

Klimaänderung und Seehäfen – Einflüsse und Anpassungsmaßnahmen

Bärbel Koppe¹, Wolfgang Hurtienne²

1. Einleitung

Technische Infrastrukturen können durch Klimawandel erheblich und nachhaltig beeinträchtigt werden. Die mit dem Klimawandel verbundenen Auswirkungen werden voraussichtlich räumlich und zeitlich ausgedehnt sein und kostenintensive Investitionen erforderlich machen.

Bereits heute werden global und regional signifikante Klimaänderungen beobachtet und eine weitere Zunahme der Veränderungen wird mittel- und langfristig erwartet. Aus diesem Grund sollten Seehäfen die Anpassung von Schutzbauwerken, Terminals, Hinterlandanbindungen und anderen Infrastrukturen sowie Hochbauten und Umschlagsgeräten an örtlich zu erwartende Klimaänderungen so früh wie möglich in ihre Planungen einschließen.

Das Technical Committee Port Planning and Development der International Association of Ports and Harbors (IAPH) plant im Jahr 2011 die Herausgabe eines Leitfadens für Anpassungsmaßnahmen von Seehäfen an den Klimawandel, deren Grundlagen von den Autoren des vorliegenden Beitrags erarbeitet wurden. Der Leitfaden soll Hafenverwaltungen, Hafenplanern und Terminalbetreibern dazu dienen, relevante Einflüsse des Klimawandels auf den Bau und Betrieb von Seehäfen zu erkennen und entsprechende Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen.

2. Beobachtete und zukünftig zu erwartende Klimaänderungen

Das International Panel on Climate Change (IPCC) ist die führende wissenschaftliche Organisation zur Abschätzung des Klimawandels, gegründet durch das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO). Das IPCC trägt die Ergebnisse der Forschungen unterschiedlicher Disziplinen zusammen und verfasst im Abstand von fünf bis sechs Jahren Wissensstandberichte, die sogenannten IPCC Assessment Reports. Der aktuelle 4th IPCC Assessment Report wurde im Jahr 2007 veröffentlicht. Der kommende Bericht wird für das Jahr 2013 erwartet.

Die Auswertung der weltweiten Klimabeobachtungen der letzten 50 bis 100 Jahre zeigen deutliche Änderungen der globalen und regionalen Luft- und Meerwasserdurchschnittstemperatur, des Meeresspiegelanstiegs (Abb. 1) und der Niederschlagsverteilung. Darüber hinaus sind ein Rückgang der Ausdehnung des arktischen Meereises, des Gletschervolumens und der Schneebedeckung in den Bergen sowie ein Zuwachs der Tautiefe von Permafrostböden zu verzeichnen. Weitere und verstärkte Änderungen charakteristischer Klimagrößen werden für das 21. Jahrhundert erwartet. Und auch über das 21. Jahrhundert hinweg ist von einer Fortführung des Klimawandelprozesses

¹ Aquadot – Ingenieurbüro für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Hamburg

² Hamburg Port Authority; Chairman Technical Committee Port Planning and Development der International Association of Ports and Harbors (IAPH)

auszugehen, wobei die Ungenauigkeit der Prognosen bei längerer Vorhersagezeit zunimmt. (IPCC, 2007a; IPCC, 2007b)

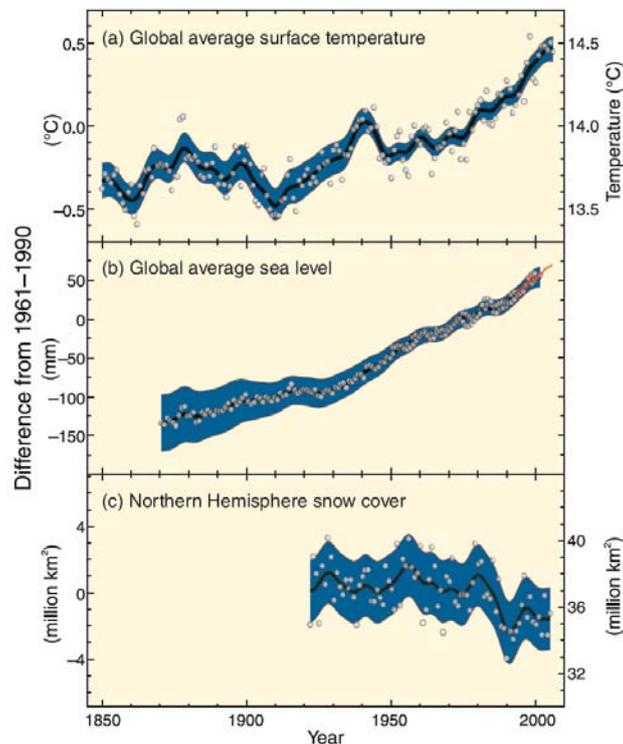


Abb. 1: Auswertung von Messdaten des zeitlichen Verlaufs der globalen Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche, des durchschnittlichen globalen Meeresspiegels sowie der Schneebedeckung der nördlichen Erdhalbkugel (IPCC, 2007b)

