

Die deutsche Nordseeküste und der Klimawandel

Hans von Storch, Julika Doerffer, Insa Meinke

erschienen in: Hamburger Symposium Geographie, Band 1, Hamburg 2009: 9-22

Küstenregionen sind von Natur aus dynamische Systeme, in denen Veränderungen ein stetiger, natürlicher Prozess sind. Sie zählen zu den wichtigsten Lebensräumen der Menschheit und schon immer hat sich der Mensch hier den Veränderungen angepasst. Zu diesen Veränderungen zählt auch der Klimawandel und daraus resultierende Folgen für Ozeane und Küsten. Der Klimawandel ist jedoch kein neues Phänomen, denn das Klima verändert sich stetig auf Grund natürlicher Ursachen. Analysiert man das Wetter über längere Zeiträume (Jahrzehnte), erhält man Auskunft über das Klima und seine Änderungen.

Seit Beginn der Industrialisierung wirkt sich die Freisetzung von Treibhausgasen durch den Menschen zusätzlich auf das Klima aus. Der Klimawandel prägt sich regional unterschiedlich aus. Auf die regionale Ausprägung von vergangenen und möglichen zukünftigen Klimaänderungen in Norddeutschland soll im Folgenden eingegangen werden. Dabei liegen die Schwerpunkte auf der Methodik zur Beschreibung des vergangenen Klimas und zur Projektion eines sich in Zukunft ändernden Klimas und den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen zum regionalen Klimawandel in Norddeutschland.

1. Bisherige Klimaänderungen

1.1 Methoden zur Bestimmung bisheriger Klimaänderungen

Wetterdaten sind seit den letzten 150 Jahren systematisch mit Wetter- und Messstationen an vielen Orten auf der Erde aufgezeichnet worden. Aus den Anfangszeiten dieser instrumentellen Messungen gibt es jedoch nur in Ausnahmefällen homogene Daten. Sie sind meistens stark von der direkten veränderlichen Umwelt beeinflusst, so dass unterschiedliche Messungen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten nicht zwingend eine Veränderung beschreiben, sondern auf Änderungen im Umfeld oder auf eine Änderung in der Messmethode zurückzuführen sein können. An Messstationen werden deshalb hohe An-

forderungen gestellt, wie die Homogenität der Messreihen oder die Repräsentanz der Station für die weitere Umgebung.

Aus den über einen relativ langen Zeitraum erfassten Messgrößen wie der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, dem Niederschlag, der Windrichtung und -geschwindigkeit, dem Luftdruck etc. wird die Statistik des Wetters abgeleitet – das Klima. Der „relativ lange Zeitraum“ ist von der Weltorganisation für Meteorologie als Referenzzeitraum von 30 Jahren festgelegt. Die festgelegten Intervalle sind die schon abgeschlossenen Zeiträume von 1931 bis 1960 und 1961 bis 1990, sowie die derzeitige Periode von 1991 bis 2020. Sie dienen vor allem der Vergleichbar-

keit der klimatischen Größen untereinander.

Neben den instrumentellen Messungen bieten sich zusätzlich andere Aufzeichnungen als nützliche Klimaindikatoren an, wie z.B. historische Aufzeichnungen oder Tagebücher mit Ernteerträgen, Reparaturkosten für Deiche oder die Anzahl eisfreier Tage von Seen und Flüssen. Solche indirekten Klimaindikatoren werden als Proxydaten bezeichnet. Klimaproxy können zur Rekonstruktion des Klimas der Vergangenheit herangezogen werden und dienen als Informationsgrundlage für Zeiträume in denen noch keine oder nur eingeschränkte instrumentelle Messungen existierten. Schätzungen über weiter zurückliegende Änderungen des Klimas können auch über Proxydaten aus natürlichen „Klimaarchiven“ gemacht werden. Trends über mehrere Jahrhunderte können beispielsweise aus dem Rückzug von Gletschern oder aus Bohrkernen abgeleitet werden. Aus Baumringen, marinen, limnischen und terrestrischen Sedimenten oder Korallen können zudem saisonale Klimaschwankungen gewonnen werden und somit sind sie auch für einzelne Jahreszeiten repräsentativ.

Ein wichtiges Instrument der Vergangenheitsanalyse sind Eisbohrkerne, die vor allem aus Landeischilden in Grönland oder der Antarktis gewonnen werden. Seit Jahrtausenden lagern sich hier Schneeschichten übereinander die anhand verschiedener Parameter Informationen über das vergangene Klima bereitstellen. Eine aufschlussreiche Quelle sind Isotopenanalysen. Aus dem Verhältnis der Sauerstoff-Isotope 16 und 18 lässt sich näherungsweise die Temperatur zum Zeitpunkt des Schneefalls bestimmen. Der Staubgehalt und die Gaszusammensetzung in den winzigen Luftbläschen geben Auskunft über die damalige Atmosphäre. Die Ergebnisse solcher Analysen zeigen einen deutlichen Zusammenhang: Tiefe Temperaturen korrespondieren mit einem niedrigeren Anteil an den Treibhausgasen Kohlendioxid und Methan (Abb. 1). Ein weiteres sehr nützliches Klimaarchiv sind

fossile Pollen. Durch Pollenanalysen lassen sich Vegetationstypen bestimmen die Rückschlüsse auf das Klima der Vergangenheit zulassen. Die Aussagekraft von Pollenanalysen reicht jedoch nur bis zu einem Zeitraum von etwa 10.000 Jahren zurück.

Insgesamt sind jedoch die Aussagen, die sich mit Hilfe der Proxydaten treffen lassen, mit großen Unsicherheiten behaftet und erst das Zusammentragen aller verfügbaren instrumentellen und historischen Aufzeichnungen erlaubt einigermaßen gesicherte Aussagen. Im Allgemeinen steigen die Unsicherheiten für weiter zurückliegende Zeiten an.

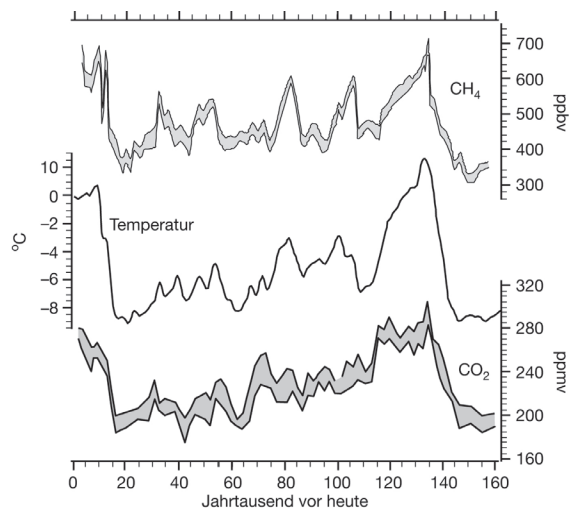


Abb. 1: Rekonstruierte Zeitreihen für Temperatur, Kohlendioxid- und Methankonzentration über die letzten 160.000 Jahre aus dem Vostok-Eisbohrkern (Antarktis) (aus von Storch et al. 1999).

