

Hausfather, Z.; Peters, G. P. (2020): Emissions - the 'business as usual' story is misleading. In: *Nature* 577 (7792), S. 618–620. DOI: 10.1038/d41586-020-00177-3.

Helmholtz-Zentrum Hereon (2021a): Norddeutscher Klimaatlas. Online verfügbar unter <https://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>.

Helmholtz-Zentrum Hereon (2021b): Norddeutscher Klimamonitor. Online verfügbar unter <https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/>.

Helmholtz-Zentrum Hereon (2021c): Sturmflut Monitor. Online verfügbar unter <https://www.sturmflutmonitor.de/>.

Herd, B. (2020): Config World Climate widget. Online verfügbar unter: http://herdsoft.com/climate/widget/config.php?width=900&height=600&start_year=1880&title=&temp_axis=Temperatur-Anomalie+%28%B0C%29&co2_axis=CO2-Konzentration+%28ppm%29&temp_rgb=b2b2b2&co2_rgb=1786ec&ice_rgb=178600&alias=2.

Hoagland-Grey, H. (2015): Climate Change Risk Management Options for the Transportation Sector. Hg. v. Inter-American-Development Bank. Online verfügbar unter <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Climate-Change-Risk-Management-Options-for-the-Transportation-Sector.pdf>.

Huber, K. (2000): Hochwasserstände an Nord- und Ostseeküsten, High Water-levels at North Sea and Baltic Sea Coasts. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen* (85), S. 15–26.

Hünicke, B.; Zorita, E.; Soomere, T.; Madsen, K. S.; Johansson, M.; Suursaar, Ü. (2015): Recent Change - Sea Level and Wind Waves. In: The BACC II Author Team (Hg.): *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer.

IACS (2020): Chain Anchoring, Mooring and Towing Equipment. Rev. 4. IACS. London (No. 10).

IMO (2018): Adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG Emissions from Ships and Existing IMO Activity related to reducing GHG Emissions in the shipping sector. Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue. International Maritime Organization (IMO). Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO%20submission_Talanoa%20Dialogue_April%202018.pdf.

IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Unter Mitarbeit von Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. International Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press (996 p.). Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf.

IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Unter Mitarbeit von Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung,

A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley. International Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press (1535 pp.). Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf.

IPCC (2013/ 2014): Klimaänderung 2013/2014: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Beiträge der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). International Panel on Climate Change. Bonn/Wien/Bern, 2016: Deutsche Übersetzungen durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim. Online verfügbar unter https://www.de-ipcc.de/media/content/AR5-WGI_SPM.pdf.

IPCC (2014): Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Häufig gestellte Fragen und Antworten – Teil des Beitrags der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen. Unter Mitarbeit von T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley. International Panel on Climate Change. Bonn, 2017: Deutsche Übersetzung durch die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Klimabüro für Polargebiete und Meeresspiegelanstieg. Online verfügbar unter https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC_AR5_WGI_FAQ_deutsch.pdf.

IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Hg. v. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, et al. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/srocc/>.

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. Unter Mitarbeit von V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. Connors, C. Péan, S. Berger et al. Cambridge University Press.

Jacob, D. (2014): Zwischen Bandbreitenmodellen und stabilen Trends - erwartete Klimaänderungen. CSC-Jahrestagung. Potsdam, 13.02.2014. Online verfügbar unter https://www.schulprojekt-klimawandel.de/imperia/md/content/csc/j/csc_it2014_jacob.pdf.

Jensen, J.; Mudersbach, C.; Dangendorf, S. (2013): Untersuchungen zum Einfluss der Astronomie und des lokalen Windes auf sich verändernde Extremwasserstände in der Deutschen Bucht. In: *KLIWAS Schriftenreihe* (KLIWAS-25/2013).

Junghänel, T.; Ertel, H.; Deutschländer, T. (2017): KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Hg. v. DWD. Offenbach am Main. Online verfügbar unter https://rcccm.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_revision_kostr_a_dwd_2010.pdf;jsessionid=9957299313A496CFCCFFD7FDAF67ABFF.live11041?blob=publicationFile&v=7.

