

# **Großräumige Änderungen des Wind-, Sturmflut- und Seegangsklimas in der Nordsee und mögliche Implikationen für den Küstenschutz**

Ralf Weisse und Hans von Storch

GKSS Forschungszentrum - Institut für Küstenforschung

## **Summary**

Long-term changes in the prevailing wind, wave and storm surge conditions may have profound impact on coastal protection. In many cases data to analyze such changes are limited. A review is provided on the options to enhance the existing data base and contemporary results for the North Sea and the eastern North Atlantic are presented. Subsequently, methods to assess future climate conditions are addressed, results are presented, and limitations are discussed.

## **Zusammenfassung**

Langfristige Änderungen in der Sturm-, Sturmflut- und Seegangsstatistik können gravierende Auswirkungen für den Küstenschutz haben und erfordern adäquate Strategien im Umgang mit diesen. In Anbetracht des oftmals zu geringen Beobachtungsmaterials zur Analyse solcher Änderungen wird auf Möglichkeiten zur Erweiterung der Datenbasis wie z.B. die Analyse von Proxydaten oder numerische Rekonstruktionen eingegangen, und es werden neuere Ergebnisse für den Bereich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks vorgestellt. Anschließend wird auf die Methodik zur Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen sowie die damit verbundenen Unsicherheiten eingegangen.

## **1 Einleitung**

Stürme, Sturmfluten und Sturmflutseegang stellen immense Naturgewalten dar, die das Leben in der Küstenregion prägen und die Sicherheit sowohl auf See, als auch im unmittelbaren Küstenbereich nachhaltig beeinflussen. Langfristige Veränderungen sowohl in der Stärke, als auch in der Häufigkeit dieser Naturgewalten haben direkte Auswirkungen auf den Lebensraum Küste und erfordern adäquate Strategien im Umgang mit diesen.

Klimatische Schwankungen werden auf allen Zeitskalen beobachtet. Die Bandbreite reicht dabei von saisonalen und jährlichen Schwankungen bis hin zu den durch den Zyklus von Kalt- und Warmzeiten (etwa 10.000 Jahre) verursachten Variationen. Im Bereich des Küstenschutzes sind dabei vor allem die Schwankungen im Bereich von einigen Jahren bis hin zu einigen Jahrzehnten von praktischer Bedeutung. In diesem Bereich ist das Klimasystem durch eine ausgeprägte natürliche Variabilität gekennzeichnet. Gleichzeitig erwartet man aber auch gerade in diesem Zeitbereich deutliche Änderungen infolge der anthropogenen globalen Erwärmung.

Aufgrund der teilweise sehr beschränkten Datenlage sind, insbesondere über den Ozeanen und im Küstenbereich, Aussagen über die langfristigen Änderungen von Extremereignissen nach wie vor schwierig und zum Teil mit enormen Unsicherheiten behaftet. Der IPCC Bericht in seiner jetzigen Fassung (Houghton et al. 2001) ist, abgesehen vom erwarteten Anstieg des globalen Meeresspiegels,

äußerst zurückhaltend, was definitive Aussagen über eine sich ändernde Bedrohung der Küstenregionen infolge des globalen Klimawandels angeht. Ungeachtet dessen hat sich das Wissen über potentielle Auswirkungen eines möglichen Klimawandels im Küstenbereich in den letzten Jahren deutlich verbessert. Im Folgenden werden gängige Methoden zur Abschätzung langfristiger Änderungen im Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklima sowie der gegenwärtige Kenntnisstand für den Bereich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks vorgestellt. Dabei wird neben den Änderungen der jüngsten Vergangenheit auch auf mögliche zukünftige Entwicklungen und Unsicherheiten eingegangen.

## **2 Analyse der Vergangenheit**

Die Analyse vergangener Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas (im Folgenden kurz als Extremereignisse bezeichnet) liefert sowohl Kenntnisse über die Größenordnung der natürlichen Variabilität, als auch ein Maß zur Bewertung der Auswirkungen möglicher zukünftiger Änderungen infolge des erwarteten globalen Klimawandels. Methodisch sind solche Analysen jedoch mit einigen Problemen behaftet. Zum einen fehlen, insbesondere über den Meeren, hinreichend lange Datensätze, um die volle Bandbreite natürlicher Klimaschwankungen abzudecken, zum anderen können Änderungen in der Messmethodik im Laufe der Zeit zu Fehlinterpretationen langfristiger Änderungen führen. Ein Beispiel hierfür ist die freiwillige Erhebung meteorologischer Daten auf See durch fahrende Handelsschiffe (sog. Voluntary Observing Ships), deren Routen, Geschwindigkeiten und Aufbauten sich im Laufe der Zeit geändert haben und deren Daten so langfristige, nicht klimatisch bedingte Signale (Inhomogenitäten) beinhalten können (z.B. WASA 1998). Zur Analyse langfristiger Änderungen von Extremereignissen sind solche Daten daher nur eingeschränkt verwendbar.