1.2 Globaler Klimawandel der Vergangenheit

Das Klimasystem ist ständigen Änderungen unterworfen. Im zyklischen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten verändert sich das Eis-Wasser-Verhältnis der Erde. Die in den Kaltzeiten anwachsende Eismassen und Eisschilde führten weltweit zu einem Absinken des Meeresspiegels (Regression). Umgekehrt schmolz das Inlandeis in den Warmzeiten, was einen Anstieg des Meeresspiegels (Transgression) bzw. der Meeres-

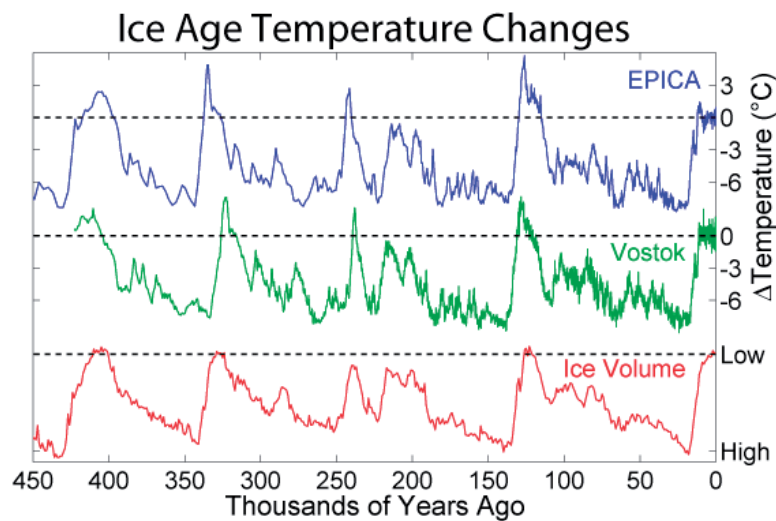


Abb. 2: Die beiden oberen Kurven der Abbildung zeigen die Änderung der geschätzten Temperatur an zwei Stellen in der Antarktis während der Glaziale/Interglaziale des Quartärs und als Vergleich in der unteren Kurve das geschätzte Anwachsen und Abschmelzen der globalen Eismassen. An den Kurven lässt sich eindeutig die hohe Korrelation von Temperaturänderungen in der Antarktis und dem Volumen der globalen Eismassen und damit dem Meeresspiegel ablesen (Abbildung erstellt von Robert A. Rohde / www.globalwarmingart.com).

spiegel-Hochstände zur Folge hatte (Streif 2002) (Abb. 2).

Auf dem Höhepunkt der letzten Warmzeit (vor etwa 125.000 Jahren) lag der mittlere globale Meeresspiegel wahrscheinlich 4-6 Meter höher als heute. Eisbohrkerndaten deuten darauf hin, dass die durchschnittlichen polaren Temperaturen zu dieser Zeit aufgrund von Abweichungen der Erdbahnparameter um 3 bis 5 °C höher lagen als heute. Ein Anstieg des Meeresspiegels war die physikalische Folge einer solchen Erwärmung. Zum einen nimmt das Volumen des Meerwassers durch seine Erwärmung zu, da Wasser sich durch Erwärmung ausdehnt und zum anderen nimmt die Wassermenge in den Weltmeeren insgesamt zu, vor allem durch das Abschmelzen der Eismassen auf Land. Auf dem Höhepunkt der letzten Kaltzeit hingegen, vor etwa 20.000 Jahren, lag die mittlere globale Temperatur 4 bis 7 °C tiefer als heute und der Meeresspiegel lag 120 m unter dem heutigen. Diese Beispiele machen deutlich, dass Temperaturänderungen in der Erdgeschichte in der

Regel mit großen Meeresspiegelschwankungen einhergingen.

Änderungen des Meeresspiegels zeigen sich in ihrer räumlichen Verteilung jedoch sehr unterschiedlich, weil regional unterschiedliche Erwärmung, eng verknüpft mit Veränderungen der Meeresströmungen die Neigung der Meeresoberfläche beeinflusst. Zudem hebt und senkt sich das Land an manchen Küsten (Landerer et al. 2007, IPCC 2007).

Seit etwa 11.000 Jahren befinden wir uns im Holozän, der jüngsten Warmphase des seit 2 bis 3 Millionen Jahren andauernden quartären Eiszeitalters. Auch in dieser Warmphase änderte sich das Klima und aus zahlreichen Aufzeichnungen und Untersuchungen von Eisbohrkernen lassen sich kältere und wärmere Epochen ablesen. So war es vor rund 1. 000 Jahren vermutlich ähnlich warm wie heute (mittelalterliches Optimum), gefolgt von der „Kleinen Eiszeit“, die um 1600 bis 1700 mit Werten um 0,6 °C unter dem heutigen Niveau ihren Tiefpunkt erreichte (Schönwiese 2008). Die Verursachung

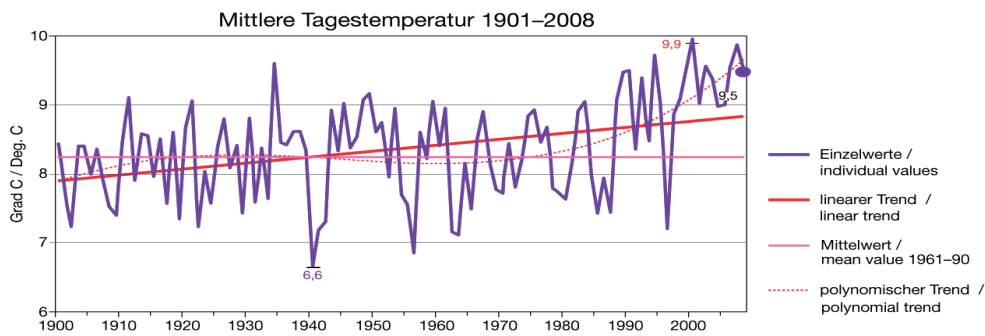


Abb. 3: Jahresmitteltemperatur in Deutschland 1901-2008. Es gab zwar schon immer Schwankungen, es lässt sich jedoch erkennen, dass die letzten 15 Jahre überdurchschnittlich warm waren. Vor allem aber ist der jüngste Anstieg seit etwa 1970 stärker als jemals vorher in der Datenreihe / nach Deutscher Wetterdienst, 2009).

der Klimaschwankungen jener Zeit ist noch ungenügend geklärt, obwohl der Sonnenaktivität und dem Vulkanismus dabei vermutlich hervor gehobene Bedeutung zukommt (IPCC 2007).

Trotz des Wechsels zwischen kälteren und wärmeren Phasen gilt das Klima des Holozäns insgesamt als recht stabil. Mit der Erwärmung gegen Ende der vorhergehenden Eiszeit setzten das endgültige Abschmelzen der großen Eisschilde und ein Meeresspiegelanstieg ein, der mit kurzen Unterbrechungen bis heute andauert. Dadurch wurde auch die Küstenlinie der Nordsee verändert und etwa 600 km landwärts und höher geschoben, bis vor 7.500 Jahren erste Brackwasserüberflutungen das Vorfeld der heutigen Inseln und Halligen erreichten. Mit dem weiteren Anstieg des Meeresspiegels versanken weite Teile der Geestlandschaft, gleichzeitig entstanden neue Landschaftselemente – die heutigen Inseln, Watten und Marschen (Streif 2002).

