

**Entwicklung des Meeresspiegels und der
Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten:
Rückblick und Ausblick**

J. Hofstede (Referent)

Vortrag gehalten am 06.01.2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	C / 3
2	Meeresspiegelentwicklung an den deutschen Küsten	C / 4
2.1	Retrospektive	C / 4
2.2	Perspektive.....	C / 8
3	Änderungen der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten	C / 10
3.1	Retrospektive	C / 10
3.2	Perspektive.....	C / 13
4	Diskussion und Ausblick	C / 14
5	Literatur	C / 17

1 Einführung

Meeresspiegelschwankungen und Fluktuationen in Sturmfluten sind, ebenso wie Klimaänderungen, charakteristisch für unsere dynamische Welt. Neu in diesem Zusammenhang ist der anthropogene Faktor. In seinem vierten Klimabericht stellt das IPCC (2007) unter anderem fest, dass der beobachtete globale Temperaturanstieg von etwa $0,6^{\circ}\text{C}$ seit 1975 (Abb. 1) ohne menschlichen Einfluss nicht erklärbar bzw. wesentlich geringer ausgefallen wäre.

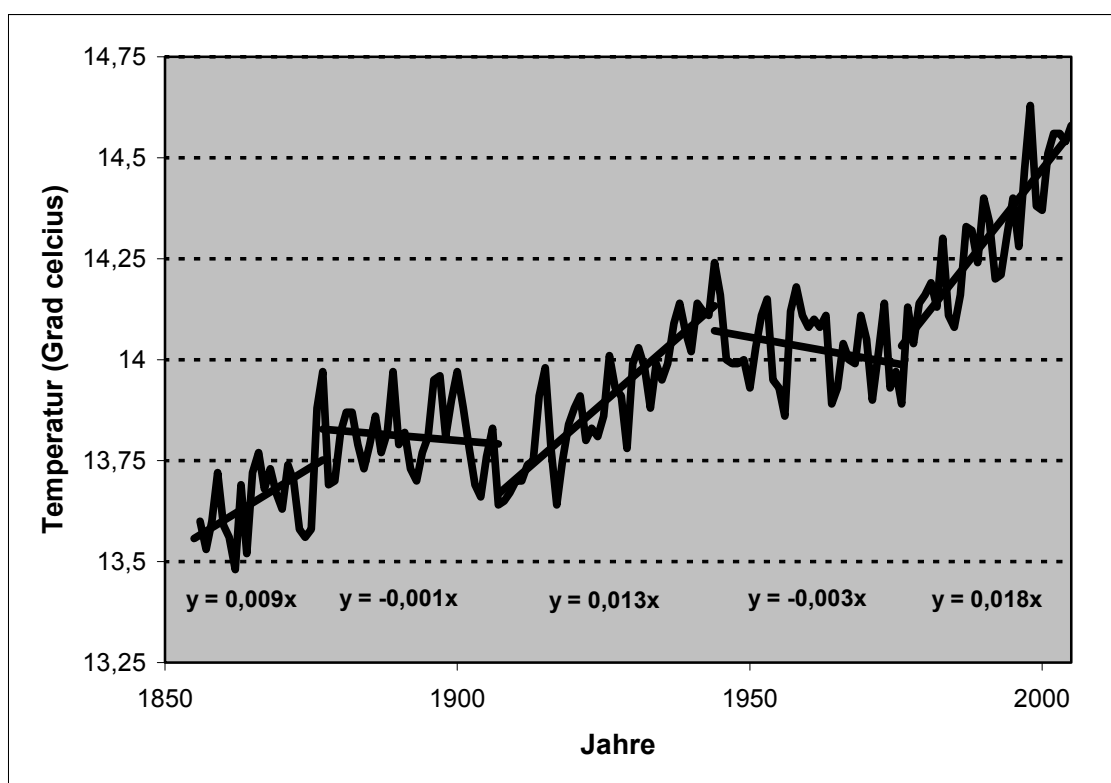


Abb. 1: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur seit 1856 mit linearen Regressionen für unterschiedliche Zeiträume (aus HOFSTEDE, 2007)

Dieser Temperaturanstieg muss letztendlich zu einem Anstieg des Meeresspiegels sowie zu Änderungen der Sturmfluten (Intensität und Häufigkeit) an den deutschen Küsten führen. Für den Küstenschutz als staatliche Vorsorge stellt sich insbesondere die Frage nach der zeitlichen Entwicklung und dem Ausmaß dieser Änderungen. Einer objektiven, wissenschaftlich untermauerten Betrachtung kommt dabei eine zentrale

Bedeutung zu, dies auch in Anbetracht von Aufmachern in den Medien wie „Küstenstädte könnten noch in diesem Jahrhundert versinken“ oder „Uno-Experten sagen Horror-Klima voraus“ (Spiegel-Online: 24.03.06 resp. 02.02.07).

In diesem Beitrag werden die Entwicklungen des Meeresspiegels und der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten in der Retrospektive wie in der Perspektive dargestellt. Dabei wird unter anderem der Frage nachgegangen, ob der anthropogene Temperaturanstieg seit etwa 1975 sich in den Signalen des Meeresspiegels und der Sturmflutwasserstände an den Deutschen Küsten bereits bemerkbar macht. In einem Ausblick wird auf die Konsequenzen für den Küstenschutz eingegangen.

2 Meeresspiegelentwicklung an den deutschen Küsten

2.1 Retrospektive

Um ein möglichst langfristiges und repräsentatives Bild der regionalen Meeresspiegelentwicklung zu erhalten wurden die Jahreshauptwerte von 17 deutschen und niederländischen Pegeln ermittelt und analysiert (Abb. 2). Durch die hohe Zahl der Pegelstationen wurde zudem verhindert, dass lokale und zeitlich befristete Anomalien sowie menschliche Eingriffe die Ergebnisse signifikant verfälschen. Dreizehn der Pegel registrieren seit mindestens 75 Jahren Wasserstände, 4 Langzeitpegel seit mindestens 150 Jahren. Die Pegelstandorte lassen sich in vier Regionen aufteilen: (1) Ostseeküste Schleswig-Holstein, (2) Nordseeküste Schleswig-Holstein, (3) niederländisches Wattenmeer, und (4) niederländische Westküste. Für alle Pegel wurden die jährlichen Mittelwasserstände (Ostsee) bzw. Tidehalbwasserstände (Nordsee) bis 2005 ermittelt und in MS-EXCEL eingegeben. Diese Wasserstandskennwerte kennzeichnen in etwa den mittleren Meeresspiegel. Mit dem Tabellenkalkulationsprogramm wurden die Daten einer einfachen Trendanalyse unterzogen.