Kaspar, F.; Mächel, H. (2017): Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In: G. P. Brasseur, D. Jacob und S. Schuck-Zöller (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Kind, C.; Terenzi, A.; Hauer, M. (2021): Adaptation Standard: Analyse bestehender Normen auf Anpassungsbedarfe bezüglich Folgen des Klimawandels. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Climate Change, 56/ 2001).

- Klein, B.; Seiffert, R.; Gräwe, U.; Klein, H.; Loewe, P.; Möller, J. et al. (2018): Deutsche Bucht mit Tideelbe und Lübecker Bucht. In: H. von Storch, I. Meinke und M. Claußen (Hg.): Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Klemm, O.; Lin, N.-H. (2016): What Causes Observed Fog Trends. Air Quality or Climate Change? In: *Aerosol Air Qual. Res.* 16 (5), S. 1131–1142. DOI: 10.4209/aaqr.2015.05.0353.
- Krätzig, W. B.; Andres, M.; Niemann, H.-J.; Köpcke, K.-E. (2016): Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten. Technische Regel für Anlagensicherheit 320 (TRAS 320). Umweltbundesamt.
- Krauß, B.; Grotehusmann, D.; Jasper-Tönnies, A.; Einfalt, D. (2014): Beurteilung der Bemessung von Straßenentwässerungseinrichtungen nach RAS-Ew und RiStWag vor dem Hintergrund veränderter Temperatur- und Niederschlagsereignisse durch den Klimawandel in Deutschland bis zum Jahr 2100. Schlussbericht. BASt Forschungsprojekt FE-Nr. 05.0168/2011/GRB. Online verfügbar unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/2161/file/05.0168-Beurteilung+d.Bemessung+v.Stra%C3%9fenentw%C3%A4sserungseinrichtungen+nach+RAS-Ew.pdf>.
- Lange, B.; Eyring, V.; Isensee, J.; Schenzle, P. (2019): Klimaschutz im Seeverkehr. Potentiale erkennen und handeln. Hg. v. Aktionskonferenz Nordsee e.V. Bremen.
- LAWA (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Erfurt. Online verfügbar unter https://www.lawa.de/documents/lawa-starkregen_1552292818.pdf.
- LAWA (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft: Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020. Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA). Online verfügbar unter https://www.lawa.de/documents/lawa-klimawandel-bericht_2020_1618816705.pdf.
- LfU Bayern (2009): Bemessung von Misch- und Regenwasserkanälen. Teil 1: Klimawandel und möglicher Anpassungsbedarf. Bayerisches Landesamt für Umwelt
- LfU Bayern (2020): Klimaentwicklung. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/klimaentwicklung/index.html.
- Linke, C. et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten. Hg. v. Bund-Länder-Fachgespräch "Interpretation regionaler Klimamodelldaten". Essen. Online verfügbar unter http://www.kwis-rlp.de/fileadmin/website/klimakompetenzzentrum/Klimawandelinformationssystem/Leitlinien_Fassung_vom-2017-10-24.pdf.
- LUBW (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Stand Dezember 2016. Karlsruhe: LUBW Landesanstalt für Umwelt Messungen und Naturschutz.
- Mai, S. (2004): Klimafolgenanalyse und Risiko für eine Küstenzone. am Beispiel der Jade-Weser-Region. Dissertation.
- Mai, S.; Zimmermann, C. (2004): Veränderungen der Seegangsbedingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung. In: G. Schernewski und T. Dolch (Hg.): Geographie der Meere und Küsten. Coastline Reports (1), S. 93–100.

Malcherek, Andreas (2010): Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer. 1. Aufl. s.l.: Vieweg+Teubner (GWV).

Malitz, G. (2005): KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000). Grundlagenbericht. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/kooperationen/kostra/grundlagenbericht_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=3.

Malitz, G.; Ertel, H. (2015): KOSTRA-DWD-2010. Starkniederschlagshöhen für Deutschland. Abschlussbericht. DWD. Offenbach am Main. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_kostra_dwd_2010_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=9.