1.3 Bisherige Klimaänderungen in Norddeutschland

Langjährige Reihen der Wetteraufzeichnungen zeigen, dass sich das Klima in Deutschland ändert. Wie im weltweiten Durchschnitt waren auch in Deutschland die 1990er Jahre das wärmste Jahrzehnt im 20. Jahrhundert. Allerdings verlief die Erwärmung während des 20. Jahrhunderts nicht linear (Abb. 3). Einer starken

Erwärmung bis 1911 folgte eine wechselhafte Periode. Die 1940er Jahre waren außergewöhnlich warm. Nach einer erneuten Abkühlung ist seit Ende der 1970er Jahre ein kontinuierlicher und rapider Anstieg zu beobachten. Insgesamt hat die Jahresmitteltemperatur in den letzten 100 Jahren je nach Region zwischen 0 und 2,3 °C zugenommen, wobei sich vor allem die winterliche Erwärmung verstärkt hat, gefolgt von Frühling und Sommer. Der durchschnittliche Wert für Deutschland von etwa 1,2 °C liegt damit deutlich über der durchschnittlichen globalen Erwärmung von 0,8 °C (Zebisch et al. 2005, Gerstengarbe und Werner 2007, Schönwiese 2007).

Die Temperaturen sind im letzten Jahrhundert auch in Norddeutschland gestiegen. Dabei liegt Hamburg mit einer Zunahme von etwa 1,1 °C über dem globalen Mittel. Hier ist sicherlich ein städtischer Wärmeinseleffekt mit zu berücksichtigen. Doch auch das ländlich geprägte Niedersachsen liegt mit 1 °C über dem globalen Mittel (Abb. 4)

Änderung des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas

Die Analyse vergangener Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas liefert sowohl Kenntnisse über die Größenordnung der natürlichen Variabilität, als auch ein Maß zur Bewertung der Auswirkungen möglicher zukünftiger

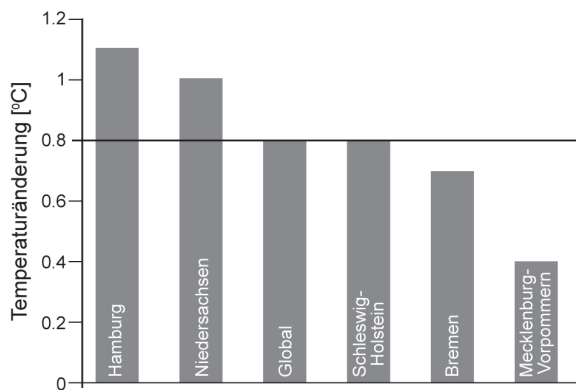


Abb. 4: Änderungen der Temperatur in Norddeutschland berechnet aus Temperaturmessungen des letzten Jahrhunderts. Es wurden die Messwerte aller verfügbaren Messstationen gemittelt (nach I. Meinke 2008, pers. Komm.).

tiger Änderungen infolge des erwarteten globalen Klimawandels. Die Informationen zu den Windverhältnissen über der Nordsee zeigen, dass sich diese mit dem bisherigen Klimawandel nicht systematisch verändert haben. Sowohl Wind- als auch Luftdruckmessungen zeigen vielmehr, dass Stärke und Häufigkeit der Nordseestürme im letzten Jahrhundert starken dekadischen Schwankungen unterlagen. So gab es beispielsweise eine Zunahme der Sturmtätigkeit zwischen 1960 und 1995 sowohl über der Nordsee als auch über der Ostsee, aber eine Analyse von Luftdruckdaten zeigt auch, dass seit 1800 kein langfristiger Trend hin zu einer Zu- oder Ab-

nahme der Sturmtätigkeit zu erkennen ist. Die Änderungen in den letzten Jahren liegen im normalen Schwankungsbereich. In der Deutschen Bucht bringt eine Sturmsaison heute aufgrund des vom Menschen verursachten Klimawandels weder heftigere noch häufigere Stürme hervor als zu Beginn des letzten Jahrhunderts. Dementsprechend laufen Sturmfluten heute windbedingt nicht höher auf als noch vor 100 Jahren.

Methodisch sind Analysen der längerfristigen Veränderung des Sturmklimas jedoch mit einigen Problemen behaftet. Zum einen fehlen hinreichend lange Datensätze, um die volle Bandbreite natürlicher Klimaschwankungen wirklich sicher abzudecken, zum anderen können Änderungen in der Messmethodik (Gerät, Exposition, Zeiten; man spricht von Inhomogenitäten) im Laufe der Zeit zu Fehlinterpretationen langfristiger Änderungen führen. Dies betrifft insbesondere Windmessungen, die ja am besten zur Charakterisierung der Stärke von Stürmen dienen könnten. Um dennoch zu belastbaren Aussagen über langfristige Änderungen zu kommen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Methoden entwickelt und angewandt. Diese alternativen Zugänge operieren zumeist mit Luftdruckmessungen an einem oder an mehreren Orten. Ein Vorteil von Luftdruckmessungen ist ihre Robustheit gegenüber Änderungen in der Umwelt sowie deren oftmals längere Verfügbar-

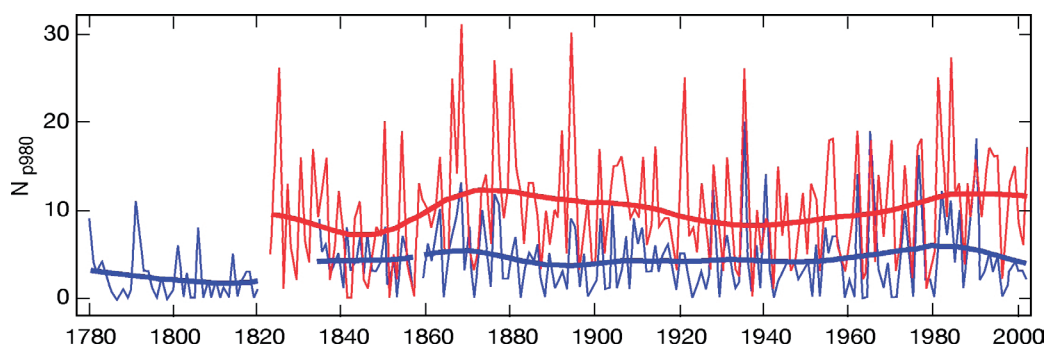


Abb. 5: Sturmindices für Lund (blau) und Stockholm (rot) in Schweden. Die Indices repräsentieren die jährliche Anzahl täglicher Barometermessungen von 980 hPa und weniger. Die durchgezogene Linie ist eine Ausgleichsline (Quelle: Barring und von Storch 2004).

keit. So sind Luftdruckmessungen beispielsweise für ein relativ dichtes Stationsnetz verfügbar und reichen teilweise über mehr als 200 Jahre zurück. Es wurden zum Beispiel in Lund und Stockholm seit Beginn des 19. Jahrhunderts lokale Luftdruckmessungen aufgezeichnet. Aus diesen Daten leitet man jährliche Verteilungen von räumlichen Luftdruckdifferenzen, von kurzfristigen Druckfällen oder die Häufigkeit sehr niedriger Luftdrücke ab. Abbildung 5 zeigt die jährliche Häufigkeit von Luftdruckmessungen unter 980 hPa für Lund und Stockholm – die dekadischen Schwankungen der Häufigkeit und die Abwesenheit eines langfristigen Trends sind gut zu erkennen (Bärring und von Storch 2004).

