



Veränderung der Seegangsbedingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung

Impact of Climate Change on the Wave Conditions in the Estuaries of Jade and Weser

Stephan Mai & Claus Zimmermann

Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Germany

Abstract

While lots of research on the consequences of climate change was carried out with respect to the change of water levels and wind in the German coastal zone only few studies analysed the impact on waves and wave statistics so far. This may relate to the fact that no long-term records of wave parameters are available. However the knowledge of changes in wave load is essential when assessing the safety of coastal defence systems. Within this study the consequences of a scenario of climate change on the wave climate in the estuaries of Jade and Weser during storm surges are analysed using numerical modelling. As climate scenario an increase of water levels by 0.55 m, of the tidal range by 0,20 m and of wind speed by 7 % within the next 50 years is assumed. The numerical simulations carried out with the model SWAN for a storm surge in February 1999 and its scenario of climate change reveal that the significant wave height increases by up to 30 cm due to the rise in water level and 40 cm due to the rise in wind speed. The mean wave period increases by up to 0,5 s and 1 s respectively. Besides of this single storm surge event the statistics of wave conditions during storm surges are analysed. The significant wave height with a return period of 100 years increases with 0,1 m in the fair ways and with 0,25 m of the tidal flats. The mean wave period increases with 0,3 s and 0,5 s respectively.

1 Einführung

Für die Beurteilung der Sicherheit der deutschen Nordseeküste stellen die Wasserstands- und Seegangsbedingungen die entscheidenden natürlichen Randbedingungen dar (Mai und von Lieberman 2001). Infolge des globalen Klimawandel unterliegen diese hydraulischen Belastungen ebenfalls dem Wandel. Aus Pegelmessungen (z.B. bei Cuxhaven-Steubenhöft) folgt für den mittleren Tidehochwasserstand während der letzten 50 Jahre ein mittlerer jährlicher Anstieg von 2,6 mm/a. Gleichzeitig haben sich die Sturmflutwasserstände noch deutlicher erhöht, so ist das 90 %-Quantil des Tidehochwassers im gleichen Zeitraum um 3,3 mm/a gestiegen (Jensen et al. 2003). In den kommenden 50 Jahren wird eine Beschleunigung dieses Anstiegs erwartet. So ergibt sich nach Regionalisierung der Ergebnisse globaler Klimamodellierung bei Cuxhaven in 2050 ein um bis zu 50 cm erhöhter Tidehochwasseranstieg (von Storch und Reichhardt 1997).

Während zur Ableitung des Trends der Thw an den deutschen Küsten mit den Pegelmessung eine gute Beschreibung der Vergangenheit und mit den Regionalisierungen der Klimamodelle erste Prognosen vorliegen, ist der Trend der Seegangsbedingungen bisher aufgrund fehlender Langzeit-Messungen nur schlecht dokumentiert. Für die deutsche Bucht geben Weisse et al. (2003) während der letzten 50 Jahre einen mittleren Anstieg des 99 %-Quantils der signifikanten Wellenhöhe um 1,8 cm/a an. Untersuchungen zur Veränderung des küstennahen Seegangsklimas bei zukünftiger Klimaänderung sind hochaufgelöst bisher nicht erfolgt und werden im Folgenden beispielhaft für das Jade-Weser-Ästuar vorgestellt.