### **2.1 Methoden**

Um angesichts dieser Einschränkungen dennoch zu belastbaren Aussagen über langfristige Änderungen zu kommen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Methoden entwickelt und angewandt. Insbesondere bei der Analyse von langfristigen Änderungen des Sturmklimas wird häufig auf Stellvertreterdaten (so genannte Proxydaten) zurückgegriffen. Schmidt und von Storch (1993) beschreiben z.B. eine Methode, bei der geostrophische Windgeschwindigkeiten (als Proxy für die Sturmaktivität) aus Stationsdaten des Bodenluftdrucks berechnet werden. Im Vergleich zu direkten Windgeschwindigkeitsmessungen hat sich die Technik der Luftdruckmessungen im Laufe der Zeit nur wenig geändert, und es kann somit davon ausgegangen werden, dass die mit ihrer Hilfe abgeleiteten Windgeschwindigkeiten weniger stark von Inhomogenitäten beeinflusst sind, als die direkten Messungen. Ein weiterer Vorteil von Proxydaten besteht in ihrer oftmals längeren Verfügbarkeit. So sind Luftdruckmessungen beispielsweise für ein relativ dichtes Stationsnetz verfügbar und reichen teilweise über mehr als 200 Jahre zurück. Andere Proxies zur Analyse der Sturmtätigkeit basieren auf Luftdruckmessungen einzelner Stationen, wie z.B. die jährliche Zahl besonders tiefer Barometerstände oder starker zeitlicher Druckänderungen (z.B. Bärring und von Storch 2004). Für die Küstenbereiche kommen zwei weitere Proxies in Betracht, die in enger Verbindung mit dem Sturmklima stehen: Pegelstände und Seegang. Hierbei stellen insbesondere die Pegelstände eine interessante Option dar, für die ein umfassendes Messnetz seit einem relativ langen Beobachtungszeitraum existiert (z.B. Woodworth und Blackman 2002).

Zur Bewertung großräumiger Veränderungen, insbesondere über relativ datenarmen Gebieten wie beispielsweise den offenen Ozeanen, sind jedoch auch Proxydaten nur bedingt einsetzbar. Häufig werden deshalb zusätzlich numerische Modelle verwandt, um mit ihnen die wenigen vorhandenen Daten räumlich und zeitlich zu interpolieren und in einen dynamisch konsistenten Zusammenhang zu bringen, ein Verfahren, das aus der Wetteranalyse bekannt ist. Im Laufe der Zeit waren jedoch auch diese Verfahren und Techniken gewissen Veränderungen unterworfen. Deshalb werden seit einiger Zeit

so genannte Re-analyse Projekte durchgeführt, bei denen im Gegensatz zur täglichen Wetteranalyse Wetterdaten der letzten Jahrzehnte mit einheitlichen Modellen und Datenassimilationsverfahren reprozessiert werden, um so zumindest die Inhomogenitäten zu reduzieren, die in den Wetteranalysen z.B. infolge von Modellwechseln, wechselnder Datenverfügbarkeit und Qualität oder infolge von Änderungen der Datenassimilation vorhanden sind. Die zwei derzeit umfassendsten Re-analysen sind die des National Center for Environmental Prediction (NCEP) (Kalnay et al. 1996, Kistler et al. 2001) und die des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF, ERA-40) (Simmons and Gibson 2000).

Aufgrund beschränkter Rechnerkapazitäten haben die globalen Re-analysen heute typischerweise Auflösungen von etwa 200 km. Während sie damit für Analysen im großskaligen Bereich geeignet sind, bedient man sich für die Analyse von Änderungen auf der regionalen Skala (z.B. für die Küstenregion) üblicherweise einer weiteren Verfeinerung mit Hilfe statistischer oder dynamischer Downscaling Methoden (z.B. Feser et al. 2001). Insbesondere dynamische Methoden sind dabei in der Lage, zusätzliche Informationen bezüglich des räumlichen und zeitlichen Details als auch hinsichtlich nicht direkt beobachteter Größen wie Wasserstand, Seegang oder Strömungen zu liefern. Zusammen mit der Analyse von Proxydaten stellen sie somit eine ideale Kombination zur Abschätzung und Bewertung vergangener Änderungen dar (Abb. 1).