Änderungen des Meeresspiegels

In flachen Schelfmeeren haben Schwankungen des Meeresspiegels eine große Auswirkung und hinterlassen eine Fülle von Spuren. An der offenen Küste der südlichen Nordsee hatten vergangene Schwankungen des Meeresspiegels einen großen Einfluss auf die Umwelt, die Sedimente und die Besiedlung und können somit relativ exakt datiert werden (Abb. 6) (Behre 2007).

Vor etwa 5.500 Jahren v. Chr. hat das Wasser die heutigen Küstengebiete von den Nieder-

landen und Deutschland erreicht. Es formte sich eine Barriere aus Inseln hinter der sich das heutige Wattenmeer entwickeln konnte (Behre 2007).

Um die jüngste Entwicklung des Meeresspiegels in der Nordsee zu untersuchen, wurden aus Messwerten unterschiedlicher Pegel in vier Regionen der Nordseeküste in den Niederlanden und Deutschland Mittelwerte errechnet. Der Trend für den Zeitraum von 1900 bis heute schwankt zwischen 0,13 cm/Jahr für die schleswig-holsteinische Nordseeküste und 0,22 cm/Jahr für die holländische Küste (Hofstede 2007). Der Pegel Norderney zeigt mit 0,18 cm/Jahr einen ähnlichen Trend. Die meisten Messstellen der deutschen Nordseeküste liefern keine homogenen Daten, häufig aufgrund wasserbaulicher Maßnahmen – eine Ausnahme ist die relativ störungsarme Forschungsstelle Norderney. Abbildung 7 zeigt den kontinuierlichen Anstieg des Tideniedrig- und Tidehochwassers und den Anstieg des Tidehubs. Der Anstieg des mittleren Wasserstandes beträgt hier etwa 2 dm in 100 Jahren. Dieser Anstieg setzt sich aus einer Erhöhung des Wasserspiegels und einer Landsenkung zusammen und unterlag dabei gewissen Schwankungen. An den Küsten Schleswig-Holsteins

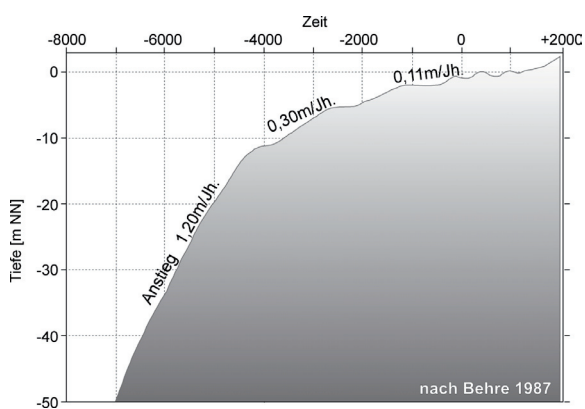


Abb. 6: Anstieg des Wasserspiegels in der südlichen Nordsee in den letzten 7.000 Jahren (nach Behre, aus von Storch 2006).

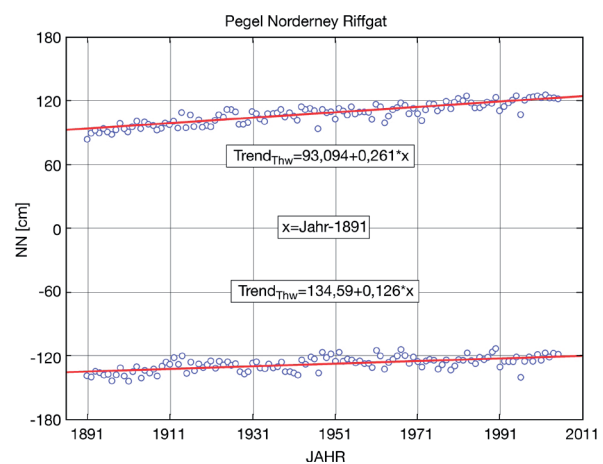


Abb. 7: Änderungen der regionalen Wasserstände und des Tidehubs am Pegel Norderney (nach H.-D. Niemeier, Norderney, pers. Komm.).

muss mit einer regional unterschiedlichen tektonischen Landsenkung zwischen 0 und 10 cm je Jahrhundert gerechnet werden (MLUR 2009). Mit dem Norderneyer Pegel kann aber nach wie

vor kein beschleunigter Anstieg des Meeresspiegels nachgewiesen werden (H.-D. Niemeier, Norderney, pers. Komm, Abb. 7).

2. Zukünftige Klimaänderungen

2.1 Methodik der Klimamodellierung

Für Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas wurden Klimamodelle entwickelt, die zusammen mit verschiedenen Annahmen über die zukünftige Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre (Emissionsszenarien¹) und anderen Randbedingungen (wie etwa der Sonnenleistung) mögliche Temperaturerhöhungen ermitteln und die dadurch angestoßenen Klimaänderungen bis zum Ende dieses Jahrhunderts abschätzen. Dabei wurden für einen hundertjährigen Zeitraum Klimatelemente wie Temperatur, Niederschlag, Luftdruck und Wasserdampf simuliert unter der Annahme einer für möglich gehaltenen Konzentration von Treibhausgasen (Szenario). Die Modelle beschreiben die physikalischen Prozesse des Erdsystems und berechnen sie so real wie möglich. Um die Güte dieser Modelle einzuschätzen, werden sie zunächst für die Berechnung des vergangenen Klimas eingesetzt und mit Messungen validiert. Für diese Validierungsläufe wird bevorzugt eine Zeitperiode gewählt, für die weltweit zahlreiche klimarelevante Aufzeichnungen vorliegen (IPCC 2007).

Globale Modelle haben eine grobe räumliche Auflösung mit der sich nur sehr eingeschränkt Aussagen zu regionalen Details treffen lassen. Um regionale Aussagen zu machen, wird ein Ausschnitt aus der Atmosphäre gewählt für den die Auflösung verfeinert wird, da regionale Klimacharakteristika stark von kleinskaligen Einflüssen wie komplexem Gelände, Landnutzung, Wasser/Land-Verteilung oder Schneebe-

deckung abhängen. Dieser Prozess des Regionalisierens wird als „Downscaling“ bezeichnet, bei dem globale Klimaszenarien mit Hilfe von dynamischen und/oder empirisch-statistischen Methoden verfeinert werden. Statistische Methoden beziehen sich auf gemessene Daten, mit der dynamischen Methode hingegen werden regionale numerische Modelle in globale Modelle eingebettet. Das heißt, die Randbedingungen für die regionale Berechnung liefert das globale Modell. Das regionale Klima wird also unter Berücksichtigung der globalen Informationen und der regionalen und lokalen Gegebenheiten berechnet.