Die Berechnungen zum Klimawandel basieren auf Szenarien zum Ausstoß von Treibhausgasen, den sogenannten IPCC-Emissionsszenarien. Auf diesen Annahmen zum zukünftigen Ausstoß von CO₂-Äquivalenten basieren die globalen aber auch die regionalen Klimamodellrechnungen. Zudem werden bei der Berechnung regionaler Klimamodelle die Ausgangs- und Randbedingungen aus den gröber aufgelösten globalen Modellrechnungen angesetzt. In Abb. 2 sind die im aktuellen Wissensstandsbericht des IPCC angesetzten IPCC-Emissionsszenarien sowie die auf deren Basis berechneten Entwicklungen der globalen Erwärmung dargestellt.

Die Klimabeobachtungen wie auch die Modellrechnungen weisen darauf hin, dass für die Planung und den Betrieb von technischen Infrastrukturen relevante Klimaänderungen weltweit zu erwarten sind, die jedoch regional durchaus unterschiedliche Ausprägungen besitzen werden. Insofern ist es erforderlich, für Planung, Bau und Betrieb von Anlagen in Seehäfen Informationen zu den regional zu erwartenden Klimaänderungen einzuholen. Informationen zum Klimawandel im norddeutschen Raum sind z.B. in den Veröffentlichungen und auf den Internetseiten des Norddeutschen Klimabüros zu finden (NK, 2011), einer gemeinsamen Einrichtung des Helmholtz-Zentrum Geesthacht und des KlimaCampus der Universität Hamburg.

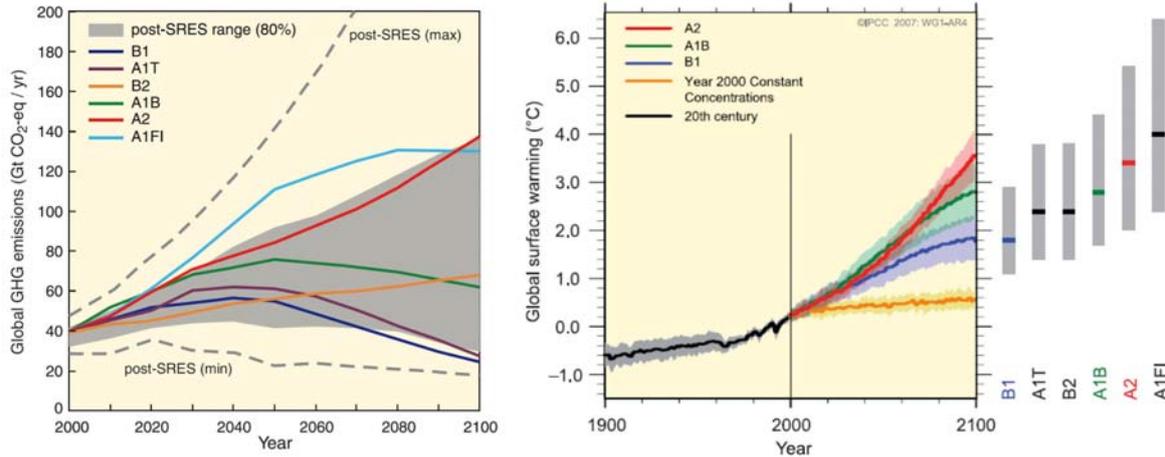


Abb. 2: Globale Treibhausgasemissionsszenarien – IPCC-Szenarien – in GtCO₂-Äquivalente pro Jahr sowie vom jeweilig angesetzten Szenario abhängige Modellergebnisse zur Entwicklung der globalen Durchschnittstemperatur (IPCC, 2007b)

3. Klimawandel und Seehäfen - Restriktionen

Schwierigkeiten bei der Einbeziehung von Aspekten des Klimawandels in Planung, Bau und Betrieb von Seehäfen sind vielfältig. Auf einige maßgebliche Aspekte wird im Folgenden kurz eingegangen.

3.1 Unterschiedliche Planungs- und Prognosehorizonte

Da die Variabilität des Klimas keine kurzen Vorhersagezeiträume zulässt, beziehen sich Szenario basierte Klimaänderungsprognosen auf Zeitspannen von Dekaden bis Jahrhunderten. Im Gegensatz dazu sind Masterpläne von Seehäfen zumeist für einen Zeitraum von höchstens 15 bis 20 Jahren ausgelegt, nicht zuletzt wegen der ebenfalls kurzen Planungshorizonte der Industrie von selten über 15 Jahren. Gemäß einer umfangreich angelegten Befragung der Stanford University zu Anpassungsmaßnahmen von Seehäfen an den Klimawandel, an der 93 Seehäfen weltweit teilnahmen, betragen die Planungshorizonte der überwiegenden Anzahl der Häfen 5 bis 10 Jahre (Becker, 2010).