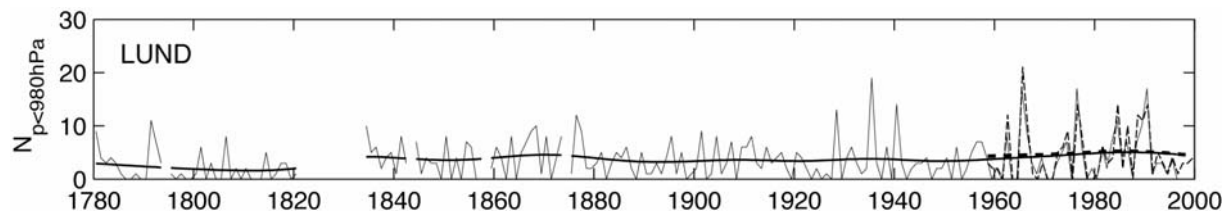


Abb. 1: Beobachtete (durchgezogen, nach Barring und von Storch 2004) und mit Hilfe der Rekonstruktion von Feser et al. (2001) rekonstruierter (gestrichelt) luftdruckbasierter Sturmindex für Lund (Schweden). Gezeigt ist jeweils die jährliche Anzahl von Barometerständen unterhalb 980 hPa, wobei die flache Kurve eine Glättung der jährlichen Werte darstellt. Im Überlappungszeitraum zwischen Beobachtungen und Modellrekonstruktionen ist eine recht gute Übereinstimmung der Sturmstatistiken zu erkennen. Mit Hilfe der Proxydaten können sehr lange Zeiträume, mit Hilfe der Rekonstruktionen zusätzliche Variablen auch an Orten ohne Beobachtungsmaterial analysiert werden (nach Barring, pers. Mitteilung 2004).

## 2.2 Rekonstruktion der Vergangenheit und gegenwärtige Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas am Beispiel der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks

Basierend auf den NCEP Re-analysen haben Feser et al. (2001) eine atmosphärische Rekonstruktion mit einem Regionalmodell (Jacob und Podzun 1997) für den Bereich der Nordsee und des östlichen Nordatlantiks durchgeführt. Im Vergleich zu den als Randwerten verwendeten Re-analysen haben die Ergebnisse dieser Simulation eine in etwa 16-fach erhöhte räumliche Auflösung und liegen für den Zeitraum 1958-2002 zu jeder vollen Stunde vor. Weisse et al. (2004) verglichen anhand dieser Simulation rekonstruierte Sturmstatistiken mit Beobachtungen und fanden eine recht gute Übereinstimmung. Ein Beispiel für den Bereich der südlichen Nordsee ist in Abbildung 2 dargestellt.

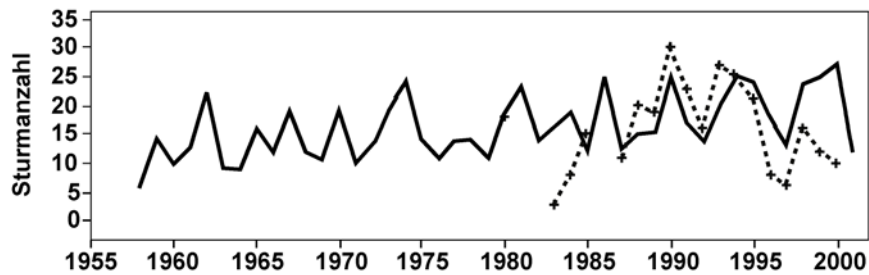


Abb. 2: Beobachtete (gestrichelt) und mit Hilfe der Simulation von Feser et al. (2001) (durchgezogen) rekonstruierte Anzahl von Sturmereignissen mit Windgeschwindigkeiten von Beaufort 8 und mehr an der Plattform K13-Alpha in der südlichen Nordsee (nach Weisse et al. 2004).

Weisse et al. (2004) untersuchten außerdem die langfristigen Änderungen des Sturmklimas in der Rekonstruktion von Feser et al. (2001) und fanden, dass (bezogen auf den Zeitraum 1958-2002) in der Tat eine Zunahme der Sturmaktivität über dem östlichen Nordatlantik und der Nordsee zu beobachten war. Eine detailliertere Analyse lieferte jedoch regional und zeitlich differenziertere Aussagen. So nahm die Sturmaktivität über weiten Teilen des Nordatlantiks zunächst bis etwa 1990-1995 zu. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende der Rekonstruktionsperiode war dann ein deutliches Abklingen zu beobachten. Für den Bereich der südlichen Nordsee wurde die stärkste Zunahme der Sturmaktivität zu Beginn der Rekonstruktionsperiode beobachtet, wogegen die Anstiegsraten der letzten Jahre deutlich geringer ausfallen (Weisse et al. 2004).