Wie oft angenommen, liefern Klimaszenarien nicht eindeutige Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung. Die von den Modellen errechneten Beschreibungen für die Zukunft sind keine Vorhersagen, sondern alternative zukünftige Beschreibungen, deren Wahrscheinlichkeit nicht angegeben werden kann. Sie hängen davon ab, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen in Zukunft entwickeln wird und wie die natürlichen Schwankungen des Klimas verlaufen. Viele der eingehenden Rahmenbedingungen wie Bevölkerungswachstum, ökonomische und soziale Entwicklung oder Ressourcenverbrauch lassen sich nicht exakt vorhersagen. Aber selbst wenn alle Randbedingungen im Detail bekannt wären, ebenso wie Parameter die durch den Klimawandel direkt beeinflusst werden (Atmosphäre, Wasserkreislauf, Biosphäre), wäre eine exakte Prognose wegen der internen, natürlichen Va-

¹ Eine Reihe von Emissionsszenarien wurden im „IPCC Special Report on Emission Scenarios“ (SRES) veröffentlicht. Neben Veränderungen der Emissionen beschreiben sie auch mögliche Entwicklungen zukünftiger Landnutzung. Weitere Informationen zu den SRES Szenarien sind unter www.ipcc.ch zu finden.

riabilität des Klimasystems nicht machbar. Es können deshalb immer nur Spannbreiten angegeben werden, in denen sich die möglichen Änderungen für Gebiete bewegen, die von mehreren Modellgitterpunkten abgedeckt werden. Alle Modelle stimmen jedoch darin überein, dass die Temperaturen und der globale mittlere Wasserstand steigen. Es lassen sich außerdem Trends zu mehr Extremereignissen wie Sturmfluten und nächtlichen Tropen- aber weniger Frosttagen erkennen (Woth und von Storch 2008, Harmeling et al. 2008).

Angesichts der möglichen Temperaturerhöhung stellt sich allerdings die Frage, ob es in Zukunft zu abrupten Klimaänderungen kommen kann. Solche nicht-linearen Prozesse im Klima-

system werden als „Kipp-Elemente“ bezeichnet. Der Begriff steht für ein Systemverhalten, bei dem nach Überschreiten eines bestimmten Schwellenwertes eine Eigendynamik einsetzt, die nur selten steuerbar oder umkehrbar ist. Noch bestehen große Unsicherheiten über die Existenz und der Bestimmung dieser Temperaturschwellen. Es gibt Wissenschaftler die behaupten, dass die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten von Kipp-Punkten jenseits eines Temperaturanstiegs von 2 bis 3 °C über vorindustriellem Niveau deutlich zunimmt. Daher ist es notwendig, neben den Klimaprojektionen auch solche Risiken im Blick zu haben (Harmeling et al. 2008).

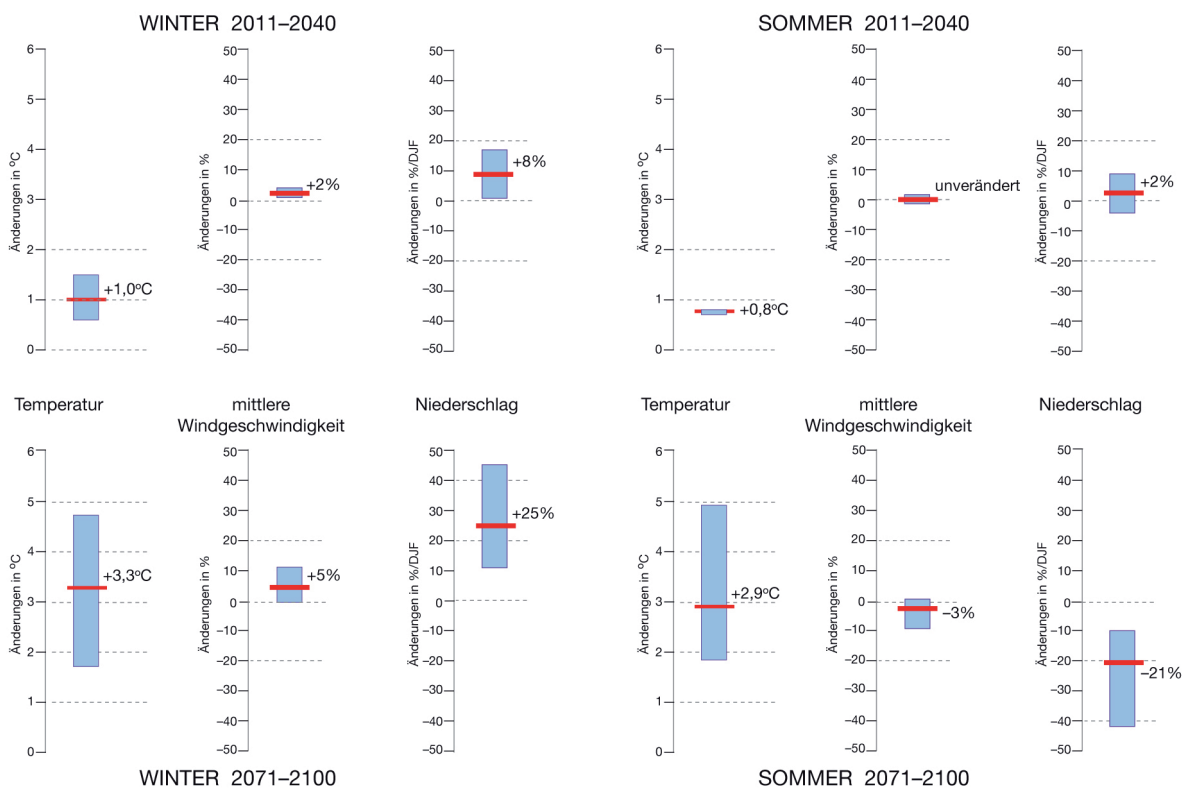


Abb. 8: Regionale Klimaszenarien für die Nordseeküste. Gezeigt werden mögliche Änderungen der Temperatur für die Emissionsszenarien A2 und B2 (Mittel, Minimum, Maximum), der maximalen Windgeschwindigkeiten und der monatlichen Summe der Niederschläge in Norddeutschland (Mittelwerte des Gebietes Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen). Oben: Zeithorizont 2040; Unten Zeithorizont 2100. Rechts: Sommermonate (Juni, Juli, August); Links: Wintermonate (Dezember, Januar, Februar). (Norddeutscher Klimaatlas, www.norddeutscher-klimaatlas.de).

2.2 Regionale Klimaänderungen in Norddeutschland

Im Folgenden wird beschrieben, welche Konsequenzen sich für Norddeutschland aus den beiden Emissionsszenarien A2 und B2 ergeben. Die Simulationen ergaben Abschätzungen zur möglichen Änderung der Temperaturen, Niederschläge und Winde. Eine Auflösung, in der etwa zwischen Kiel und Bremen differenziert werden könnte, ist nicht sinnvoll, da die Gitterauflösung der regionalen Klimarechnungen 50 km beträgt. Es ist auch wichtig, zu bedenken, dass es sich um Szenarien handelt – also mögliche plausible Zukünfte und nicht um Vorhersagen.

Abbildung 8 gibt die möglichen Veränderungen der Temperatur, Niederschlag und Starkwinde für Winter und Sommer und für die Zeithorizonte 2040 und 2100 in Norddeutschland für den Bereich der deutschen Nordseeküste an. Demnach dürfen wir erwarten, dass die durchschnittlichen Temperaturen bis 2040 im Vergleich zum Ende des 20. Jahrhunderts um etwa 0,7 °C bis 0,9 °C im Sommer und 0,6 °C bis 1,5 °C im Winter ansteigen könnten. Ein Temperaturanstieg zwischen 1,8 °C und 5,0 °C im Winter bzw. 1,8 °C und 5,1 °C im Sommer scheint bis zum Ende des 21. Jahrhunderts möglich.