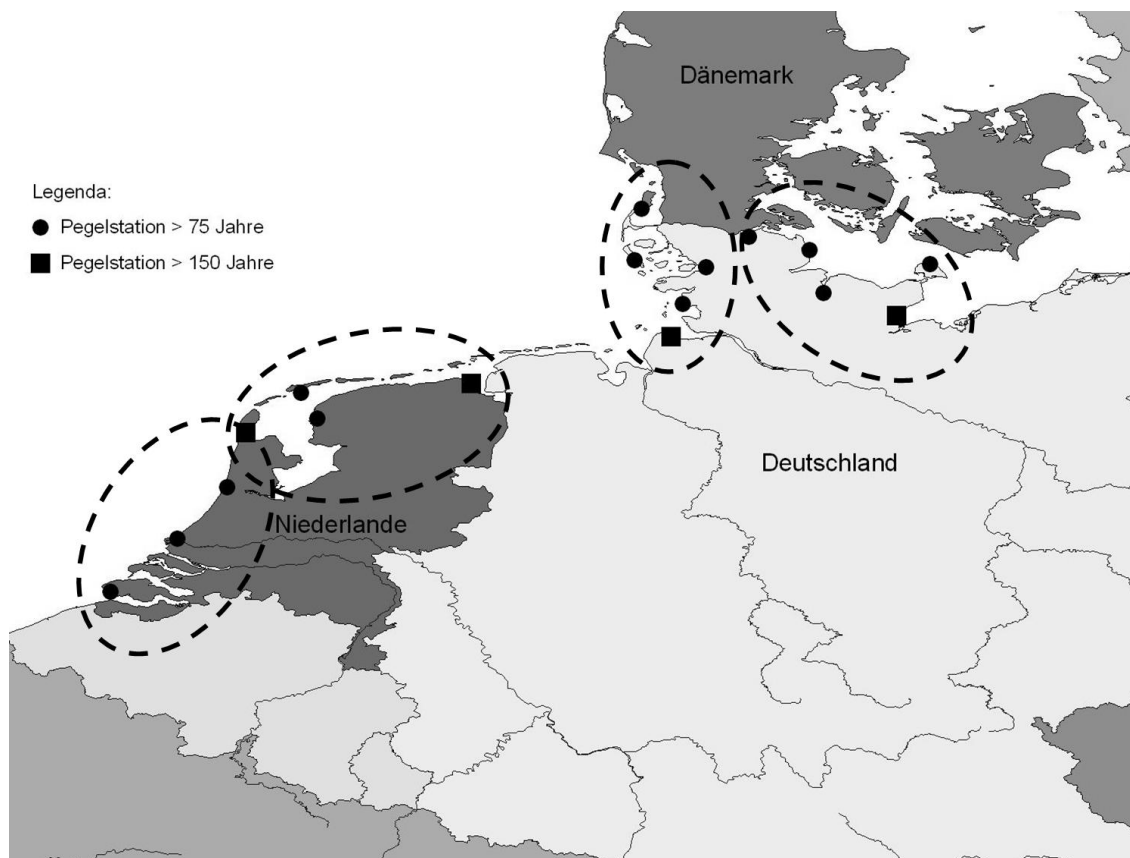


Abb. 2: Übersichtskarte mit den benutzten Langzeitpegeln

Beispielhaft dargestellt in Abbildung 3 ist die Meeresspiegelentwicklung für die fünf untersuchten Pegel an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein seit 1925. An den Pegeln sind geringfügige Unterschiede in den jährlichen Mittelwasserständen und deren Entwicklungen erkennbar. Perioden mit größeren Unterschieden, zum Beispiel in den 70er Jahren, wechseln sich mit Phasen mit nur geringen Abweichungen zwischen den einzelnen Pegelstationen wie zu Anfang der 50er Jahre ab. Die nur geringen Unterschiede in den einzelnen Kurven sind ein klarer Hinweis dafür, dass menschliche Eingriffe in der Nähe der jeweiligen Pegelstationen auf die Meeresspiegelentwicklung nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben. Deutlich erkennbar ist ein gemeinsamer positiver Trend im mittleren Meeresspiegel.

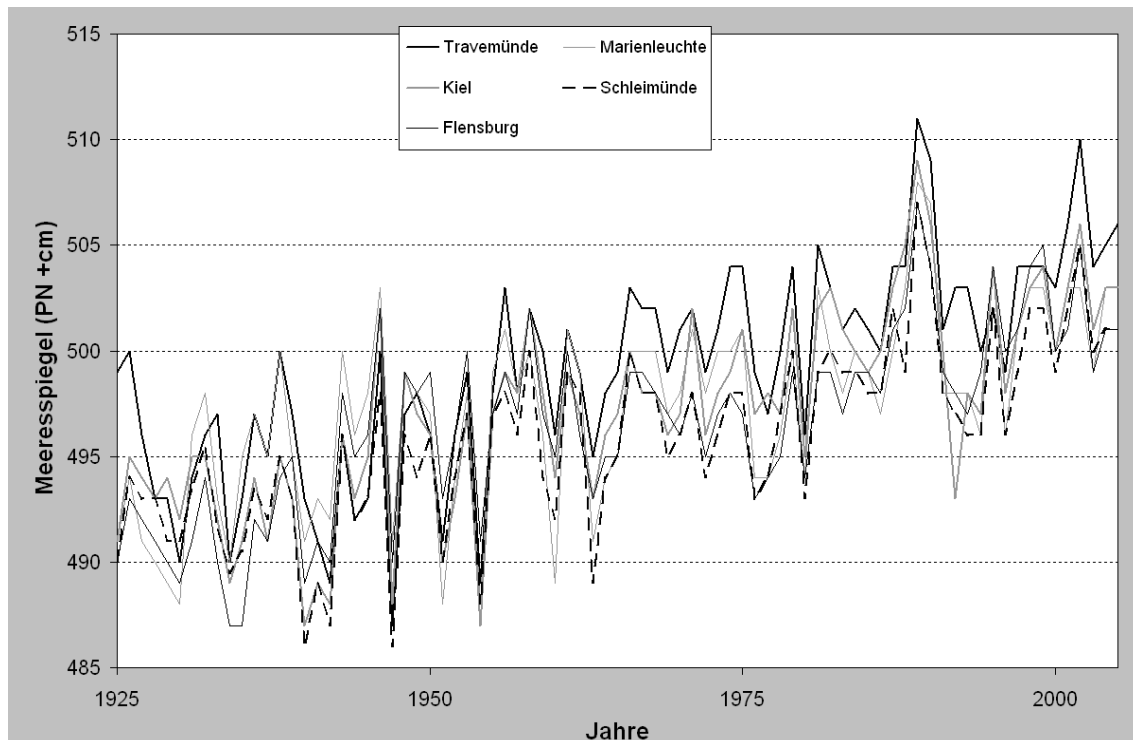


Abb. 3: Entwicklung des mittleren Meeresspiegels seit 1925 an fünf deutschen Ostseepiegeln