Inwieweit es sich bei den beschriebenen Änderungen um natürliche Schwankungen oder um anthropogen bedingte Änderungen handelt, ist nach wie vor ungeklärt. Analysen von Proxydaten implizieren, dass die natürlichen Schwankungen der Sturmaktivität beträchtlich sein können. Jones et al. (1999) untersuchten z.B. für den Zeitraum 1881-1997 einen Sturmindex für den Bereich der Britischen Inseln und fanden einen Anstieg der Sturmaktivität seit etwa 1960. Bezogen auf den Gesamtzeitraum, konnte jedoch kein langfristiger Trend identifiziert werden. Auch Analysen sturmbedingter Wasserstandsvariationen (z.B. WASA 1998, Woodworth and Blackman 2002) und geostrophischer Windgeschwindigkeiten (Alexandersson et al. 1998, 2000) für den Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee lieferten ähnliche Ergebnisse.

Basierend auf den NCEP Re-analysen wurden im Rahmen des europäischen Projekts HIPOCAS (Soares et al. 2002) regionale atmosphärische Rekonstruktionen für verschiedene europäische Küstenregionen durchgeführt und anschließend dazu verwendet, regionale Seegangs-, Strömungs- und Wasserstandsverhältnisse der letzten Jahrzehnte mit hohem zeitlichen und räumlichen Detail zu rekonstruieren. Für den Bereich der Nordsee liegen diese Rekonstruktionen beispielsweise für den Zeitraum 1958-2002 stündlich vor, wobei die räumliche Auflösung in etwa 5 km für den Seegang und bis zu etwa 80 m für die Wasserstände und Strömungen im Bereich der Watten beträgt (Weisse et al. 2003 updated; Plüß pers. Mitteilung). Abb. 3 zeigt die rekonstruierten langfristigen Änderungen extremer Seegangereignisse für die südliche Nordsee. Betrachtet über den Gesamtzeitraum (1958-2002) hat sich das jährliche 99%-Percentil der signifikanten Wellenhöhe im Bereich der Deutschen Bucht um bis zu 1.8 cm/Jahr (also um bis zu etwa 80 cm betrachtet über den Gesamtzeitraum) erhöht. Für den Küstenschutz, aber auch für die Sicherheit des Seeverkehrs kann es wichtig sein, inwieweit diese Änderungen durch eine Zunahme der Häufigkeit, der Intensität oder der Andauer extremer Ereignisse verursacht sind. So kann beispielsweise die Zunahme der Häufigkeit zu einer Verringerung adäquater Wetterfenster für den Schiffsverkehr führen, wogegen für den Küstenschutz Änderungen in der Intensität oder der Andauer der Ereignisse von größerer Bedeutung sein können. Inwieweit die Änderungen des jährlichen 99%-Percentils auf häufigere, längere oder schwerere Seegangereignisse zurückzuführen sind, ist deshalb ebenfalls in Abb. 3 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass insbesondere die jährliche

Anzahl extremer Seegangereignisse (um bis zu 0.15 Ereignisse oder bis zu etwa 6-7 Ereignisse pro Jahr betrachtet über den Gesamtzeitraum) zugenommen hat, wogegen die mittlere Intensität und Andauer der Ereignisse keine signifikanten Trends aufweisen (ohne Abb.). Inwieweit sich innerhalb der letzten Jahre, ähnlich wie bei den oben beschriebenen Änderungen der Sturmaktivität, eine Abschwächung oder gar ein Rückgang dieser Entwicklung abzeichnet, bedarf noch einer weitergehenden Analyse.

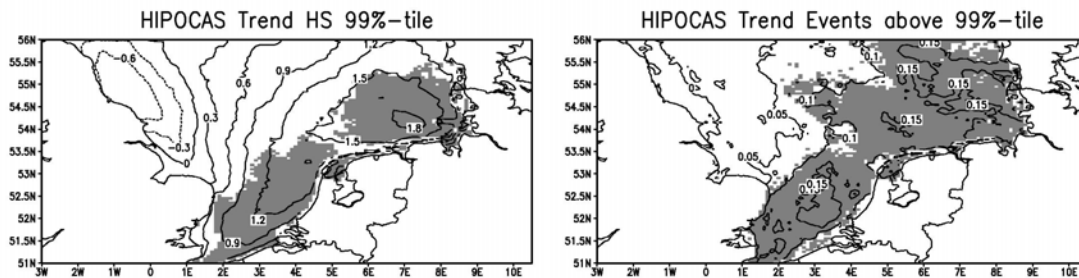


Abb. 3: Linearer Trend 1958-2002 der jährlichen 99%-Perzentile der signifikanten Wellenhöhe in cm pro Jahr (links) und linearer Trend der jährlichen Anzahl von Seegangereignissen mit Wellenhöhen oberhalb des langjährigen lokalen 99%-Perzentils (rechts). Orte, für die die Trends der pre-whitened Zeitserien nach dem Mann-Kendall Test mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit signifikant von Null verschieden sind, sind durch Grauschattierung hinterlegt. Die Abbildungen wurden aus den Ergebnissen einer hochaufgelösten Seegangsrekonstruktion für die südliche Nordsee (Weisse et al. 2003) angetrieben durch die atmosphärische Rekonstruktion von Feser et al. (2001) erstellt. Die Analysen basieren auf stündlichen Daten der Periode 1958-2002.