2 Modellierung des Seegang

Die Untersuchung der Seegangsbedingungen erfolgt mit dem phasengemittelten numerischen Modell Simulating Waves Nearshore SWAN (Booij et al. 1999) unter Verwendung einer im Hinblick auf die Prozesse Welle-Welle-Wechselwirkung und Bodenreibung geringfügig gegenüber der im Modell vorgegebenen Standardeinstellung geänderten Parametrisierung (Mai 2002), welche u.a. durch den Vergleich mit Bojenmessungen des Seegangs bei Robbensüdsteert in der Außenweser getestet worden ist (Mai et al. 2000). Die räumliche Auflösung des Modells beträgt 400 m und ist in einem eingebetteten Teilgebiet auf 200 m erhöht. Die Modellgrenzen sowie die Modellsteuerung sind in Abbildung 1 dargestellt. Das Seegangsspektrum ist an jedem Knoten des Berechnungsgitters mit 20 Stützstellen im Frequenzbereich und 18 Stützstellen der Seegangsrichtung aufgelöst. Dem Modell liegt eine auf der Grundlage von Peilungen der Jahre 1993 bis 1998 erstellte Bathymetrie zugrunde. Als Eingangsseegang am nördlichen und westlichen Rand des Modells werden Berechnungen des operationellen Seegangmodells des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet (Behrens und Schrader 1994). Zur Modellierung der Seegangserzeugung erfolgt eine Vorgabe des Windes homogen über das Modellgebiet. Die numerischen Seegangssimulationen werden einerseits instationär zur Analyse der Wirkung des Klimawandels auf die Seegangssituation einzelner Tiden und andererseits stationär zur Analyse der Wirkung des Klimawandels auf die Seegangsstatistik durchgeführt. Die instationäre Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung der Wechselwirkung von Strömung und Seegang. Dazu werden die Ergebnisse von Grabemann et al. (2004) durchgeführter hydrodynamischer Simulationen mit dem Modell TRIM 3D als Zeitreihen von Wasserstand und Oberflächenströmung über das Modellgebiet vorgegeben. Die Anfangsbedingungen der instationären Seegangssimulation werden durch eine stationäre Berechnung des Wellenfeldes für den ersten Zeitschritt gewonnen.

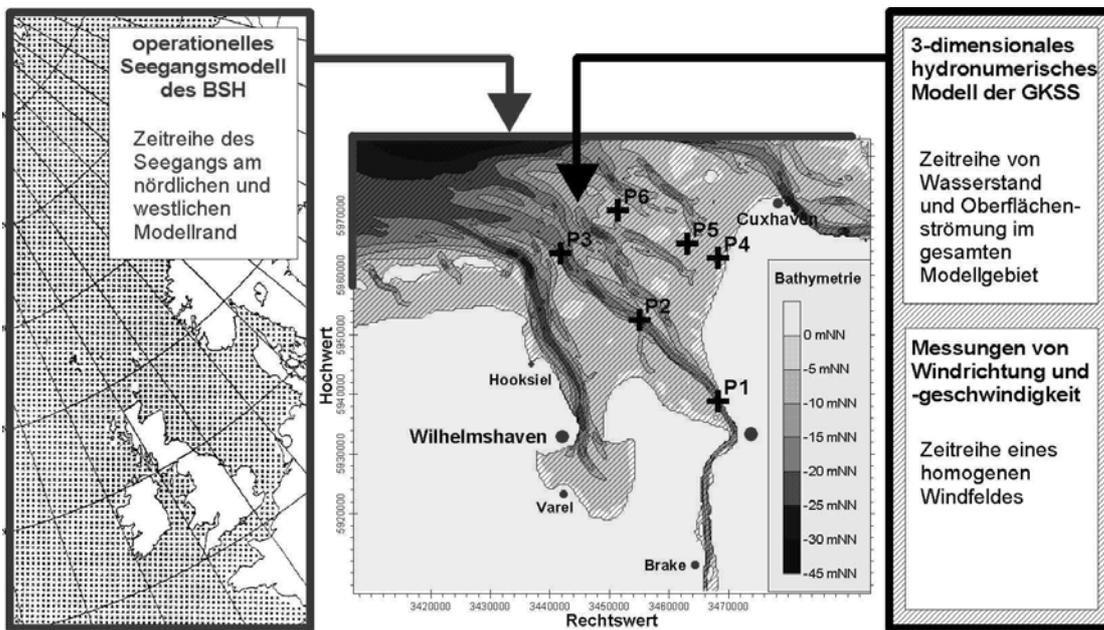


Abb. 1: Randbedingungen der numerischen Seegangmodellierung

Beispielhaft für die Sturmflut im Februar 1999, welche im Folgenden näher analysiert wird, sind die Randbedingungen der instationären Seegangssimulation in Abbildung 2 dargestellt. Der Maximalwert des Wasserstands (nördlich des Leuchtturms Alte Weser) beträgt ca. NN + 3,4 m, der der Windgeschwindigkeit 19,3 m/s bei einer Windrichtung aus WNW, der der signifikanten Wellenhöhe 4,3 m und der der Wellenperiode 13 s. Zur Analyse der Klimafolgen ist in Abbildung 2 außerdem ein Szenario der Randbedingungen gegeben. Der Wasserstand ist im Mittel um 0,55 m erhöht, wobei die Erhöhung des Tidehochwassers mit 0,65 m und die des Tideniedrigwassers mit 0,45 m angesetzt ist. Die

Windgeschwindigkeit ist im Klimaszenario um 7 % erhöht. Unter der Annahme von Tiefwasserbedingungen und ausgereifter Windsee am Modellrand gilt die Proportionalität $H_s \propto u^2$ und $T_m \propto u$ zwischen signifikanter Wellenhöhe (H_s) und mittlerer Wellenperiode (T_m) sowie der Windgeschwindigkeit (u) (Ausschuß für Küstenschutzwerke 2002). Für das Klimaszenario ergibt sich so eine Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe von 14,5 % und der mittleren Wellenperiode von 7 %.