Insofern liegt die Annahme nahe, dass das Thema Klimaänderung nicht einmal für die weitreichendsten Pläne in Seehäfen relevant sein könnte. Hierbei wird jedoch übersehen, dass die Planungshorizonte zumeist deutlich kürzer als die geplante Lebensdauer von Hafenanlagen sind. Hafenbezogene Infrastrukturen weisen überwiegend Lebensdauern von 30 bis 60 Jahren auf, Schutzanlagen erreichen sogar Lebensdauern von 100 oder mehr Jahren (Tab. 1). Somit müssen viele der heute geplanten und gebauten Bauwerke nicht nur den heutigen Belastungen standhalten, sondern auch denjenigen die in 20, 60 oder sogar 100 Jahren wirken werden.

Tab. 1: Planungshorizonte (grün) sowie geplante Lebensdauern von hafenbezogenen Suprastrukturen (hellblau) und Infrastrukturen (dunkelblau)

nach ¹Becker, 2010; ²BSI, 1988; ³AASHTO, 1993; ⁴ROM, 1994; ⁵Thoresen, 2003

Hafenplanung / Supra- und Infrastruktur	Planungshorizont / Lebenszeit in Jahren									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Übliche Planungshorizonte in Hafen-Masterplänen ¹										
Längste Planungshorizonte in Hafen-Masterplänen ¹										
Terminal- und Hafensuprastruktur ^{2,3}										
Straßen- und Terminalbefestigungen ^{3,4}										
Liegeplätze für spezielle industrielle Nutzer ⁵										
Offene Kaikonstruktionen, Piers ²										
Trockendocks ²										
Küstenschutzbauwerke ²										
Kaimauern ²										
Hochwasserschutzbauwerke ^{2,5}										
Wellenbrecher ⁵										

3.2 Mangel an planungsrelevanten Angaben zum Klimawandel

Modellergebnisse zum Klimawandel liegen überwiegend in globalem Modellmaßstab vor, für Planungsaufgaben werden jedoch wegen der regionalen Variabilität des Klimawandels Ergebnisse auf regionaler Ebene benötigt. Zudem ist die Aussagekraft von Klimamodellrechnungen, global wie regional, aus folgenden Gründen begrenzt:

- Als Eingabesignal werden Treibhausgasemissionsszenarien verwendet. Insofern stellen die Berechnungen im eigentlichen Sinne keine Prognosen des zukünftigen Klimaverlaufs dar, sondern es werden Klimaverlaufsszenarien erstellt, die sich aufgrund von Annahmen hinsichtlich der von vielfältigen politischen und wirtschaftlichen Faktoren abhängigen Entwicklung des Treibhausgasausstoßes ergeben.
- Klimaprozesse sind hoch komplex, interaktiv und sensibel, und die Kenntnis ihrer physikalischen Grundlagen ist häufig nicht vollständig. Insofern sind viele, hierunter auch maßgebende, physikalische Prozesse nicht in den Berechnungsmodellen erfasst und entsprechend unscharf sind die Berechnungsergebnisse.

Der Meeresspiegelanstieg beispielsweise ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, wie (IPCC, 2010):

- Thermische Ausdehnung des Meeres
- Schmelze von Gletschern und kleinen Eiskappen
- Schmelze von Eismassen in Grönland und der Antarktis
- Veränderungen der Meeresströmungen
- Änderungen des auf dem Land gebundenen Wasservolumens

Viele mit diesen Faktoren in Verbindung stehende Größen sind messtechnisch nur grob erfasst, wie der Wärmeinhalt der tieferen Meeresbereiche oder auch die bezüglich der Schmelzprozesse des Polareises wichtigen Größen Fjord-Bathymetrie, Sohlentopographie, Sohlenstruktur und Temperatur des angrenzenden Meerwassers (IPCC, 2010). Darüberhinaus erfassen die gängigen großen Klimamodelle keine großen Eisflächen oder Gletscher und Eiskappen (IPCC, 2010) und beziehen somit einige der für den Meeresspiegelanstieg maßgebenden Größen nicht ein.

3.3 Der Faktor des Ungewissen

Hydraulische, geotechnische und statische Prozesse sind dynamischer und stochastischer Natur und ihre Interaktion ist häufig komplex. Seit Mitte der 1990-er Jahre wurden probabilistische Methoden für den Entwurf von Bauwerken entwickelt, doch auch heute noch basiert die Bemessung von Hafenanlagen in der Praxis überwiegend auf deterministischen Verfahren. Deterministische Parameter werden nicht nur bei der Beschreibung von Lastannahmen hinsichtlich Wasserstände, Seegang und Strömungen sowie Verkehrs- und Eigenlasten angesetzt, auch wirtschaftliche und verkehrliche Prognosen werden in deterministische Parameter übertragen.

Im Gegensatz dazu enthalten Aussagen zum Klimawandel in der Regel Angaben zur Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens. Zudem ist mit der Weiterentwicklung der Mess- und Auswertetechnik von Klimadaten sowie der Modelltechnik zur Berechnung von Klimaprozessen auch auf längere Sicht von Änderungen in den Ergebnissen der Klimamodellrechnungen auszugehen.