Neben der Schaffung einer Basis zur Abschätzung gegenwärtiger und natürlicher Veränderungen, können solche regionalen Rekonstruktionen aufgrund ihres hohen zeitlichen und räumlichen Details auch als Grundlage für eine Reihe weitergehender Arbeiten dienen. Beispiele sind die Simulation ozeanischer Transporte oder, darauf aufbauend, die Entwicklung von Szenarien z.B. zur Bekämpfbarkeit von Ölausbreitungen (Callies pers. Mitteilung), die Simulation von Schiffsbewegungen oder die Lieferung von Randwerten für höher aufgelöste Rechnungen im unmittelbaren Küstenbereich (Günther pers. Mitteilung).

### 3 Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen

Abschätzungen zukünftiger regionaler Entwicklungen über relative lange Zeiträume (Jahre bis Jahrzehnte), wie sie im Zusammenhang mit klimatisch bedingten Änderungen zu betrachten sind, sind nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Nicht nur gibt es Unterschiede in den Aussagen der einzelnen Klimamodelle (z.B. Rauthe et al. 2004), z.B. aufgrund der unterschiedlichen Behandlung (Parametrisierung) der wesentlichen Prozesse in diesen Modellen, sondern auch erhebliche Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung der Antriebsfaktoren, wie beispielsweise über das Niveau der zukünftigen Konzentrationen oder des genauen zeitlichen Verlaufs der weiteren Zunahme atmosphärischer Treibhausgase. Um im Rahmen solcher Unsicherheiten dennoch zu Aussagen über mögliche Entwicklungen zu kommen, bedient man sich im Allgemeinen der Szenarienmethode, d.h.

der Beantwortung von Fragen des Typs „Was wäre, wenn ...?“. Ein Szenario repräsentiert deshalb eine plausible, aber nicht notwendigerweise eine wahrscheinliche zukünftige Entwicklung.

Ein im Klimabereich häufig untersuchtes Szenario ist das der CO<sub>2</sub>-Verdopplung, d.h. welche Änderungen simulieren die Modelle im Falle einer Verdopplung des atmosphärischen Kohlendioxids gegenüber dem vorindustriellen Wert oder im Falle eines äquivalenten Anstiegs anderer atmosphärischer Treibhausgase. Je nach erwarteter ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklung wird eine solche Verdopplung realistischweise in etwa 70-100 Jahren erwartet.

Realitätsnahe Klimamodelle, in denen dynamische Modelle der Atmosphäre, des Ozeans und anderer Klimakomponenten miteinander wechselwirken, sind heute bis zu einem gewissen Grad in der Lage, die natürliche Variabilität des Klimasystems sowie dessen Sensitivität auf einen CO<sub>2</sub>-Anstieg zu simulieren. Jedoch können solche Modelle aufgrund beschränkter Rechenkapazitäten nur mit relativ groben Auflösungen betrieben werden. Für die im Klimabereich üblichen Simulationen liegt die Auflösung typischerweise um etwa 500 km. Regionale Details wie die Zugbahnen der Stürme, die vom Wind getriebenen lokalen Änderungen des Wasserstandes oder des Seegangs können damit nicht zufrieden stellend simuliert werden. Um aber trotzdem zu Aussagen über regionale Detailvorgänge zu kommen, bedient man sich so genannter Zeitscheibenexperimente. Hierbei wird auf die großräumigen Ergebnisse eines grob aufgelösten Klimamodells zurückgegriffen. Diese werden zusammen mit den erhöhten atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen in ein hochauflösendes globales Atmosphärenmodell eingegeben. Dieses Modell wird dann für eine relativ kurze Zeitspanne (typischerweise etwa 5-30 Jahre) gerechnet und simuliert so, beispielsweise für den Zeitpunkt einer CO<sub>2</sub>-Verdopplung, regionale Detailvorgänge deutlich besser. Die Ergebnisse solcher Zeitscheibenexperimente können anschließend mit regionalen Atmosphärenmodellen weiter verfeinert werden. Aufgrund der in den letzten Jahren gestiegenen Rechenkapazitäten sind auch die Auflösungen globaler Klimamodelle deutlich verbessert worden, so dass heute auch immer öfter regionale Atmosphärenmodelle ohne den Zwischenschritt der Zeitscheibe direkt mit den Ergebnissen der gekoppelten Klimamodellsimulationen angetrieben werden. Die Zeitscheiben oder die atmosphärischen Regionalsimulationen können anschließend mit anderen hochauflösenden Regionalmodellen (beispielsweise des Wasserstands oder des Seegangs) weiter untersucht werden und so die Auswirkungen der Klimaänderungen auf die entsprechenden Umweltparameter analysiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Aussagefähigkeit der regionalen Analysen natürlich auch in entscheidendem Maße von der Realitätsnähe des grobauflösenden Klimamodells sowie dem der Simulation zugrunde liegenden Emissionsszenario für die atmosphärischen Treibhausgase abhängt.