Verglichen zu heute ist diesen Szenarien zufolge im Winter mit einem Zuwachs der monatlichen Niederschläge zwischen +1 % bis +17 % bis 2040 und zwischen +11 % bis +46 % bis 2100 zu rechnen. Für den Sommer deutet sich eine Änderung der Niederschläge zwischen -4 % bis +9 % bis 2040 und zwischen -10 % bis -42 % und bis 2100 an.

In einigen Szenarien weisen die mittleren Windgeschwindigkeiten an der Deutschen Nordseeküste im Sommer auf eine geringfügige Abnahme hin. Im Winter ist bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verglichen zu heute eine Zunahme bis 14% plausibel (Norddeutscher Klimaatlas, www.norddeutscher-klimaatlas.de).

Mögliche Änderung der Wasserstände und im Auftreten von Sturmflutereignissen

An der Nordseeküste tritt etwa alle 12 Stunden und 25 Minuten eine Erhöhung des mittleren Wasserspiegels ein: die Flut. Um von einer Sturmflut zu sprechen, muss ein bestimmter Wasserstand überschritten werden. Ursachen dafür können meteorologische Bedingungen sein. Bei Wetterlagen mit über einige Stunden andauernden hohen Windgeschwindigkeiten aus westlichen und nördlichen Richtungen können infolge des Windeinflusses zusätzliche Wassermassen an der deutschen Nordseeküste aufgestaut werden und eine Sturmflut erzeugen. Der Windstau verhält sich umgekehrt proportional zur Wassertiefe. Somit laufen insbesondere an flachen Küstenabschnitten und bei Winden aus nordwestlicher Richtung die Wassermassen hoch auf. Die eigentliche Sturmfluthöhe ergibt sich aus dem Zusammentreffen von Windstau, der Tidephase und dem Einfluss von Fernwellen. So sind hohe Sturmfluten zu erwarten, wenn hoher Windstau über einige Stunden anhält und damit auch zum Zeitpunkt des astronomischen Tidehochwassers die Wassersäule zusätzlich erhöht.

Der Wasserstand an einem Ort hängt also von folgenden Komponenten ab: 1. dem mittleren Meeresspiegel, 2. von den regionalen Windverhältnissen, die die Windstauereignisse hervorrufen, 3. den astronomischen Gezeiten sowie 4. der regionalen Küstenmorphologie. Die Entwicklung zukünftiger Sturmfluten hängt damit im Wesentlichen von dem a) Ausmaß des Anstiegs des mittleren Meeresspiegels sowie der b) Charakteristik möglicher Änderungen der regionalen Windverhältnisse ab. Aber auch mögliche Änderungen der Gezeiten, der Morphologie und von Fernwellen können Auswirkungen haben, die wir noch nicht kennen. Abbildung 9 zeigt die möglichen Änderungen des globalen Meeresspiegels für verschiedene IPCC Szenarien bis zum Ende dieses Jahrhunderts (IPCC 2007).

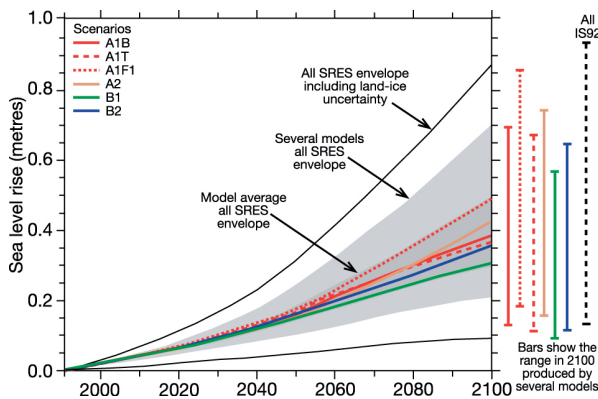


Abb. 9: Verschiedene Szenarien für einen globalen Meeresspiegelanstieg bis zum Ende dieses Jahrhunderts (IPCC 2007).

Daneben spielen an der Küste und den Ästuaren auch wasserbauliche Maßnahmen eine Rolle, die die morphologischen Gegebenheiten verändern wie z.B. das Ausbaggern der Fahrrinne. An den Pegeln ist also nicht nur die Schwankung der Wasserstände aufgrund von natürlichen und anthropogenen Klimaänderungen abzulesen, sondern es erfolgt meistens eine Überlagerung des Signals durch diese direkten Eingriffe. Nur selten gibt es homogene, also ungestörte Pegelaufzeichnungen (Woth und von Storch 2008). Tektonische Hebungen und Senkungen der Landmassen sind weitere Prozesse die unabhängig vom anthropogenen Klimawandel die Höhe des Meeresspiegels beeinflussen können. Im Bereich der Deutschen Bucht sind die Verhältnisse jedoch relativ stabil und die Landmassen senken sich weniger als 1 cm pro Jahrhundert ab (Behre 2007).

Erhöht sich der mittlere Meeresspiegel durch die thermische Ausdehnung und das Abschmelzen von kontinentalen Eismassen, werden sich auch die Scheitel zukünftiger Sturmflutwasserstände erhöhen. Heutige Schätzungen gehen von einem mittleren Meeresspiegelanstieg von 2 bis 6 dm bis zum Ende des Jahrhunderts verglichen zu heute aus (IPCC 2007). Berücksichtigt man eine sich möglicherweise verstärkende Eisdynamik, erscheint ein Anstieg des globalen

mittleren Meeresspiegels von etwa 2 bis 8 dm bis zum Ende des Jahrhunderts möglich. Randmeere wie die Nordsee, können infolge von Änderungen in der Dichte sowie Änderungen in der Zirkulation einen abweichenden, d.h. im Vergleich zum globalen Mittel, unterschiedlichen Anstieg zeigen.

Das Abschmelzen von Teilen des Grönländischen Eisschildes ist die größte Quelle von Unsicherheiten was die Abschätzung des Anstiegs des mittleren globalen Wasserstandes betrifft. Bei einem vollständigen Abschmelzen des Eisschildes ist mit einem zusätzlichen Betrag von 6 bis 7 m im globalen Mittel zu rechnen, im Regionalen aber ergeben sich massive Unterschiede wegen der damit verbundenen Änderung der Massenverteilung. Diese Größenordnung ist aber nicht auf der Zeitskala von einigen Dekaden sondern auf der einiger Jahrhunderte zu erwarten und setzt voraus, dass es keine nennenswerte Reduktion der Treibhausgasemissionen geben und kein Kipppunkt überschritten wird (Woth und von Storch 2008).

Sturmflutstatistiken gibt es für viele Orte entlang der Nordseeküste schon für lange Zeiten. Üblicherweise liegen diese als Abweichungen von astronomischen Tidehochwässern vor. Diese Zeitreihen reflektieren meteorologische und ozeanographische Faktoren – also die Zirkulation in der Nordsee, den Windschub und den Luftdruck.