Eine Einbeziehung des Klimawandels in Planungsprozesse bedeutet somit immer auch, dass Lastannahmen sich ändern können und dass sich Planungsprozesse flexibel an neue Informationen anpassen müssen. Insofern ist es sinnvoll, relevante Belastungsszenarien zu definieren und besonderen Wert auf anpassungsfähige und flexible Entwürfe zu legen, die auch unter geänderten Randbedingungen funktionsfähige und kostengünstige Lösungen bieten können.

3.4 Mangel an Problembewusstsein

In der bereits erwähnten Befragung der Stanford University zu Anpassungsmaßnahmen von Seehäfen an den Klimawandel (Becker, 2010) wurde unter Anderem nach den wichtigsten drei Einflüssen des Klimawandels auf den Hafenbetrieb gefragt. In Abb. 3 sind die Antworten in Form einer 'Wortwolke' wiedergegeben. Je größer die Schrifttype, desto häufiger ist der Begriff in der Befragung genannt worden. Hiernach liegt in den Seehäfen das Hauptaugenmerk auf dem Meeresspiegelanstieg, gefolgt von den Parametern Seegang, Hochwasser, Luftqualität, Sedimentation und Baggerei sowie Verschiebungen in den Märkten.



Abb. 3: Wichtigste Einflüsse des Klimawandels auf den Hafenbetrieb gemäß einer Befragung unter 93 Hafenverwaltungen weltweit – je größer die Schrifttype, desto häufiger wurde der Begriff in den Antworten genannt (Becker, 2010)

Auch wenn sich nur 34% der Befragten ausreichend über die für sie regional anzusetzenden Klimaänderungsparameter informiert fühlten, war doch der größte Teil von ihnen der Meinung, dass sie die Herausforderungen des Klimawandels in ihrem jeweiligen Hafen meistern könnten. Gemäß der Befragung haben viele Häfen bereits Maßnahmen zur Verminderung des Ausstoßes an Treibhausgasen unternommen, Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel selbst stehen jedoch noch nicht auf der Agenda. Insgesamt ist damit derzeit bei den für Planung, Bau und Betrieb von Seehäfen Zuständigen kein geschärftes Bewusstsein für die aus dem Klimawandel resultierenden Herausforderungen zu erkennen.

3.5 Finanzielle Aspekte

Die Wertschöpfung in Häfen beschränkt sich nicht allein auf die direkten wirtschaftlichen Vorteile, die insbesondere für Investitionen des Privatsektors ausschlaggebend sind, sondern auch auf die zusätzlichen indirekten Vorteile wie allgemeine Verstärkung der Handelstätigkeit, Zuwächse in den Produktionsmengen und in anderen handelsbezogenen Diensten. Der Bau und Betrieb eines Seehafens führt häufig zu einer wirtschaftlichen Umgestaltung einer ganzen Region. Diese hafenbedingten wirtschaftlichen Multiplikationseffekte sind der Hauptgrund für die direkten Investitionen der Öffentlichen Hand in Häfen. In Abhängigkeit vom Betriebsmodell werden die Investitionen vom öffentlichen oder privaten Sektor allein oder in Kooperation miteinander getätigt (Tab. 2). Langlebige Infrastrukturen wie Wellenbrecher, Schleusen und Küstenschutzanlagen sind in der Regel kostenintensiv und eine Kostendeckung kann nicht innerhalb der üblichen Laufzeiten für Kredite von bis zu 20 oder 30 Jahren erreicht werden. Aus diesem Grund sind private Investitionen in diesen Bereichen selten und öffentliche Gelder werden benötigt, die häufig unter der Annahme einer deutlichen Verbesserung der regionalen oder nationalen Wirtschaftsbedingungen getätigt werden.

Tab. 2: Öffentliche und private Verantwortlichkeiten in unterschiedlichen Betriebsmodellen von Seehäfen (World Bank, 2007)

Hafen / Aktivität	Hafenverwaltung	Nautisches Management	Nautische Infrastruktur	Hafeninfrastruktur	Suprastruktur (Ausrüstung)	Suprastruktur (Gebäude)	Umschlagsgeräte	Lotsendienste	Schlepperdienste	Festmacherservice	Baggerei	Andere Dienste
Betreiberhafen (Public Service Port)												
Autonomer Hafen (Tool Port)												
Gewerbegebietshafen (Landlord Port)												
Privathafen (Private Service Port)												
								In öffentlicher Hand		In privater Hand		

In Zeiten knapper öffentlicher Kassen ist die Finanzierung kostenintensiver Maßnahmen häufig mit Schwierigkeiten verbunden und entsprechende Investitionen müssen mit tragfähigen wirtschaftlichen und technischen Daten hinterlegt werden. Dies steht im Widerspruch zu der Tatsache, dass Angaben zu den zu erwartenden Klimaänderungen besonders auf regionaler Basis immer noch ungenau und unsicher sind. Trotzdem ist eine Berücksichtigung von möglichen Änderungen klimabedingter Belastungsgrößen

insbesondere bei Planung und Bau langlebiger Infrastrukturen wichtig und kann über längere Sicht zu bedeutenden Kosten- und Wettbewerbsvorteilen führen.