In Abbildung 4 ist die Entwicklung des mittleren Meeresspiegels seit 1900 für die vier untersuchten Regionen dargestellt. Hierzu wurde aus den Jahreswerten aller Pegel einer Region der Mittelwert gebildet. Für eine klare graphische Darstellung wurden den regionalen Kurven jeweils unterschiedliche Null-Horizonte zugeordnet. Zusätzlich sind die durch die Jahresmittelwerte errechneten linearen Regressionen abgebildet. Mit Ausnahme der Nordseeküste von Schleswig-Holstein ($R^2 = 0,37$) zeigen alle Kurven einen signifikanten linearen Trend ($R^2 = 0,63$ bis $0,82$). Die errechneten Trends liegen für die schleswig-holsteinische Ostsee- und Nordseeküste sowie für das niederländische Wattenmeer einheitlich zwischen $0,13$ und $0,14$ cm/J. Für die niederländische Westküste (Holland) liegt der Trend mit $0,22$ cm/J deutlich höher. Auffällig in allen Kurven sind die stark herabgesetzten Mittelwerte der Jahrgänge 1947 und 1996. Diese Jahre wurden durch stabile Hochdrucksysteme über Skandinavien mit vorherrschenden Ostwinden gekennzeichnet. Beides, hoher Luftdruck und Ostwinde (nur an der Nordseeküste), führen zu abgesenkten Wasserständen. Im Winter 1995/1996 war die Ostsee zum letzten Mal großflächig zugefroren.

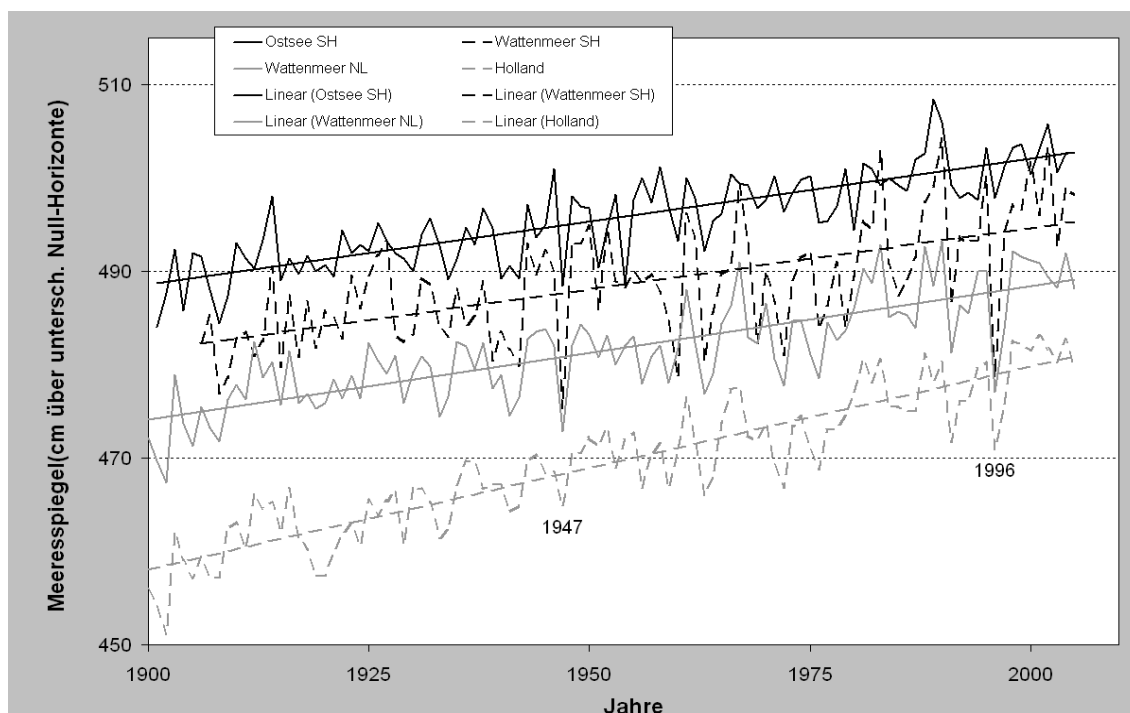


Abb. 4: Entwicklung des mittleren Meeresspiegels seit 1900 in den vier Regionen (Abb. 2) mit den jeweiligen linearen Regressionen

Abbildung 5 zeigt die Meeresspiegelentwicklung an vier Langzeitpegeln Travemünde, Cuxhaven, Delfzijl und Den Helder seit 1850 sowie die über die vier Pegel gemittelte Entwicklung. Auch hier wurden zur verbesserten Darstellung unterschiedliche Nullhorizonte für die einzelnen Pegelstationen gewählt. Die zusätzlich dargestellte polynomi-sche Funktion durch die Mittelwertkurve zeigt auf, dass sich der mittlere Meeresspiegel zwischen 1850 und etwa 1885 kaum änderte. Die Aussage, wonach der Meeresspiegel sich seit mehreren Jahrhunderten kontinuierlich anhebt, lässt sich nicht halten (siehe hierzu auch HOFSTEDÉ, 1991). Erst einige Jahrzehnte nach Ende der sog. „Kleinen Eiszeit“ um die Mitte des 19ten Jahrhunderts fing der Meeresspiegel an, (erneut) zu steigen. Seitdem erhöht er sich an den vier Langzeitpegeln um durchschnittlich 0,17 cm pro Jahr. Auch hier wird ein gemeinsames Signal klar erkennbar, obwohl die Pegelstationen um bis zu 450 km auseinander und in zwei Randmeeren liegen. Das ähnliche Signal an den vier Pegelstationen weist daraufhin, dass auch hier menschliche Eingriffe in der Nähe der jeweiligen Pegel auf die mittlere Meeresspiegelentwicklung keine signifikante Rolle gespielt haben.