Mcsweeney, Robert (2021): IPCC. How the AR6 WG1 summary for policymakers compares to its predecessor. In: *Carbon Brief*, 12.08.2021. Online verfügbar unter https://www.carbonbrief.org/ipcc-how-the-ar6-wg1-summary-for-policymakers-compares-to-its-predecessor?utm_campaign=Carbon%20Brief%20Weekly%20Briefing&utm_content=20210813&utm_medium=email&utm_source=Revue%20Weekly.

Meier, H. M. E. (2015): Projected Change - Marine Physics. In: The BACC II Author Team (Hg.): Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Cham: Springer.

Merk, O. (2014): Shipping Emissions in Ports. Discussion Paper 2014-20. International Transport Forum. Hg. v. OECD/ ITF. Paris. Online verfügbar unter <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dp201420.pdf>.

MELUND (2013): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Kiel. Online verfügbar unter: <https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestenschutz/Downloads/Generalplan.pdf?blob=publicationFile&v=1>.

MLUV (2009): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Übersichtsheft. Grundlagen, Grundsätze, Standortbestimmung und Ausblick. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin. Online verfügbar unter: <https://www.stalu-mv.de/serviceassistent/download?id=1639581>.

Naya Olmer; Bryan Comer; Biswajoy Roy; Xiaoli Mao; and Dan Rutherford (2017): Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015.

Nguyen, M. N.; Wang, X.; Leicester, R. H. (2013): An assessment of climate change effects on atmospheric corrosion rates of steel structures. In: *Corrosion Engineering, Science and Technology* 48 (5), S. 359–369. DOI: 10.1179/1743278213Y.0000000087.

Nilson, E.; Astor, B.; Bergmann, L.; Fischer, H.; Fleischer, C.; Hämmerle, M. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktes Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin.

NLWKN (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/ Bremen. Festland. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. Norden. Online verfügbar unter: https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/22925/Generalplan_Kuestenschutz_Niedersachsen_Bremen_Teil_1_-_Festland.pdf.

- Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R.; Bergmann, L.; Forbriger, M.; Hänsel, S. et al. (2020): Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrssystems an den Klimawandel. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.
- OCIMF (2009): Mooring equipment guidelines. MEG3. 3rd. ed., repr. Livingston: Witherby Seamanship Int.
- OECD/ ITF (2017): ITF Transport Outlook 2017. OECD Publishing, Paris. Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/transport/itf-transport-outlook-2017_9789282108000-en.
- Pacala, S.; Socolow, R. (2004): Stabilization wedges. Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. In: *Science (New York, N. Y.)* 305 (5686), S. 968–972. DOI: 10.1126/science.1100103.
- PIANC (1995): Criteria for movements of moored ships in harbours. Report of Working Group 24 of the Permanent Technical Committee II. Brussels: PIANC (Bulletin, 88 Suppl).
- PIANC (2015): Design and maintenance of container terminal pavements. Bruxelles, Belgique: PIANC (PIANC report, no 165).
- PIANC (2020): Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. EnviCom WG Report No.178. Brüssel, Belgien.: PIANC Secrétariat Général. Online verfügbar unter <https://www.pianc.org/publications/envicom/wg178>.
- Pinto, J. G.; Reyers, M. (2017): Winde und Zyklonen. In: G. P. Brasseur, D. Jacob und S. Schuck-Zöller (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Půčik, T.; Groenemeijer, P.; Rädler, A. T.; Tijssen, L.; Nikulin, G.; Prein, A. F. et al. (2017): Future Changes in European Severe Convection Environments in a Regional Climate Model Ensemble. In: *J. Climate* 30 (17), S. 6771–6794. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0777.1.
- Rauthe, M.; Brendel, C.; Helms, M.; Lohrengel, A.-F.; Meine, I.; Nilson, E. et al. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassererfahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04.
- Reinhold, F. (1940): Regenspenden in Deutschland. Grundwerte für die Entwässerungstechnik. GE 1940. Berlin (56).
- RAS-Ew, 2005: Richtlinien für die Anlagen von Straßen Teil: Entwässerung.
- Rotterdam Office for Sustainability and Climate Change (2013): Rotterdam - Climate Change Adaptation Strategy. Hg. v. Rotterdam Climate Initiative, Climate Proof. City of Rotterdam. Online verfügbar unter http://www.urbanisten.nl/wp/wp-content/uploads/UB_RAS_EN_lr.pdf.
- Saha, M.; Eckelman, M. J. (2014): Urban scale mapping of concrete degradation from projected climate change. In: *Urban Climate* 9, S. 101–114. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.07.007.
- Schmelzer, N.; Holfort, J. (2012): Klimatologischer Eisatlas. für die westliche und südliche Ostsee. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hamburg und Rostock.
- Schmelzer, N.; Holfort, J.; Loewe, P. (2015): Klimatologischer Eisatlas für die Deutsche Bucht (mit Limfjord). (1961 - 2010) ; digitaler Anhang: Eisverhältnisse in 30-jährigen Zeiträumen 1961 - 1990, 1971 - 2000, 1981 - 2010 ; Eisverhältnisse in mäßigen und starken Eiswintern. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Hamburg, Rostock.