3.6 Entscheidungsprozesse in Seehäfen

Seit Beginn des Seehandels ist der Hafensektor von Veränderungen technischer, technologischer, rechtlicher und ökonomischer Art geprägt. Während der letzten Jahrzehnte stellten Globalisierung und Liberalisierung der Märkte die wichtigsten Herausforderungen der Hafenwirtschaft dar.

Mit dem erwarteten Klimawandel sind nun auch Änderungen umweltbedingter Parameter in Planung, Bau und Betrieb von Häfen einzubeziehen. In Entscheidungsprozessen zur Klimaanpassung von Seehäfen sind neben Experten der Bereiche Unternehmensstrategie, Finanzen, Investitionen und Risikomanagement, Hafenplanung und -entwicklung, Beschaffungswesen sowie Planung, Bau und Betrieb von Infra- und Suprastruktur auch externe Fachberater zur Abschätzung regional relevanter Klimaszenarien und deren Folgen für hafenrelevante naturräumliche Planungsparameter einzubeziehen. Insofern führt die Integration von Aspekten des Klimawandels in hafenbezogene Planungen zu einer Erhöhung der Komplexität von Planungs- und Entscheidungsprozessen.

4. Klimawandel und Seehäfen – Vulnerabilität

Marine Anlagen sind wegen ihrer Lage im Übergangsbereich See - Land besonders empfindlich gegen Änderungen wasserbezogener Parameter wie Mittelwasserstand, Hochwasserstände, Tideregime, Seegang, Erosion und Akkumulation von Sedimenten, wasserbürtige Immigration von Tier- und Pflanzenarten, Salzgehalt und Säuregrad des Wassers. Darüber hinaus können Seehäfen direkt durch Änderungen der Temperatur, des Niederschlags und der Windverhältnisse beeinträchtigt werden, z.B. hinsichtlich der Energiebedarfe für Kühlzwecke, der Beständigkeit von Fahrbahndecken und Terminalbelägen, der Belastung von Drainagesystemen und der Stapelhöhe von Leercontainern.

Die folgenden Beispiele erläutern den Einfluss des Klimawandels auf den Bau und Betrieb von Seehäfen:

- Schlechte Untergrundverhältnisse erfordern oftmals umfangreiche Gründungsarbeiten. Eine Verbindung zwischen dem Klima und der Tragfähigkeit des Bodens besteht insbesondere in Permafrostregionen. Hier können Tauprozesse zu schwerwiegenden Gründungsproblemen führen.
- Die Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Wasserstände kann durch einen Anstieg des mittleren Meeresspiegels erhöht werden, so dass höhere Wasserstände in der Bemessung des Hochwasserschutzes und somit der Bau kostenintensiver Hochwasserschutzanlagen auf neuen wie bestehenden Terminals und Lagerflächen sowie an Straßen- und Eisenbahnverbindungen erforderlich werden.

- Eine Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit hoher Windgeschwindigkeiten kann zu einem Anstieg der jährlichen Dauer starker Seegangbelastungen am Terminal und somit zu einer Verlängerung der Ausfallzeiten im Umschlagsbetrieb führen.

Die Anpassung von Seehäfen an den zu erwartenden Klimawandel erfordert eine sachgerechte Analyse der Sensitivität der einzelnen Hafensysteme und –anlagen für örtliche Klimaänderungsszenarien und eine Untersuchung ihrer Anpassungsmöglichkeiten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte. Allgemeine Angaben zur Empfindlichkeit von Seehäfen gegen den Klimawandel sind nicht möglich. In einigen Fällen sind bereits heute mit dem Klimawandel in Verbindung stehende Schäden eingetreten, wie Gründungsprobleme bei steigenden Tautiefen in Permafrostböden. Andere Auswirkungen des Klimawandels werden die Hafenplanung und den Hafenbetrieb in vielen Regionen erst zu einem späteren Zeitpunkt oder nie beeinflussen, weil kurz- und mittelfristig nur geringe Effekte zu erwarten sind oder die Vulnerabilität des 'Systems Seehafen' bezüglich des Trends der betrachteten Klimagröße nur gering ist.

Die Vulnerabilität eines Systems kann durch die drei Komponenten Belastung, Empfindlichkeit und Anpassungskapazität beschrieben werden. Die örtliche Belastungssituation ist anhand einer Untersuchung der regional zu erwartenden Einflüsse des Klimawandels zu definieren. Darauf folgend ist die Empfindlichkeit der einzelnen Hafenanlagen gegen die zu erwartenden Klimawandeleinflüsse zu analysieren. Nach Ermittlung der anfälligen Bereiche und Anlagen im Hafen folgt eine Untersuchung der Anpassungsmöglichkeiten im Bestand oder bei der Planung neuer Bauwerke und Betriebskonzepte.