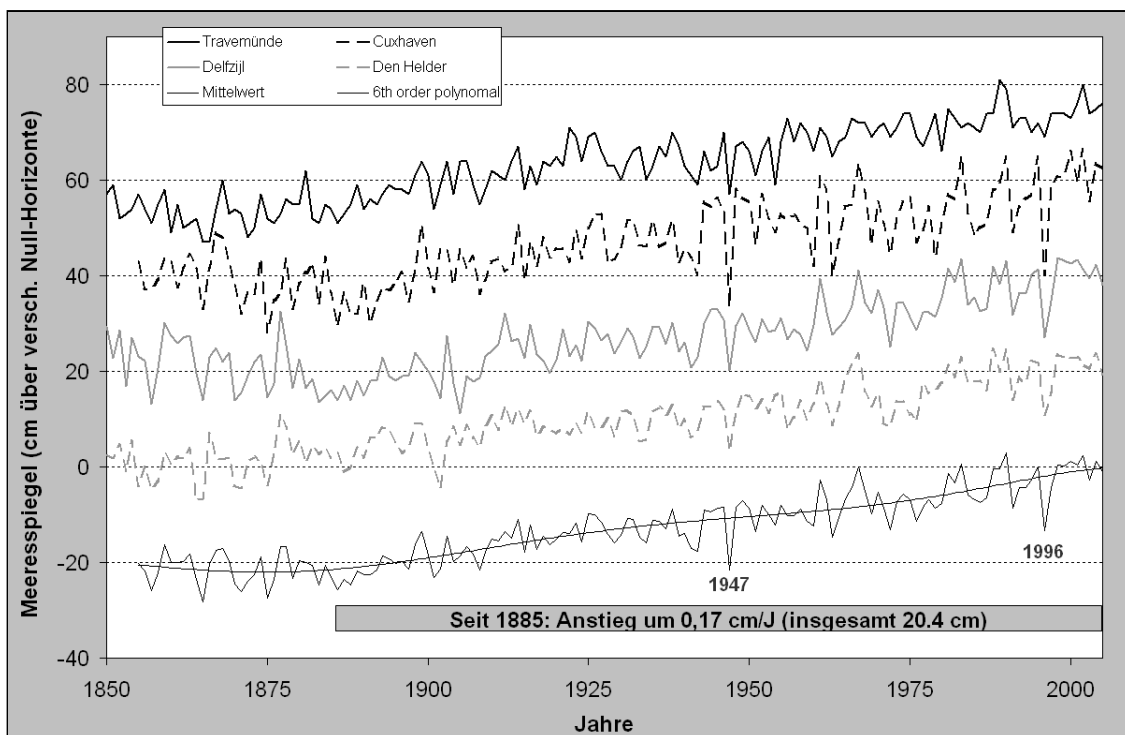


Abb. 5: Entwicklung des mittleren Meeresspiegels seit 1850 an vier Langzeitpegeln sowie deren Mittelwert

2.2 Perspektive

Aussagen zum künftigen globalen Meeresspiegelanstieg finden sich im vierten Klimabericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007). In dem Bericht werden Werte zwischen 18 und 59 cm für den zu erwartenden mittleren globalen Anstieg bis 2100 angegeben. Die große Streubreite erklärt sich unter anderem aus den verschiedenen Annahmen zum künftigen menschlichen Handeln bzw. zum künftigen Ausstoß von sog. Treibhausgasen. Nicht berücksichtigt (wegen fehlendem wissenschaftlichen Konsens und fehlender Erkenntnisse) sind CO_2 -Rückkoppelungen und das dynamische Verhalten der großen Landeiskappen (Grönland und Antarktis). Beschleunigtes Abschmelzen der Eiskappe auf Grönland könnte nach IPCC die Werte um 10 bis 20 cm zusätzlich anheben, wobei im vierten Klimabericht höhere Werte nicht ausgeschlossen werden. Neuere Untersuchungen deuten daraufhin, dass die Landeiskappe auf Grönland tatsächlich schneller an Volumen verliert als vom IPCC angenommen (SHEPARD and WINGHAM, 2007). Dabei wird Grönland auch nach 2100 zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Falls die Temperaturen über Jahrhunderte 2 bis 5 Grad Celsius

höher blieben, könnte Grönland (in diesen Zeitskalen) komplett abschmelzen. Zuletzt war Grönland vor etwa 125.000 Jahren eisfrei; damals lag der globale Meeresspiegel um etwa 4 bis 6 m höher als heute.

Zeitnah zur Veröffentlichung des vierten IPCC-Klimaberichtes wurden abweichende Szenarien publiziert (siehe auch Kap. 4). So hat RAHMSTORF (2007) eine Korrelation zwischen dem Temperaturanstieg ($0,6^{\circ}\text{C}$) und Meeresspiegelanstieg (16 cm) seit 1880 hergestellt und diese auf die relativ gut belastbaren Temperaturprognosen des IPCC für das Jahr 2100 angewandt. Je nach Temperaturszenario ergibt sich demnach ein Meeresspiegelanstieg zwischen 0,5 m und 1,4 m bis zum Ende dieses Jahrhunderts. Diese Methode berücksichtigt nicht die komplexen (nicht-linearen) Rückkoppelungsmechanismen zwischen Temperatur und Meeresspiegel, wie zum Beispiel das dynamische Verhalten der Eiskappen (HORTON ET AL., 2008). Deshalb kann sie nur eine grobe Annäherung darstellen.

Regionale Aussagen zum Meeresspiegelanstieg werden im IPCC-Bericht nicht getroffen. Das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg hat 2006 auf Basis eigener Berechnungen eine Broschüre mit Aussagen zum künftigen Meeresspiegelanstieg veröffentlicht. Demnach könnte der globale Meeresspiegel aufgrund der Erwärmung der Ozeane und durch Abschmelzen des Inlandeises bis zum Jahre 2100 um 0,29 bis 0,37 m ansteigen. Dem globalen Anstieg überlagern sich Änderungen durch die Ozeanzirkulation, die sowohl positiv als auch negativ sein können. Für den Bereich der Nordsee wird in der Konsequenz ein Gesamtanstieg von etwa 0,5 m angegeben. Änderungen des Salzgehaltes in den Ozeanen werden als weiterer Faktor für regional unterschiedliche Anstiegsraten erwähnt. Insbesondere in der Nordpolregion könnte dies zu überproportionalen Anstiegswerten von bis zu einem Meter führen, während in der Konsequenz in Äquatornähe sogar mit einer leichten Absenkung des Meeresspiegels zu rechnen wäre.

Das Königlich Niederländische Meteorologische Institut rechnete im Jahre 2006 für die niederländische Küste mit 80 % Wahrscheinlichkeit mit einem Anstieg zwischen 0,35 und 0,85 m bis 2100. Hierin sind die langfristige Landsenkung und Änderungen im regionalen Windklima berücksichtigt. Im Jahre 2008 hat die niederländische Delta-Kommission als Grundlage für die Ermittlung von möglichen Anpassungsmaßnahmen

an den Klimawandel sog. Obergrenzenszenarios („worst-case“) definiert. Sie legt für die niederländische Nordseeküste Anstiegswerte von 0,55 bis 1,20 m bis zum Jahre 2100 zu Grunde.