- Schröder, A.; Hirschfeld, J.; Fritz, S. (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutschen Ostseehäfen. Ergebnisse einer Befragung der Hafenbehörden. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr. 23).
- Schrum, C.; Lowe, J.; Meier, H. E. M.; Grabemann, I.; Holt, J.; Mathis, M. et al. (2016): Projected Change—North Sea. In: F. Colijn und M. Quante (Hg.): North Sea Region Climate Change Assessment. Regional Climate Studies. Cham: Springer, S. 175–217.
- Seiffert, R.; Hesser, F.; Büscher, A.; Fricke, B.; Holzwarth, I.; Rudolph, E. et al. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekte 2.04/ 3.02 (KLIWAS Schriftenreihe, 36/2014).
- Siefer, T.; Schütze, C.; Strohbach, M. (2018): Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels. Teil A, Los 1 - Infrastruktur. EBA-Forschungsbericht 2018-08. Hg. v. Eisenbahn-Bundesamt. Bonn.
- Smith, T.; Raucci, C.; Haji Hosseinloo, S.; Calleya, J.; Suarez de la Fuente, S.; Wu, P.; Palmer, K. (2016): CO₂ Emissions from International Shipping. Possible reduction target and their associated pathways. Hg. v. UMAS. London. Online verfügbar unter <https://umas.co.uk/LinkClick.aspx?fileticket=na3ZeJ8Vp1Y%3D&portalid=0>.
- Spektrum (2020): Wie ein Klimamodell entsteht. Online verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/news/simulationen-wie-ein-klimamodell-entsteht/1781331>.
- Standards Australia AS 5334-2013, 2013: Climate Change Adaptation for Settlements and Infrastructure – A Risk Based Approach. Online verfügbar unter https://infostore.saiglobal.com/en-gb/standards/as-5334-2013-119943_SAIG_AS_AS_251367/.
- Stock, B. (2015): Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/DL_02_2015.pdf;jsessionid=3757121DF61A7712BFCACE37E09F6F8E.live11314?_blob=publicationFile&v=1.
- Thoresen, C. A. (2018): Port designer's handbook. Fourth edition. London: ICE Publishing.
- Thoresen, Carl A. (2010): Port designer's handbook. 2. ed. London: Telford.
- TT Club (2009): WindStorm II. Practical risk management guidance for marine & inland terminals. London. Online verfügbar unter <https://www.ttclub.com/-/media/files/tt-club/risk-management-guides/windstorm-ii---practical-guidance-for-marine-and-inland-terminals.pdf>.
- United Nations Conference on Trade and Development (1985): Port development. A handbook for planners in developing countries. 2nd ed. rev. and expanded. New York: United Nations.
- van den Bos, W. (2005): Wind influence on container handling, equipment and stacking. In: *Port Technology International* (29).
- van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K. et al. (2011): The representative concentration pathways. An overview. In: *Climatic Change* 109 (1-2), S. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