Die folgenden Bereiche in Seehäfen können bei der Analyse unterschieden werden:

- Elementare Hafeninfrastruktur wie Zufahrtskanal, Hafeneinfahrt, Schutzbauwerke und Hinterlandanbindungen
- Operative Hafeninfrastruktur wie hafeninterne Zufahrtskanäle und Hafenbecken, Kaianlagen und hafeninterne Verkehrssysteme
- Hafenbezogene Suprastruktur wie Fahrbahndecken und Pflasterungen, Drainagesysteme, Lagerbereiche, Tankanlagen, Silos und Lagergebäude
- Hafenausrüstungen wie Umschlagsgeräte, Transport- und Lagerausrüstung

Im Folgenden wird beispielhaft auf klimabedingte Einflussfaktoren und mögliche Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel in Planung, Bau und Betrieb von Kaianlagen und Festmachedalben sowie Freilagerflächen eingegangen.

4.1 Kaianlagen und Festmachedalben

Kaimauern, Landebrücken und Dalben sind Konstruktionen die Schiffen zum Festmachen dienen und auf denen für den Ladungsumschlag entsprechende Anlagen und Geräte bereitgestellt werden. Dalben gehören generell zu den offenen Konstruktionen, wobei Kaimauern und Landebrücken als offene oder geschlossene Konstruktionen erstellt werden können. In Abb. 4 sind verschiedene Kaianlagentypen dargestellt. Zu den geschlossenen Konstruktionen gehören Schwergewichtsmauern und Spundwandbauwerke während offene Konstruktionen aus einer lastabtragenden Platte auf Stützen oder Pfählen bestehen. Der für

einen Liegeplatz zu wählende Kaianlagentyp hängt vom umzuschlagenden Gut, den Verkehrslasten, der Wassertiefe und Wellenunruhe am Liegeplatz sowie von den örtlichen Bodenverhältnissen ab. Kaianlagen weisen in der Regel eine lange Lebensdauer von 60 oder mehr Jahren auf.

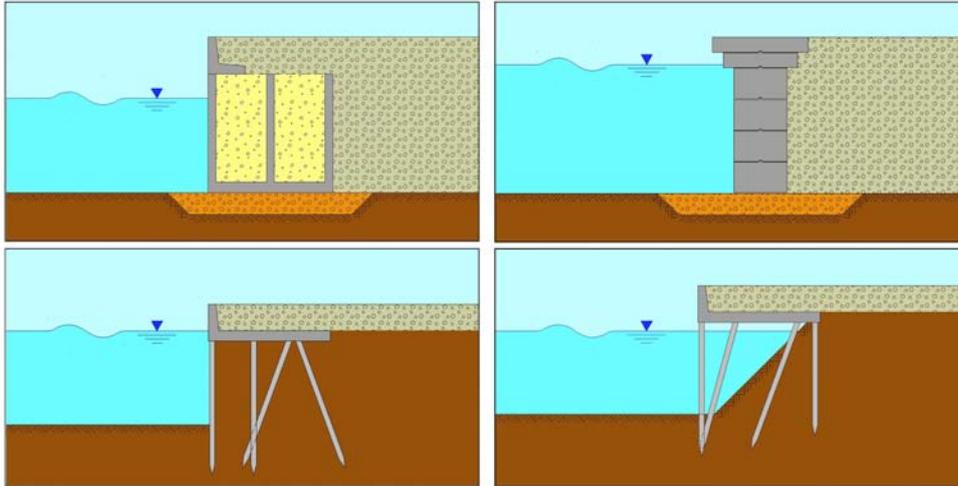


Abb. 4: Kaianlagen in Caissonbauweise, als Schwergewichtsmauer, in Spundwandbauweise oder als offene Pfahl gegründete Struktur

Die maßgeblichen Einflüsse des Klimawandels auf die Bemessung und den Betrieb von Kaianlagen sind in Tab. 3 aufgeführt. Auch wenn Änderungen des Windklimas unter Umständen einen signifikanten Einfluss insbesondere auf den Betrieb von Kaianlagen haben können, können sie wegen der aktuell noch sehr unsicheren Vorhersage möglicher dem Klimawandel geschuldeter Windveränderungen nur schwer in die konkrete Bemessung einbezogen werden. Sinnvoll kann es jedoch sein, bei der Planung von Wellenschutzanlagen für Kailiegeplätze entsprechende Änderungsszenarien in Betracht zu ziehen und dies, sofern wirtschaftlich vertretbar, auch bereits konkret in den Entwurf einzubeziehen.

Eine Größe die jedoch bereits konkret in der Planung von Kaianlagen zu berücksichtigen ist, ist der im kommenden Jahrhundert lokal zu erwartende Meeresspiegelanstieg, nicht zuletzt weil der Schutz gegen Überflutung in der Regel eine wichtige Bemessungsgröße von Kaianlagen darstellt. Sofern eine vorbeugende Erhöhung des Bauwerks als nicht wirtschaftlich angesehen wird oder aus funktionellen Gründen wie dem stufenlosen Anschluss an bestehende Flächen nicht sinnvoll ist, kann auch eine spätere Nachrüstung mit mobilen oder permanenten Hochwasserschutzwänden in Betracht gezogen werden. Entsprechende Maßnahmen sind jedoch bereits beim Bau der Anlage in Variantenvergleichen zu entwickeln und zu bewerten und die zu erwartenden erhöhten Lasten sind in der Bemessung der zu erstellenden Tragkonstruktion zu berücksichtigen, so dass eine spätere Nachrüstung einfach und kostengünstig ermöglicht wird.