Weitere Faktoren, die den Meeresspiegelanstieg an den deutschen Küsten beeinflussen, sind die tektonische Landsenkung (siehe oben) sowie Änderungen in der Tidedynamik (Nordseeküste). Auswertungen der Landesvermessungen des letzten Jahrhunderts belegen eine lokal unterschiedliche tektonische Landsenkung zwischen 0 und 10 cm pro Jahrhundert an den Küsten. Untersuchungen an der TU Hannover (HOYME AND ZIELKE, 2001) deuten darauf hin, dass das mittlere Tidehochwasser an der deutschen Nordseeküste überproportional, das mittlere Tideniedrigwasser dagegen unterproportional zum mittleren Meeresspiegelanstieg zunehmen könnte. In der Konsequenz wäre mit einer starken Zunahme des Tidenhubes zu rechnen.

Schließlich muss darauf hingewiesen werden, dass der Meeresspiegelanstieg nicht linear, sondern mit der Zeit zunehmend erfolgen wird. Form und Ablauf sind derzeit unbekannt; eine Beschleunigung ist noch nicht erkennbar (siehe hierzu Kap. 4).

3 Änderungen der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten

3.1 Retrospektive

Entgegen dem Meeresspiegelanstieg zeigen die Entwicklungen der Sturmflutwasserstände regional stark unterschiedliche Verläufe. Dies hängt in erster Linie mit der unterschiedlichen Exposition der Küsten zu den Stürmwindrichtungen zusammen. Eine Verlagerung der Sturmzugbahnen kann an unterschiedlich exponierten Küsten durchaus gegenläufige Tendenzen in den Sturmwasserständen bewirken. Im Hinblick auf die Fokussierung auf die deutschen Küsten wurden daher nur die Pegel Travemünde (Ostseeküste) sowie Husum und List (Nordseeküste) analysiert; dies trotz möglicher Verfälschungen an einzelnen Pegelstationen durch menschliche Eingriffe.

Die jährliche Verweildauer von Sturmwasserständen an einer Pegelstation stellt einen guten Indikator für die lokale Sturmflutintensität (Häufigkeit und Dauer) dar. In Abbildung 6 ist die jährliche Verweildauer von Sturmwasserständen (höher als 2 m über Normal Null) am Pegel List auf Sylt seit 1900 dargestellt. Auffällig sind die großen Schwankungen in den Jahreswerten, die mit den auslösenden meteorologischen Prozessen zusammenhängen. Trotz dieser jährlichen Schwankungen zeigt die eingezeichnete polynomische Annäherungsfunktion auf, dass die Dauer von Sturmflutwasserständen an der Nordseeküste von Schleswig-Holstein von etwa 1910/20 bis um 1990 kontinuierlich zunahm. Danach deutet sich eine Beruhigungsphase an, die allerdings im Hinblick auf eine statistische Signifikanz noch zu kurz ist. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nicht für den säkularen Meeresspiegelanstieg korrigiert wurde. Eine solche Korrektur würde zu leicht verringerten Anstiegstendenzen führen.

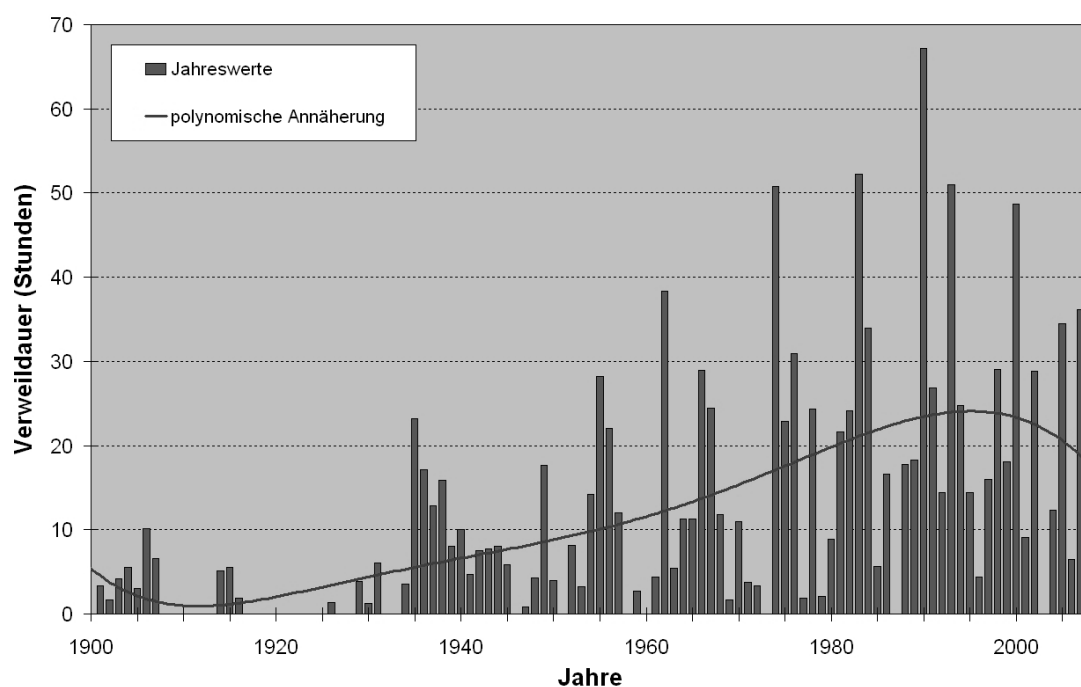


Abb. 6: Entwicklung der jährlichen Verweildauer von Sturmwasserständen (> NN +2 m) am Pegel List seit 1900.

Eine begrenzt ähnliche Entwicklung zeigen die in Abbildung 7 dargestellten Jahreshöchstwasserstände am Pegel Husum seit 1868 – als Indikator für die Höhe der Sturmfluten – auf. Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, unterliegen die Jahreshöchstwasserstände in Husum seit Anfang der Aufzeichnungen im Jahre 1868 einem stark ansteigen-

den Trend. Um die Entwicklung der Sturmfluthöhen nachzuzeigen, müsste dieser Trend um den säkularen Meeresspiegelanstieg reduziert werden. Dem mit der linearen Regression dargestellten Trend aufgesetzt ist eine durch die polynomische Annäherungsfunktion angedeutete zyklische Entwicklung mit einem letzten Maximum um 1990. Auch dieser Indikator weist also ab Anfang der neunziger Jahre auf eine Beruhigung der Sturmflutintensität an der Nordseeküste von Schleswig-Holstein hin.