Abb. 4 zeigt als Beispiel die Änderung der bodennahen Windfelder und der signifikanten Wellenhöhe in einem Klimaänderungsexperiment, wie sie nach neueren Rechnungen für den Bereich des östlichen Nordatlantiks erwartet werden. Hierbei zeigen die Extreme der Windgeschwindigkeiten über weiten Teilen des Nordatlantiks eine Tendenz zur Abschwächung von bis zu etwa 1 m/s, wohingegen westlich von Irland eine Zunahme in der Größenordnung von etwa 1-1.5 m/s zu finden ist. Die Entwicklung des Seegangs folgt im Wesentlichen der des Windes. Diese Muster weichen deutlich von den Ergebnissen anderer Arbeiten ab, in denen zumeist eine nordwärtige Verschiebung der Sturmaktivität erwartet wurde (z.B. Knippertz et al. 2000). Dieses verdeutlicht die relativ großen Unsicherheiten bei der Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen von Extremereignissen, selbst bei Annahme ähnlicher Szenarien hinsichtlich der Entwicklung atmosphärischer Treibhausgaskonzentrationen. Einen Überblick über die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede der verschiedenen Klimamodelle hinsichtlich der Beschreibung möglicher Entwicklungen der extra-tropischen Zirkulation findet man z.B. in Rauthe et al. (2004).

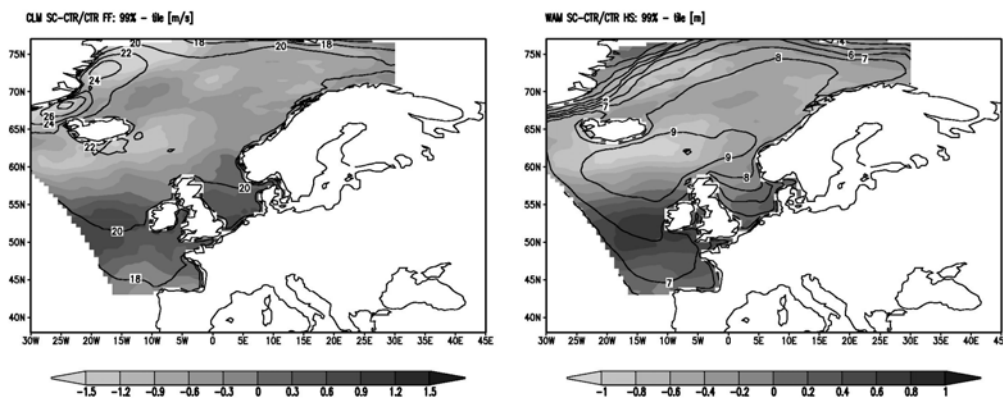


Abb. 4: Mittlere Änderung des jährlichen 99%-Perzentils (Grauwerte) der bodennahen Windgeschwindigkeit (links in m/s) und der signifikanten Wellenhöhe (rechts in m) zwischen einem Klimaszenario- (2071-2100) und einem Kontrolllauf (1961-1990). Als Isolinien sind jeweils die zugehörigen mittleren 99%-Perzentile des Kontrollexperimentes dargestellt. Die atmosphärischen Simulationen wurden mit dem Regionalmodell CLM unter Verwendung der Randwerte des globalen HadAM3 Modells innerhalb des EU-Projekts PRUDENCE durchgeführt (Rockel, pers. Mitteilung). Die Seegangssimulationen wurden mit Hilfe des WAM Modells und der Windfelder der CLM Experimente durchgeführt (Weisse und Stawarz, 2004).