Für mögliche Änderungen des Windstaus sind hauptsächlich die bodennahen Windcharakteristika entscheidend. Die Klimaprojektionen zukünftiger Emissionsszenarien weisen auf einen Anstieg in den hohen Windgeschwindigkeiten regional über dem Gebiet der Nordsee hin. Für die Nordsee und weite Teile Europas erscheint eine Steigerung der bodennahen Starkwinde zum Ende des Jahrhunderts um 7,5 % in den Wintermonaten plausibel. In m/s ausgedrückt entspricht das einer Zunahme zwischen 0,3 und 1,0 m/s-1, verglichen zu heute. Dieses sehr

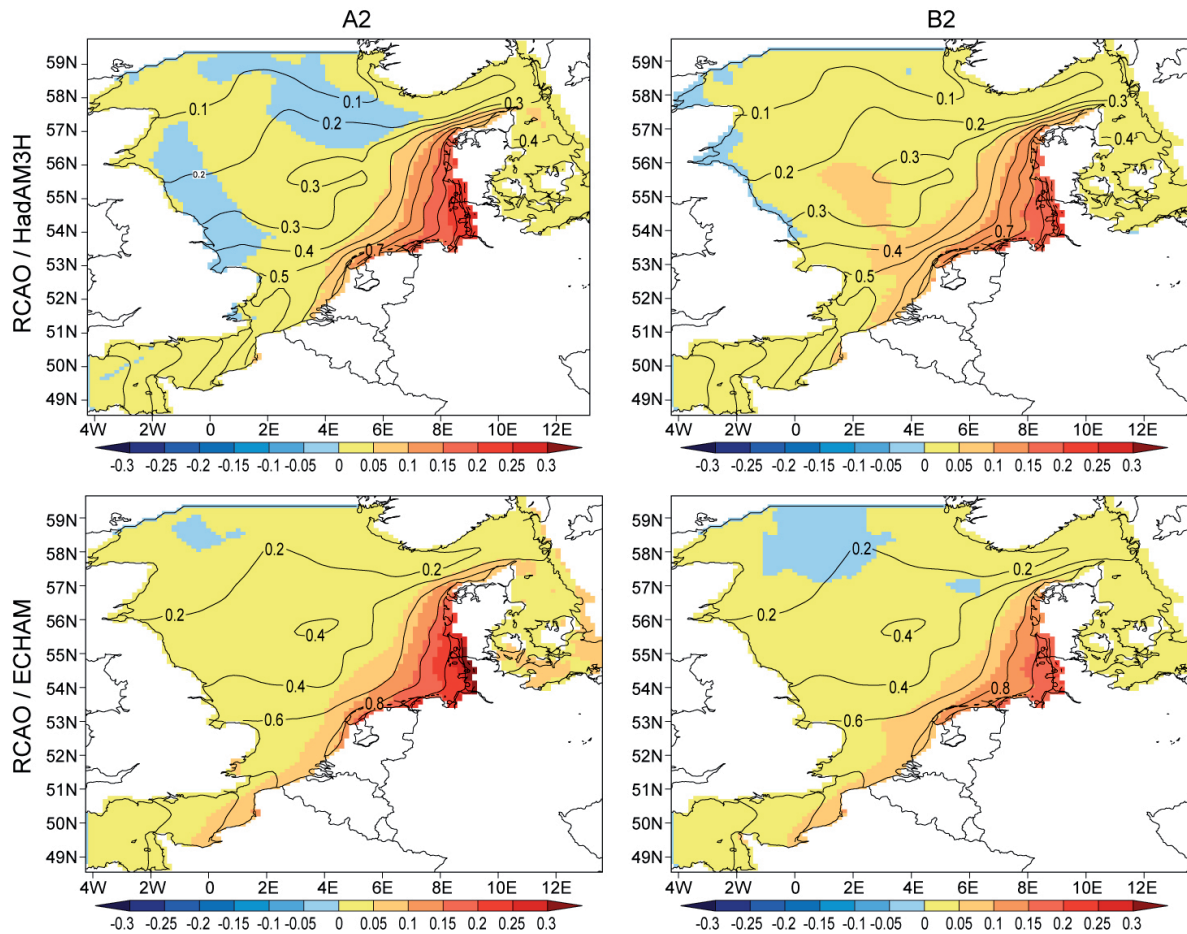


Abb. 10: Erwarteter Effekt veränderter Sturmtätigkeit über der Nordsee auf die Windstauhöhen. Atmosphärischer Antrieb: zwei unterschiedliche Emissionsszenarien. A2 in der linken Spalte und B2 in der rechten Spalte. Die Zeilen zeigen die jeweiligen regionalen Klimarechnungen mit Antrieben von zwei verschiedenen globalen Klimamodellen. Regionalisiert wurde mit dem regionalen Atmosphärenmodell des SMHI (Schwedisches Institut für Hydrologie und Meteorologie). Das Sturmflutmodell der GKSS berechnet aus der regionalen Atmosphäre schließlich die Wasserstände. Dargestellt ist die Änderung der Erwartung hoher Wasserstände (99,5 Perzentil) (Farbskala) im Vergleich zur heutigen Sturmflutklimate Situation (Isolinien). Einheit: Meter (aus Woth und von Storch 2008).

schwache Anstiegssignal von Starkwindgeschwindigkeiten liegt in kürzeren Zeitabschnitten wie Jahrzehnten unterhalb der Nachweisgrenze. Deshalb ist es stimmig, wenn wir derzeit kein nachweisbares, dem anthropogenen Klimawandel zuzuordnendes, Signal im Starkwind finden können.

Abbildung 10 stellt vier Beschreibungen möglicher Änderungen hoher Windstauhöhen (Farbskala) bis zum Ende des Jahrhunderts (2070 bis 2100) im Vergleich zu heute (1961 bis 1990) (Isolinien) dar. Es zeigt sich, dass alle vier

Simulationen ein ähnliches Muster aufweisen. Demnach sind an der deutschen Nordseeküste bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verglichen zu heute ein Anstieg des Windstaus von 2 ± 1 dm zu erwarten. Da Sturmfluten durch den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg verglichen zu heute auf einem 5 ± 3 dm höheren Niveau entstehen, können sie insgesamt bis zum Ende des Jahrhunderts 7 ± 4 dm höher auflaufen als heute. Wie in Abbildung 10 zu erkennen, erlauben die vier Projektionen statistisch keine Unterscheidung der Emissionsszenarien. Das heißt für

die Entwicklung der Sturmfluthöhen macht es keinen erkennbaren Unterschied, ob die Treibhausgaskonzentrationen auf ein A2 oder B2 Niveau steigen.

Neben einem Anstieg der absoluten Höhen ist aber auch mit einer Zunahme der Andauer der Sturmfluten im Bereich der Deutschen Bucht zu rechnen. Hoher Windstau würde dann dort

nicht im Mittel 7 bis 8 Stunden am Deich stehen sondern 2 bis 3 Stunden länger. Dies erhöht zum einen die Chance des Zusammentreffens eines hohen Windstauereignisses mit dem Gezeitenmaximum und somit einer tatsächlichen Sturmflut und zum anderen erhöht sich die Belastungsdauer auf die Deiche (Woth und von Storch 2008).