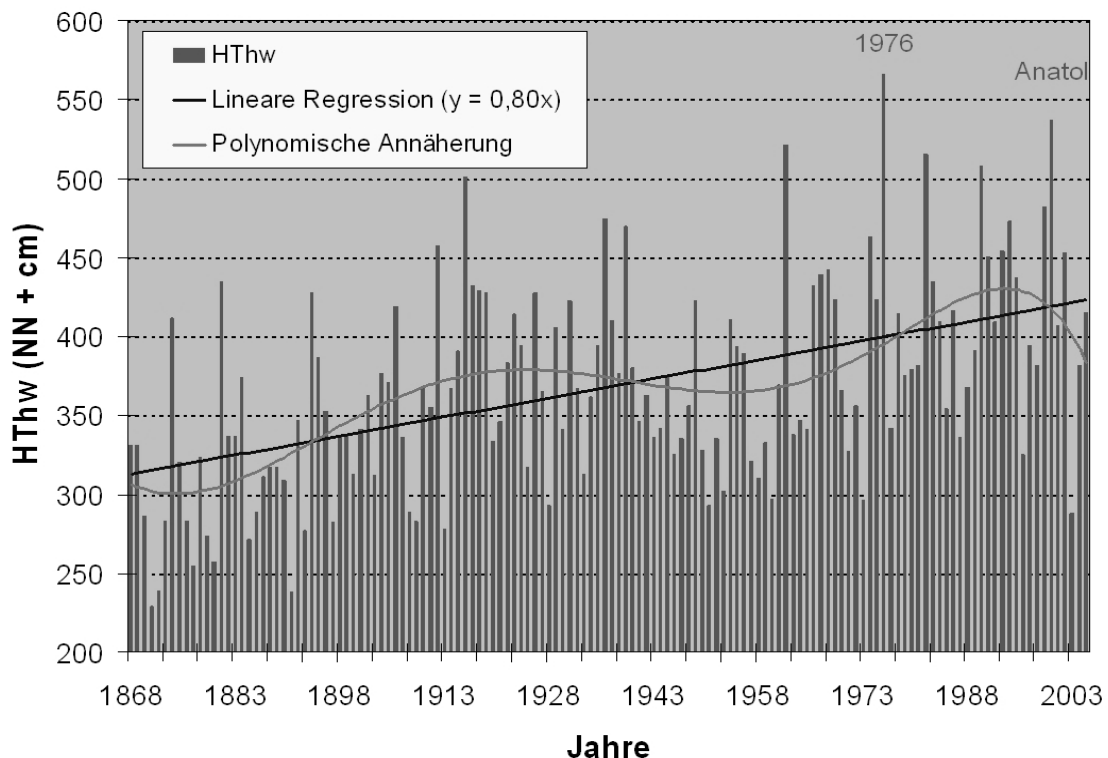


Abb. 7: Entwicklung der Jahreshöchstwasserstände am Pegel Husum seit 1868.

Aus oben genannten Gründen nicht vergleichbar mit der Entwicklung an der Nordseeküste ist die Entwicklung der Jahreshöchstwasserstände an der Ostseeküste von Schleswig-Holstein, wie beispielhaft in Abbildung 8 für Pegel Travemünde seit 1826 dargestellt. Hier wird das Signal vom singulären Hochwasserereignis im Jahre 1872 dominiert. Der generelle leichte Anstieg in den Jahreshöchstwerten erklärt sich mit dem säkularen Meeresspiegelanstieg seit etwa 1885 (Abb. 5). Insgesamt ist über den gesamten Zeitraum kein signifikanter Trend erkennbar. Eine Auswertung der Sturmwasserstände an der Pegelstation Warnemünde durch BECKMANN UND TETZLAFF (1999) zeigt ähnliche Ergebnisse.

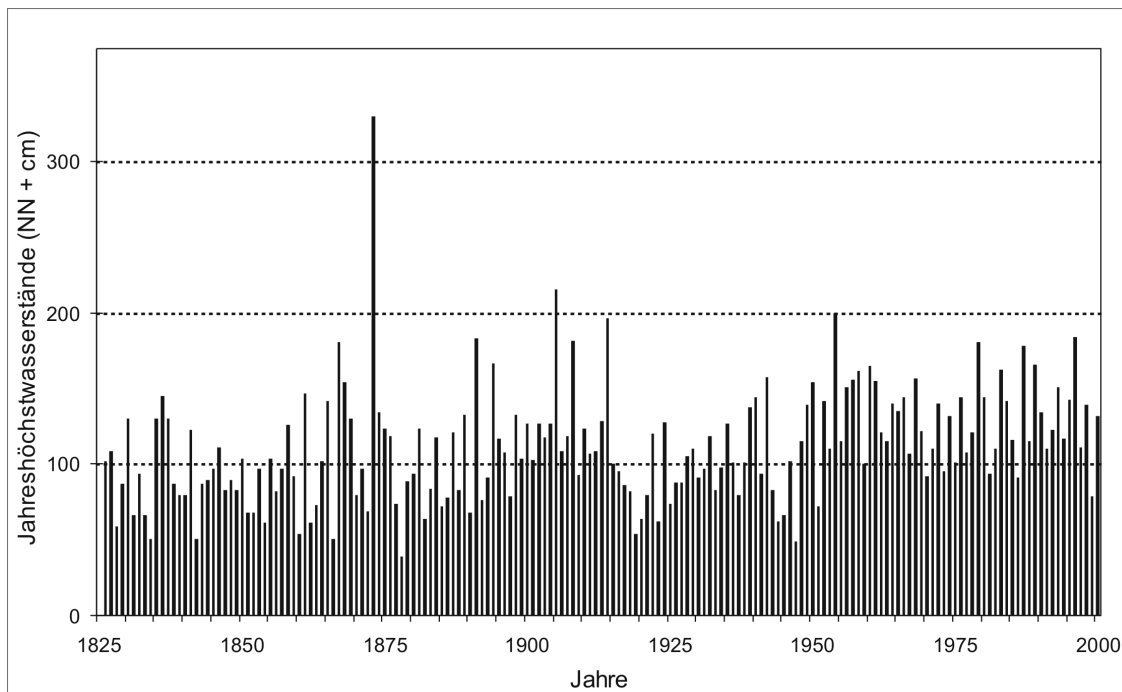


Abb. 8: Entwicklung der Jahreshöchstwasserstände am Pegel Travemünde seit 1826.