Ungeachtet dieser Unsicherheiten geben die Szenarien jedoch Bilder möglicher plausibler und konsistenter Entwicklungen, die im Hinblick auf Entscheidungsfindungsprozesse im Küstenschutz hilfreich sein können. Woth (pers. Mitteilung) simulierte die Änderungen sturmbedingter Wasserstände unter Verwendung verschiedener regionaler Windfelder, die durch dynamisches Downscaling mit Hilfe unterschiedlicher regionaler Atmosphärenmodelle (angetrieben durch das gleiche globale Klimamodell) gewonnen wurden (Abb.5). Obwohl sich die Amplituden der Änderungen in Abhängigkeit der verwendeten Windfelder deutlich unterscheiden, zeigen die Simulationen prinzipielle Gemeinsamkeiten. Unabhängig vom verwendeten regionalen Atmosphärenmodell werden die größten Wasserstandsänderungen im Bereich der Deutschen Bucht erwartet. Hier treten die Änderungen in allen Simulationen aus dem Bereich des natürlichen Rauschens hervor, das mit Hilfe der oben diskutierten Rekonstruktion von Feser et al. (2001) abgeschätzt wurde.

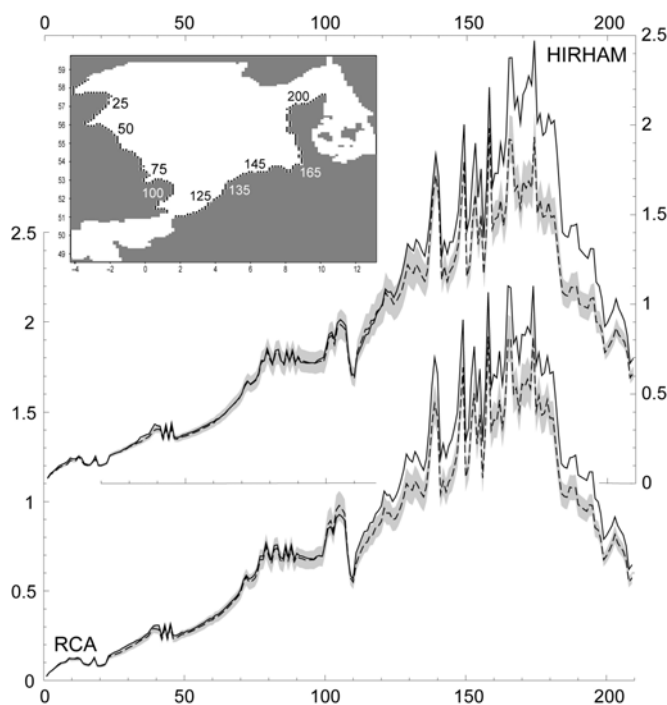


Abb. 5: Änderung der meteorologisch bedingten Extremwasserstände entlang der Nordseeküste. Dargestellt sind jeweils die mittleren jährlichen Werte der maximalen meteorologisch bedingten Anteile des Wasserstands (annual maximum surge) des Kontrolllaufs (gestrichelt) und des Klimaszenarios (durchgezogen) entlang eines Schnittes von der englischen über die niederländische und die deutsche bis hin zur dänischen Küste. Der Verlauf des Schnittes ist in der Karte in der linken oberen Ecke dargestellt. Die Kurven zeigen die Ergebnisse des regionalen Ozeanmodells TRIM3D angetrieben von zwei verschiedenen regionalen Atmosphärenmodellen: HIRHAM (oben, rechte Skala in m) und RCA (unten, linke Skala in m). Beide Regionalmodelle wurden von den gleichen globalen Atmosphärendaten für heutige (1961-1990) und zukünftige (2071-2100) Bedingungen angetrieben. Die globalen Daten entstammen Simulationen mit dem britischen HadAM3 Modell. Grau dargestellt ist der Bereich der natürlichen Variationen (90% Konfidenzintervall), wie er aus einem TRIM3D Lauf mit Hilfe der von Feser et al. (2001) rekonstruierten Windfelder abgeschätzt wurde. (Woth, pers. Mitteilung). Die Arbeiten sind Teil des EU Projekts PRUDENCE.

#### 4 Schlussbetrachtung

Klimaänderungen können im Küstenbereich, insbesondere durch die Auswirkungen langfristiger Änderungen des Sturm-, Sturmflut- und Seegangsklimas, eine besondere Herausforderung darstellen. Das Sturmklima im Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee ist im Zeitbereich von einigen Jahren bis zu einigen Jahrzehnten beträchtlichen Schwankungen unterworfen. Gerade im Bereich von Jahrzehnten werden jedoch auch die Auswirkungen möglicher anthropogen bedingter Veränderungen erwartet. Für den Küstenschutz kommt somit den Abschätzungen der natürlichen, als auch möglicher anthropogen bedingter Änderungen eine wesentliche Bedeutung zu.

Während man für den Bereich globaler Mitteltemperaturen davon ausgehen kann, dass sich die Erdatmosphäre in den vergangenen Jahren stark erwärmt hat und das mit einiger Sicherheit auch in naher Zukunft weiter tun wird, gibt es für den Bereich der Extremereignisse, insbesondere der Stürme, noch weitgehende Unsicherheiten. Im dritten IPCC Zustandsbericht wird die Situation wie folgt beschrieben: „... There is no compelling evidence to indicate that the characteristics of tropical and extra-



tropical storms have changed. ... Owing to incomplete data and conflicting analyses, it is uncertain as to whether there have been any long-term and large scale increases in the intensity and frequency of extra-tropical cyclones in the Northern Hemisphere. ..." (Houghton et al. 2001, p. 33).