3. Zusammenfassung

Mit vielfältigen Methoden lassen sich Rückschlüsse auf das vergangene Klima ziehen. Diese Rückschlüsse zeigen, dass sich das Klima zwar schon immer geändert hat und Klimawandel somit kein grundsätzlich neues Phänomen unserer Zeit ist. Außergewöhnlich ist allerdings die starke Geschwindigkeit dieser Änderungen in den letzten Jahren, die am besten durch den starken Anstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre seit Beginn der Industrialisierung erklärt wird. Um diese Klimaänderungen in die Zukunft zu projizieren, werden Klimamodelle erstellt, die es erlauben, Aussagen über mögliche zukünftige Änderungen des Klimas unter Berücksichtigung verschiedener Treibhausgasszenarien zu machen. Dabei lassen sich sowohl Aussagen zu globalen als auch zu regionalen Änderungen treffen. Es hat sich gezeigt, dass die Modelle viele Aspekte einer zukünftigen Entwicklung ähnlich beschreiben. So ist allen Simulationen gemein, dass es deutlich wärmer wird.

Die Mehrzahl der heute verfügbaren Klimamodelle lassen für Norddeutschland zum Ende dieses Jahrhunderts eine Verschiebung von einem gemäßigten Küstenklima hin zu einem mehr südeuropäischen Klimatyp erwarten. Dies

gründet auf einer Erwärmung zu allen Jahreszeiten und abnehmenden Niederschlägen im Sommer sowie zunehmenden Niederschlägen in den übrigen Jahreszeiten. Außerdem ist mit einer Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs zu rechnen und etwas höhere Windgeschwindigkeiten gelten auch als wahrscheinlich.

Die Szenarien sind mit einer gehörigen Portion Vorbehalt zu verwenden – es handelt sich eben um Szenarien, also um mögliche Zukünfte und nicht um Vorhersagen. Es werden auch Unschärfen angegeben, die die Bandbreite darstellen, die durch die Verwendung verschiedener sozio-ökonomischer Szenarien (also: entsprechende Freisetzung von Treibhausgasen) und die Verwendung verschiedener Klimamodelle entsteht.

Die Nützlichkeit der Szenarien besteht im wesentlichen darin, schon jetzt die Fragen von morgen zu formulieren – dies werden im wesentlichen Fragen der Anpassung an jenen Klimawandel sein. Insbesondere geht es darum, die der Gesellschaft verfügbaren Optionen auszuloten und dies muss im Zusammenspiel von Praktikern in Behörden, Politik und Wirtschaft und von Klimaforschern geschehen.

Literatur

- BÄRRING, L. & H. VON STORCH (2004), Scandinavian storminess since about 1800, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20202, doi:10.1029/2004GL020441.
- BEHRE, K.-E. (2007): A new Holocene sea-level curve for the southern North Sea, *Boreas*, Vol. 36 (1), 82-102.
- DEUTSCHER WETTERDIENST 2009: Der Klimareport 2008, Offenbach.
- GERSTENGARBE, F.-W. & P. C. WERNER (2007): Der rezente Klimawandel. In ENDLICHER, Wilfried & Friedrich-Wilhelm GERSTENGARBE: Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke, Humboldt-Universität zu Berlin, 34-43.
- HARMEILING, S., C. BALS, D. FRIEDRICHS, M. FLIEGNER, M. BERG, L. BERGMANN, G. KIER, B. HARMEILING & B. SCHINKE (2008): Globaler Klimawandel. Bildungshaus Schulbuchverlage Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH, Braunschweig.
- HOFSTEDTE, J. (2007): Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmfluten: Ist der anthropogene Klimawandel bereits sichtbar? in Gönnert, G., B. Pflüger & J.-A. Bremer: Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement, *Coastline Reports* 9 (2007), 139 - 148.
- IPCC (2007): Vierter Sachstandsbericht des IPCC: Klimaänderung 2007 - Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Original herausgegeben von IPCC, WMU/UNEP.
- LANDERER, F., J. H. JUNGCLAUS & J. MAROTZKE (2007): Regional Dynamic and Steric Sea Level Change in Response to the IPCC-A1B Scenario, *J. Phys. Oceanogr.*, 37 (2), 296-312.
- MLUR MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, UMWELT UND LÄNDLICHE RÄUME SCHLESWIG-HOLSTEIN (2009): Klimawandel und Konsequenzen für den Küstenschutz in Schleswig-Holstein, Abrufbar unter : http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/WasserMeer/09__KuestenschutzHaefen/05__KlimawandelKonsequenzenSH/ein__node.html (Datum: 15.04.2009).
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2007): Indizien für den Klimawandel der letzten 100 Jahre. In TETZLAFF, G., H. Karl & G. OVERBECK (Hrsg.): Wandel von Vulnerabilität und Klima: Müssen unsere Vorsorgeinstrumente angepasst werden? Workshop von DKKV (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge) und ARL (Akademie für Raumordnung und Landesplanung). Hannover, 27. - 28. November 2006, 4-15.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): Der Klimawandel in Vergangenheit und Zukunft – Wissensstand und offene Fragen, *Amos International* 2 (1), 17-23, abrufbar unter http://www.geo.uni-frankfurt.de/iau/klima/Sw_Amos_2008.pdf (Datum 25.05.2009).
- STREIF, H. (2002): Nordsee und Küstenlandschaft - Beispiel einer dynamischen Landschaftsentwicklung, Veröffentlichung 20, Akademie der Geowissenschaften zu Hannover e.V., 134-149.
- VON STORCH, H., S. GÜSS & M. HEIMANN (1999): Das Klimasystem und seine Modellierung: eine Einführung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- VON STORCH, H. (2006): Die Bedeutung der historischen Dimension für die gegenwärtige Klimaforschung, Manuskript für die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Abrufbar unter <http://coast.gkss.de/staff/storch/pdf/0612.nrw-akademie.pdf> (Datum: 23.02.2009).
- VON STORCH, H., I. MEINKE, R. WEISSE & K. WOTH (2008): Regionaler Klimawandel in Norddeutschland, In G. TETZLAFF, H. Karl & G. OVERBECK (Hrsg.): Wandel von Vulnerabilität und Klima: Müssen unsere Vorsorgeinstrumente angepasst werden? Workshop von

DKKV (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge) und ARL (Akademie für Raumordnung und Landesplanung). Hannover, 27. - 28. November 2006, 16-24.

WEISSE, R. & H. VON STORCH (submitted): Storm climate and marine hazards in the Northeast Atlantic and the North Sea, ICES, Abrufbar unter: http://coast.gkss.de/staff/storch/pdf/weisse/ices_full_paper.2006.pdf (Datum: 12.06.2009)

WEISSE, R. & H. VON STORCH (2004): Großräumige Änderungen des Wind-, Sturmflut- und Seegangsklimas in der Nordsee und mögliche Implikationen für den Küstenschutz, in G. Gönnert et al., Klimaänderung und Küstenschutz, Universität Hamburg.

WOTH, K. & H. VON STORCH (2008): Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas, Dithmarschen Landeskunde - Kultur - Natur, 1/2008, 20-31.

ZEBISCH, M., T. GROTHMANN, D. SCHRÖTER, C. HASSE, U. FRITSCH & W. CRAMER (2005): Klimawandel in Deutschland Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, Forschungsbericht 20141253 UBA-FB 000844, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau.

Hans von Storch, Julika Doerffer, Insa Meinke
Norddeutsches Klimabüro - Institut für Küstenforschung
GKSS Forschungszentrum
Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht
julika.doerffer@gkss.de
<http://www.norddeutsches-klimabuero.de>