Tab. 3: Einflüsse des Klimawandels auf Entwurf und Unterhaltung von Kaianlagen und Festmachedalben

Einfluss des Klimawandels	Chancen	Risiken
Anstieg der jährlichen Luftdurchschnittstemperatur		Erhöhung der Tautiefe von Permafrostböden und daraus resultierend Gründungsprobleme
Anstieg der jährlichen Wasserdurchschnittstemperatur		Anstieg der mikrobiellen Aktivität und somit Anstieg der mikrobiellen Korrosion in der Wasserwechselzone von Spundwänden Einwanderung neuer Arten, die potentiell zu höheren Alterungsraten von Holzelementen wie Dalben führen können
Abnahme der Anzahl der Tage mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt	Verringerung der Eislasten	
Anstieg der minimalen Lufttemperatur	Verringerung der Eislasten	
Anstieg der jährlichen Niederschlagsmenge		Anstieg des Grundwasserstands und somit Anstieg des aktiven Erddrucks an geschlossenen Konstruktionen
Anstieg der Häufigkeit von Sturmereignissen		Anstieg der Anzahl an Flutereignissen am Liegeplatz und folglich Anstieg der betrieblichen Ausfallzeit
Anstieg der Sturmintensität		Anstieg der Höhe von Sturmhochwasserständen am Liegeplatz und somit Anstieg der betrieblichen Ausfallzeit infolge Überflutung des Liegeplatzes
Intensivierung des Wellenklimas infolge höherer Windgeschwindigkeiten		Anstieg der Wellenunruhe am Liegeplatz und somit Anstieg der betrieblichen Ausfallzeit
Änderungen des Anlaufwinkels von Wellen infolge einer Änderung der Windrichtungsverteilung	Potentielle Verringerung der Stundenzahl mit kritischer Wellenunruhe am Anleger und somit Verringerung der betrieblichen Ausfallzeit	Potentieller Anstieg der Stundenzahl mit kritischer Wellenunruhe am Anleger und somit Anstieg der betrieblichen Ausfallzeit
Windabhängige Änderungen des Wasserstands infolge Änderungen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtungsverteilung	Potentiell geringeres Überflutungsrisiko am Anleger	Potentiell höheres Überflutungsrisiko am Anleger
Anstieg des Wasserspiegels als direkte Folge eines Meeresspiegelanstiegs		Erhöhung des Überflutungsrisikos und somit Anstieg der betrieblichen Ausfallzeit und der potentiellen Überflutungsschäden
Anstieg des Salzgehaltes		Anstieg der Korrosionsrate von Stahl- und Betonelementen wie Spundwandkonstruktionen und Schwergewichtsmauern
Verringerung des Salzgehaltes	Verringerung der Korrosionsrate von Stahl- und Betonelementen wie Spundwandkonstruktionen und Schwergewichtsmauern	
Versäuerung		Anstieg der Korrosionsrate von Stahl- und Betonelementen wie Spundwandkonstruktionen und Schwergewichtsmauern

4.2 Freilagerflächen

Wasserbeständige Güter wie Kohle, Erz, Holz und Kies sowie Container und teilweise PKWs und Nutzfahrzeuge werden in Seehäfen unter freiem Himmel gelagert (Abb. 5). Die Freilager sind mit Oberflächenbefestigungen, Drainagesystemen und teilweise mit Stützmauern zum Lagern von Schüttgütern versehen. Auch wenn die Waren resistent gegen atmosphärische Belastungen sind, können extreme Hitze, Niederschläge und Windgeschwindigkeiten Probleme bereiten. Änderungen der mittleren Witterungsbedingungen können zudem die Lagerbedingungen beeinflussen. Die Luftfeuchtigkeit spielt zum Beispiel bei der Lufttrocknung von Holz eine Rolle und höhere mittlere Lufttemperaturen erfordern größere Energiemengen beim Betreiben von Kühlcontainern. Die wichtigsten Klimaeinflüsse auf Freilagerflächen sind in Tab. 4 aufgeführt.