Das Sturmklima im Bereich des Nordatlantiks und der Nordsee ist beträchtlichen Schwankungen unterworfen. Es ist weiterhin ungeklärt, welchen Anteil natürliche und anthropogene Prozesse an diesen Schwankungen besitzen. Für den Küstenschutz bedeutet dies jedoch keine Entwarnung. Sowohl natürliche, als auch anthropogene Änderungen können zu unerwarteten Extremereignissen mit den entsprechenden Folgen führen. Regionale Schutzkonzepte müssen daher an neueste Entwicklungen angepasst und Fortschritte im Wissenstand entsprechend beachtet werden. Die Bewertung solcher Konzepte und Maßnahmen muss letztlich jedoch anhand von Risikoeinschätzungen, gesellschaftlichen Werten und politischen Überzeugungen erfolgen. Angesichts der bestehenden Unsicherheiten muss es weiterhin Ziel globaler Schutzmassnahmen sein, anthropogene Einflüsse auf das globale Klimasystem zu vermeiden oder zumindest zu verringern, da die Folgen nicht vorhersehbar sind, eine Forderung, die sich unmittelbar aus dem Nachhaltigkeitsprinzip ergibt.

## 5 Literatur

- Alexandersson, H., T. Schmith, K. Iden, and H. Tuomenvirta, 1998: Long-term variations of the storm climate over NW Europe. *Global Atmos. Oc. System*, 6, 97–120.
- Alexandersson, H., H. Tuomenvirta, T. Schmith, and K. Iden, 2000: Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. *Climate Res.*, 14, 71–73.
- Bärring, L. and H. von Storch, 2004: Northern European storminess since about 1800. Submitted.
- Feser, F., R. Weisse, and H. von Storch, 2001: Multi-decadal atmospheric modeling for Europe yields multi-purpose data. *Eos Transactions*, 82, pp. 305, 310.
- Jacob, D. and R. Podzun, 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 63, 119–129.
- Jones, P., E. Horton, C. Folland, M. Hulme, D. Parker, and T. Basnett, 1999: The use of indices to identify changes in climatic extremes. *Climatic Change*, 42, 131–149.
- Houghton, J., Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, Eds., 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 881 pp.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437–471.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Wollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne, and M. Fioriono, 2001: The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 247–267.
- Knippertz, P., U. Ulbrich, and P. Speth, 2000: Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Climate Res.*, 15:109-122.
- Rauthe, M., A. Hense, und H. Paeth, 2004: A model intercomparison study of climate-change signals in extratropical circulation. *Int. J. Climatol.*, 24, 643-662.
- Soares, C.G., R. Weisse, J.C. Carretero, and E. Alvarez, 2002: A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European waters. In *Proc. 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 23-28 June 2002*. Norway, Oslo, 2002.

- Simmons, A. J., and J. K. Gibson, 2000: The ERA-40 Project Plan, ERA-40 Project Report Series No. 1, 63 pp., Eur. Cent. for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK.
- Schmidt, H. and H. von Storch, 1993: German Bight storms analysed. *Nature*, 365, 791.
- WASA, 1998: Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? - *Bull. Amer. Met. Soc.* 79, 741-760.
- Weisse, R., F. Feser und H. Günther, 2003: Wind- und Seegangsklimatologie 1958-2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. *GKSS 2003/10* GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Max-Planck-Str. 1, D-21502 Geesthacht, Germany, 2003, 38pp.
- Weisse, R., H. von Storch and F. Feser, 2004: Northeast Atlantic and North Sea storminess as simulated by a regional climate model 1958-2001 and comparison with observations. *J. Climate*, im Druck.
- Weisse, R. and M. Stawarz, 2004: Long-term changes and potential future developments of the North Sea wave climate. To appear in Proc. 8<sup>th</sup> Workshop of Wave Forecasting and Hindcasting, 14-21 Nov. 2004, North Shore, Oahu, USA.
- Woodworth, P.L. and D.L. Blackman, 2002: Changes in extreme high waters at Liverpool since 1768. *Int. J. Climatol.*, 22:697-714.

## **Address**

Dr. Ralf Weisse  
Prof. Dr. Hans von Storch  
GKSS Forschungszentrum  
Institut für Küstenforschung  
Max-Planck-Straße 1  
21502 Geesthacht  
Germany

E-mail: weisse@gkss.de  
storch@gkss.de