3.2 Perspektive

Der vierte UNO-Klimabericht (IPCC, 2007) enthält kaum Aussagen bezüglich künftiger Sturmflutwasserstände. Es wird lediglich eine Verlagerung der Sturmzugbahnen mit nicht näher beleuchteten Änderungen im Windklima in Richtung Polen projiziert. Der im letzten halben Jahrhundert beobachtete Trend würde sich entsprechend fortsetzen. Das Forschungszentrum GKSS Geesthacht hat für die Nordseeküste Modellrechnungen zu künftigen Sturmflutwasserständen veröffentlicht (WOTH ET AL., 2006, GROSSMANN ET AL., 2006). Demnach könnten die Sturmflutwasserstände am Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zum Ende des letzten Jahrhunderts in der inneren Deutschen Bucht um maximal 40 cm ansteigen, in der Tideelbe bis 63 cm (St. Pauli). Die Aussagen sind allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet, und sie sind mit den bisher beobachteten Windstauwerten (bis maximal 4,5 m) und der bisherigen Entwicklung der Sturmflutwasserstände (zum Beispiel Abb. 7) in Relation zu setzen. Für die deutsche Ostseeküste hat die Wissenschaft bisher keine Sturmflutszenarien veröffentlicht. Die Beobachtungen aus der Vergangenheit lassen keine Aussagen zur künftigen Entwicklung zu.

4 Diskussion und Ausblick

Seit etwa 1885 unterliegt der Meeresspiegel an den untersuchten Pegeln einem linearen Trend. Aus den Abbildungen 4 und 5 geht klar hervor, dass sich dieser Trend in den letzten Jahrzehnten bzw. Jahren nicht geändert hat. Demnach hat sich zumindest an den deutschen und niederländischen Küsten der seit Mitte der siebziger Jahre beobachtete anthropogene Temperaturanstieg bisher nicht im hydrologischen Signal bemerkbar gemacht. Vermutlich hängt dies mit der Trägheit der Ozeane und Landeiskappen zusammen, weshalb sich der anthropogene Teil des Temperaturanstieges erst mit großer Verzögerung im Meeresspiegelsignal zeigt. Entsprechend setzte der moderne Meeresspiegelanstieg um 1885 und damit etwa drei bis vier Jahrzehnte nach Ende der sog. „Kleinen Eiszeit“ ein. Allerdings heißt dies nicht, dass der Meeresspiegelanstieg sich nicht beschleunigen wird. Spätestens in einigen Jahrzehnten muss nach allen publizierten Modellrechnungen mit Anstiegswerten von 0,3 bis 0,5 cm/J gerechnet werden, d. h. mit einer Verdoppelung bis Verdreifachung der heutigen Anstiegswerten. Zum Ende des Jahrhunderts könnten diese Werte nochmals zunehmen.

RAHMSTORF (2007) hat – im Gegensatz zur obigen Darstellung – nach Auswertung von Satelliten- und Pegelmessungen des Meeresspiegels auf eine deutliche Beschleunigung der globalen Anstiegswerten bereits seit 1993 hingewiesen. Er sieht dies als Hinweis dafür, dass die oberen Vorhersagewerte des IPCC mit 59 cm bis 2100 eher als noch zu niedrig eingestuft werden müssen. Allerdings weist er darauf hin, dass die Stichprobe von 13 Jahren (1993 – 2005) für Extrapolationen über längere Zeiträume eigentlich zu kurz ist. Die Abbildung 9 mag dies verdeutlichen. Dargestellt ist die über den 17 deutschen und niederländischen Pegeln gemittelte Entwicklung des mittleren Meeresspiegels für drei Zeiträume: 1993 bis 2005, 1988 bis 2005, und 1998 bis 2005. Demnach stieg der Meeresspiegel für den Zeitraum 1993 bis 2005 im Schnitt um 0,45 cm pro Jahr an, in etwa wie von RAHMSTORF (2007) für diesen Zeitraum errechnet. Allerdings verringert sich der mittlere Anstiegswert auf nur noch 0,12 cm pro Jahr, wenn die 18-jährige Stichprobe (1988 – 2005) zugrunde gelegt wird. Nimmt man den kürzesten Zeitraum, erhält man sogar einen negativen Trend von -0,18 cm pro Jahr. Dies zeigt die übergeordnete Bedeutung von möglichst langen Zeitreihen für statistische Analysen und Bewertungen auf.

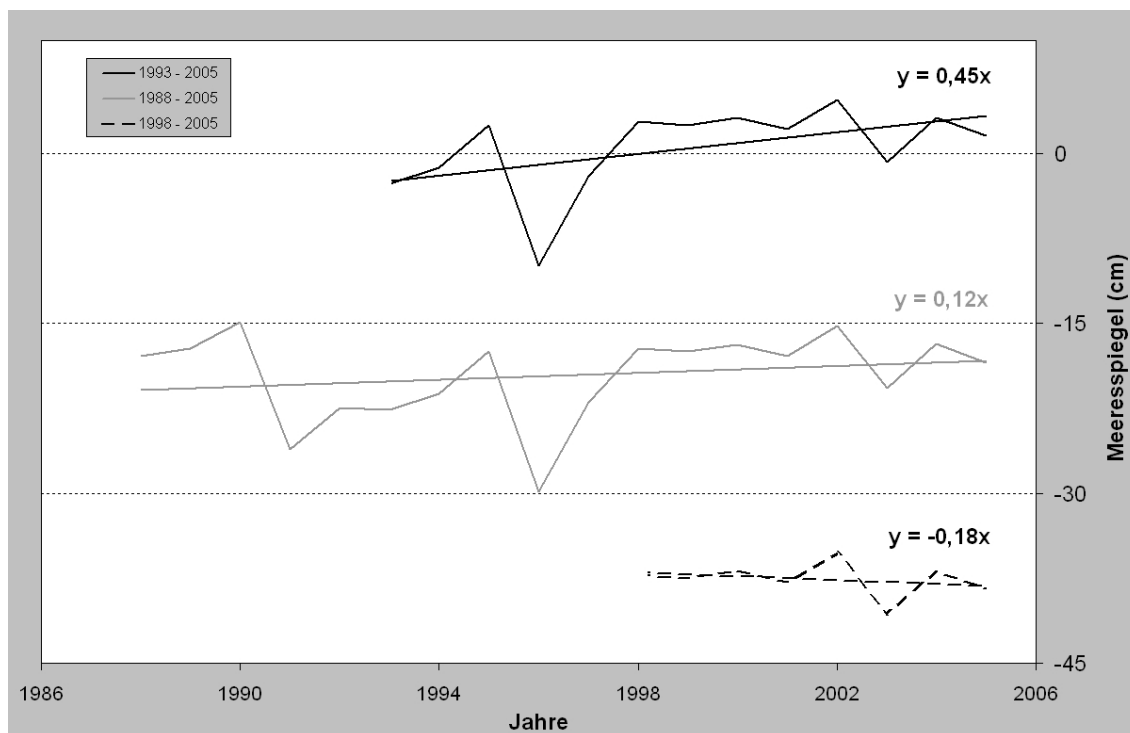


Abb. 9: Entwicklung des mittleren Meeresspiegels (Mittelwerte aus 17 Pegeln, Abb. 2) für unterschiedliche Zeiträume.