- Vautard, R.; van Aalst, M.; Boucher, O.; Drouin, A.; Haustein, K.; Kreienkamp, F. et al. (2020): Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. In: *Environ. Res. Lett.* 15 (9), S. 94077. DOI: 10.1088/1748-9326/aba3d4.
- Wahl, T.; Jensen, J.; Frank, T.; Haigh, I. D. (2011): Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. In: *Ocean Dynamics* 61 (5), S. 701–715. DOI: 10.1007/s10236-011-0383-x.
- Weisse, R.; Günther, H. (2007): Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958–2002. In: *Ocean Dynamics* 57 (3), S. 161–172. DOI: 10.1007/s10236-006-0094-x.
- Weißer, R.; Meinke, I. (2017): Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: G. P. Brasseur, D. Jacob und S. Schuck-Zöller (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Weisse, R.; Plüß, A. (2006): Storm-related sea level variations along the North Sea coast as simulated by a high-resolution model 1958–2002. In: *Ocean Dynamics* 56 (1), S. 16–25. DOI: 10.1007/s10236-005-0037-y.
- Weisse, R.; von Storch, H.; Niemeier, H. D.; Knaack, H. (2012): Changing North Sea storm surge climate. An increasing hazard? In: *Ocean & Coastal Management* 68, S. 58–68. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2011.09.005.
- Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S.; Naumann, T.; Nikolowski, J. (2016): Baukonstruktion im Klimawandel. DOI: 10.1007/978-3-658-13011-4.
- Wellner, F.; Kayser, S.; Clauß, M. (2017): Projizierter Klimawandel und Dimensionierung von Straßenbefestigungen. Bremen: Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1128 (2017)).
- Wenzel, H.; Treptow, N. (2013): Anpassungsstrategie an den Klimawandel für die zukünftige Entwicklung der öffentlichen Lübecker Häfen. Teil 1: Zukunftsszenarien und Klimarisiken. Rostock (RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr: 20).
- Wenzel, H.; Treptow, N. (2014): Anpassungsstrategie an den Klimawandel für die zukünftige Entwicklung der öffentlichen Lübecker Häfen. Teil 2: Eine monetäre Bewertung. Rostock (RADOST-Berichtsreihe, Bericht Nr: 28).
- West, J. M.; Brereton, D. (2013): Climate change adaptation in industry and business. A framework for best practice in financial risk assessment, governance and disclosure. Final report. Gold Coast, Queensland: National Climate Change Adaptation Research Facility. Online verfügbar unter https://nccarf.edu.au/wp-content/uploads/2019/03/West_2013_Climate_change_adaptation_industry_and_business.pdf.
- Wiegel, R. L. (1964): Oceanographical Engineering. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Winkel, N.; Rasquin, C.; Rudolph, E.; Seiffert, R.; Wachler, B. (2020): FuE-Abschlussbericht Expertennetzwerk: Küste. B3955.03.04.70236. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau. Hamburg. Online verfügbar unter <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/107128>.
- Worldoceanreview (2020): WOR 1 Mit den Meeren leben - ein Bericht über den Zustand der Weltmeere. Klimasystem der Erde. Online verfügbar unter: <https://worldoceanreview.com/de/wor-1/klimasystem/klimasystem-der-erde/>.

Young, I. R.; Ribal, A. (2019): Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. In: *Science (New York, N. Y.)* 364 (6440), S. 548–552. DOI: 10.1126/science.aav9527.

ZDS (2017): Umwelt- und Klimaschutz in den deutschen Seehäfen. Maßnahmen und Forderungen der deutschen Seehafenbetriebe. Zentralverband der deutschen Seehafenbetriebe e.V. Online verfügbar unter <https://www.zds-seehaefen.de/wp-content/uploads/2017/01/2017-01-05-ZDS-Positionspapier-Umwelt-und-Klimaschutz-in-den-deutschen-See%C3%A4fen.pdf>.