Tab. 4: Einflüsse des Klimawandels auf Entwurf und Unterhaltung von Freilagern

Einfluss des Klimawandels	Chancen	Risiken
Anstieg der jährlichen Luftdurchschnittstemperatur	Potentiell bessere Bedingungen für die Lufttrocknung von Holz	Höherer Energieverbrauch von Kühlcontainern Einwanderung neuer Arten die potentiell zu Schädigungen an Lagerholz führen können Erhöhung der Tautiefe von Permafrostböden und daraus resultierend Gründungs- und Setzungsprobleme
Anstieg der maximalen Lufttemperatur		Höherer Energieverbrauch von Kühlcontainern
Abnahme der Tagesanzahl mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt	Weniger Schnee und Eis auf den Lagerflächen und somit bessere Verkehrsbedingungen auf den Lagerflächen	Höherer Energieverbrauch von Kühlcontainern Erhöhung der Tautiefe von Permafrostböden und daraus resultierend Gründungs- und Setzungsprobleme
Anstieg der jährlichen Niederschlagsmenge		Längere Lagerzeiten für die Lufttrocknung von Holz
Abnahme der jährlichen Niederschlagsmenge	Kürzere Lagerzeiten für die Lufttrocknung von Holz	
Anstieg der Starkregenintensität		Anstieg des Risikos von Drainageausfällen und somit der Überflutungsgefahr auf Lagerflächen
Anstieg der Intensität von Hagelschauern		Anstieg des Schadensrisikos in Freilagern für Fahrzeuge
Anstieg der Sturmintensität		Anstieg der Gefahr des 'Verwehens' von Gütern im Freilager; dies betrifft nicht nur Schüttgüter sondern auch Container, insbesondere Leercontainer (Gegenmaßnahme Reduzierung der Stapelhöhe)



Abb. 5: Freilagerflächen im Hamburger Hafen (Fotos: M.W. Jürgens, Hamburg)

5. Zusammenfassung

Wegen ihrer Lage im Übergangsbereich zwischen Land und Meer können Seehäfen in besonderer Weise von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein. Zur Gewährleistung einer langfristig tragfähigen Kostenentwicklung bei Investitionen in und im Betrieb von Seehäfen ist es wichtig, dass die erwarteten Prozesse und Einflüsse des Klimawandels von Hafenplanern, Hafenverwaltungen, Terminal- und Anlagebetreibern verstanden und in ihren Planungen adäquat berücksichtigt werden.

Bei der Bewertung von Einflüssen des Klimawandels und deren Einbeziehung in Prozessen in Seehäfen bestehen vielfältige Restriktionen, wie unterschiedliche Planungs- und Prognosehorizonte, Mangel an planungsrelevanten Informationen zum Klimawandel, Umgang mit Unsicherheiten, Mangel an Problembewusstsein, finanzielle Engpässe und komplexe Entscheidungsprozesse. Um trotz dieser Widrigkeiten eine sinnvolle Berücksichtigung relevanter Klimawandeleinflüsse zu erzielen, ist eine dreistufige Vorgehensweise angeraten:

1. Analyse der am betrachteten Hafenstandort zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels und Definition maßgebender Änderungsszenarien verschiedener klimatischer, hydraulischer, sedimentologischer und geotechnischer Parameter
2. Analyse der Empfindlichkeit der einzelnen Anlagen des betrachteten Hafens gegen die definierten Einflüsse des Klimawandels
3. Analyse von Anpassungsmöglichkeiten von gegen Auswirkungen des Klimawandels empfindlicher Hafenanlagen unter Berücksichtigung technischer, zeitlicher und wirtschaftlicher Aspekte

Auf der Basis dieses Vorgehens können angemessene, kostengünstige und nachhaltige Anpassungsmethoden an den Klimawandel entwickelt und erfolgreich in Planung, Bau und Betrieb von Seehäfen eingeführt werden.

Danksagung

Die Arbeiten an der dem vorliegenden Beitrag zugrunde liegenden Studie 'Seaports and Climate Change – Impacts and Adaptation Measures' wurden fachlich begleitet vom Technical Committee Port Planning and Development der International Association of Ports and Harbors (IAPH). Die Autoren bedanken sich für die fachliche Unterstützung.

Schrifttum

- AASHTO, 1993: Guidelines for pavement design. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Virginia Department of Transportation, Pavement Design and Evaluation Section.
- Becker, A., 2010: Impacts of climate change on seaports: A survey of knowledge, perceptions, and planning efforts among port administrations. Stanford University.
- BSI, 1988: Maritime Structures, BS 6349, British Standards Institution (BSI), London.
- IPCC, 2010: Workshop Report: IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice sheet Instabilities [Stocker, Th., Dahe, Q., Plattner, G.K.; Tignor, M.; Allen, S.; Midgley, P. (Hrsg.)]. Kuala Lumpur, Malaysia, 21. – 24. Juni 2010. WGI Technical Support Unit, c/o University of Bern.
- IPCC, 2007a: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Dahe, Q.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B. ; Tignor, M.; Miller, H.L. (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 Seiten.
- IPCC, 2007b: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Hrsg.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 Seiten.
- NK, 2011: Informationen auf der Internetseite des Norddeutschen Klimabüros: <http://www.norddeutsches-klimabuero.de>.
- ROM, 1994: Guidelines for the design and construction of port pavements (ROM 4.1). Recommendation for Maritime Works (ROM), Puertos del Estado, Madrid.
- Thoresen, C.A., 2003: Port designer's handbook – recommendations and guidelines. Thomas Telford Books, London.
- World Bank, 2007: Port Reform Toolkit, second edition. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Washington.