Eine Gegenüberstellung der Temperatur- und Sturmflutentwicklung an den deutschen Küsten zeigt keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen beiden Parametern auf. An keinem der untersuchten Pegel (Abb. 6 bis 8) konnte ein Trendwechsel zu Anfang der anthropogenen Beeinflussung des Klimas festgestellt werden. Die in den Medien (und von manchen Wissenschaftlern) nach jeder schweren Sturmflut gerne suggerierte Korrelation zwischen anthropogenem Klimawandel und Zunahme der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten ist somit in den Daten bisher nicht nachweisbar bzw. wird durch diese widerlegt. Wegen der kleinräumigen, oft nicht-linearen (und im Einzelnen noch nicht bekannten) Prozess-Response-Mechanismen bei der Entstehung von Sturmfluten könnte eine globale Temperaturzunahme sogar zu einer Verringerung der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten führen. Die von WOTH ET AL. (2006, Kap. 3.2) ermittelte mögliche Zunahme der Sturmflutwasserstände um maximal 40 cm in der inneren Deutschen Bucht zu Ende dieses Jahrhunderts ist zum Beispiel deutlich geringer als die Zunahme der Jahreshöchstwasserstände am Pegel Husum seit 1900 (Abb. 8). In diesem Zusammenhang sei allerdings darauf hinzuweisen, dass der Meeres-

spiegelanstieg automatisch zu höheren Sturmflutwasserständen führt, da deren Ausgangshöhe entsprechend zunimmt.

Hinsichtlich des Küstenschutzes ist die Situation ernst und sollte nicht unterbewertet werden. Die Küsten und Küstenschutzanlagen werden künftig erhöhten Belastungen ausgesetzt sein, d. h., mittelfristig muss sich der Küstenschutz auf zunehmende Anstrengungen einstellen. Auf der Basis der neuesten IPCC-Werte ist eine Anpassung der heutigen Strategie für den Küstenhochwasserschutz in Schleswig-Holstein nicht erforderlich. Der im Generalplan Küstenschutz aus dem Jahre 2001 festgelegte „Klimazuschlag“ von 50 cm (Nordsee und Elbe) bzw. 30 cm (Ostsee) bei der Bemessung der Deichverstärkungen an der Nordsee und in der Elbe hat sich als vorausschauende Strategie bestätigt (MLR, 2001). Die im Generalplan festgeschriebenen regelmäßigen Sicherheitsüberprüfungen auf Basis neuester Erkenntnisse und mit modernsten Verfahren gewährleistet darüber hinaus ein zeitnahes und flexibles Reagieren auf künftige Entwicklungen. Es ist somit möglich, den Schutz der Küsten auch langfristig auf dem heutigen Niveau zu gewährleisten. Für die Küstensicherung (Schutz vor Landabbruch) ist eine differenzierte Betrachtung nötig, da der Abbruch insbesondere von der jährlichen Meeresspiegelanstiegsrate sowie einer möglichen Änderung der Sturmflutintensität (Häufigkeit und Stärke) abhängt. Grundsätzlich nimmt der Küstenabbruch mit erhöhten Anstiegsraten zu. Ab wann der Meeresspiegel verstärkt ansteigen wird, kann nicht vorhergesagt werden – derzeit ist keine Beschleunigung feststellbar (Abb. 4 und 5). Es ist jedoch zu bedenken, dass eine Meeresspiegelanstiegsrate von 0,3 bzw. 0,5 cm pro Jahr bereits eine Verdoppelung bzw. Verdreifachung der heutigen Rate darstellt. In der Konsequenz muss spätestens in einigen Jahrzehnten mit verstärktem Küstenabbruch gerechnet werden – dann auch an Stellen, die heute stabil sind. Hinsichtlich dieser Herausforderung ist es wichtig, rechtzeitig Überlegungen über mögliche Anpassungsstrategien anzustellen. In Anbetracht dieses Fazits behält die Schlussbemerkung des Generalplanes Küstenschutz: integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein (MLR 2001): „Der Küstenschutz wird somit niemals enden“, nach wie vor seine Gültigkeit.

5 Literatur

- BECKMANN, B.-J.; TETZLAFF, G. (1999): *Veränderungen in der Häufigkeit von Sturmwasserständen an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns und deren Ursachen*. In: Die Küste, H. 61, pp. 73-88.
- GROSSMANN, I.; WOTH, K.; VON STORCH, H. (2006): *Localization of global climate change: storm surge scenarios for Hamburg in 2030 and 2085*. In: Die Küste, H. 71, pp. 169-182.
- HOFSTEDÉ, J.L.A. (1991): *Sea level rise in the Inner German Bight (Germany) since AD 600 and its implications upon tidal flats geomorphology*. In: From the North Sea to the Indian Ocean. Ed. by H. Brückner; U. Radtke. Franz Steiner Verlag, Stuttgart, pp. 11-27.
- HOFSTEDÉ, J.L.A. (2007): *Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmfluten: ist der anthropogene Klimawandel bereits sichtbar?* In: Coastline Reports, H. 9, pp. 139-148.
- HOYME, H.; ZIELKE, W. (2001): *Impact of climate changes on wind behaviour and water levels at the German North Sea coast*. In: Estuarine, Coastal and Shelf Sciences, Vol. 53, pp. 451-458.
- HORTON, R.; HERWEIJER, C.; ROSENZWEIG, C.; LIU, J.; GORNITZ, V.; RUANE, A.C. (2008): *Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method*. In: Geophysical Research Letters, Vol. 35, L02715, doi: 10.1029/2007GL032486.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007): *Climate Change 2007: the Physical Science base, summary for policy makers*. <<http://www.ipcc.ch>>.
- MLR (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE RÄUME DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN, 2001): *Generalplan Küstenschutz – integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein*. Landesregierung Schleswig-Holstein, Kiel: 76 S. ISSN 0935-4123.
- RAHMSTORF, S. (2007): *A semi-empirical approach to projecting future sea level rise*. Science, Vol. 315, pp. 368-370.
- SHEPARD, A.; WINGHAM, D. (2007): *Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets*. In: Science, Vol. 315, pp. 1529-1532.
- WOTH, K.; WEISSE, R.; VON STORCH, H. (2006): *Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models*. In: Ocean Dynamics, doi: 10.1007/s10236005-0024-3.