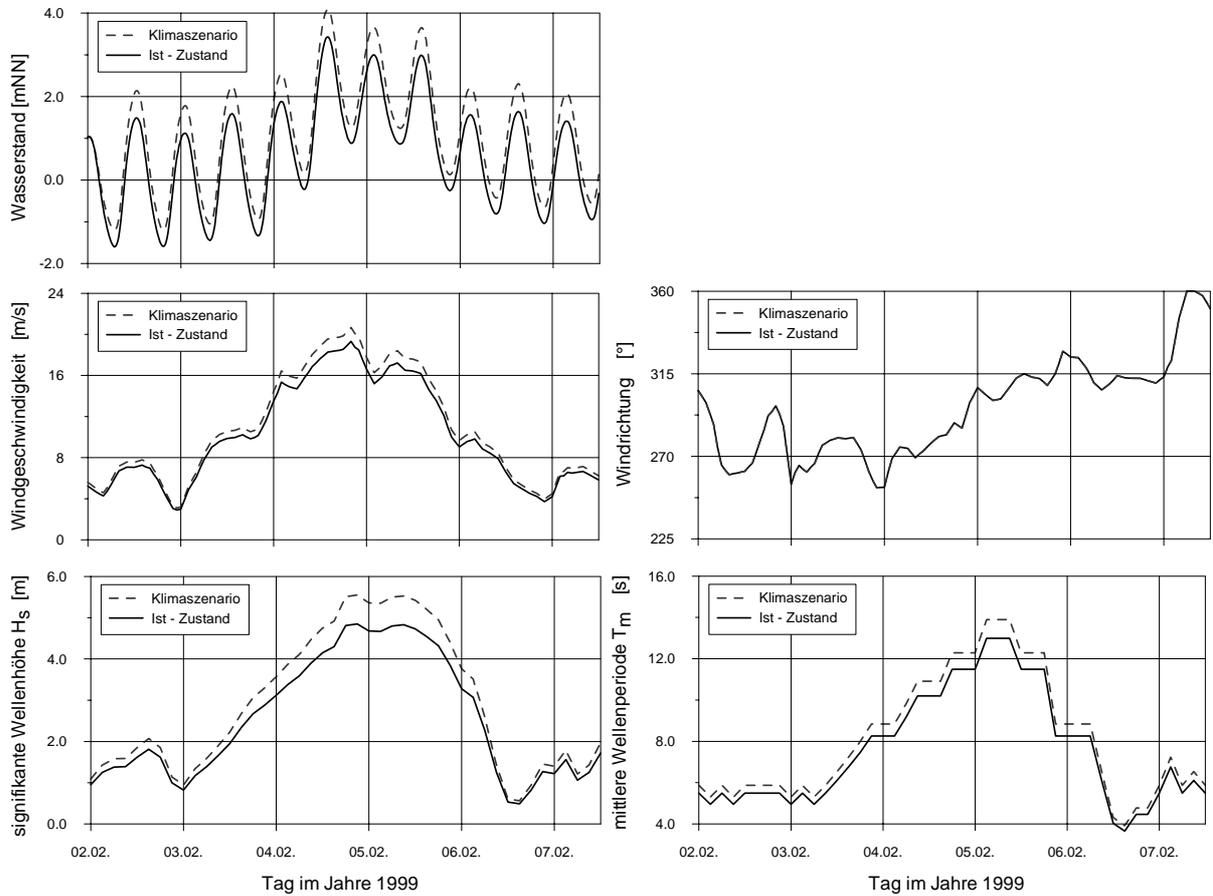


Abb. 2: Randbedingungen des Wasserstands (oben), Windes (Mitte) und Seegangs (unten) während einer Sturmflut (02.02.1999-07.02.1999) - Ist-Zustand und Klimaszenario

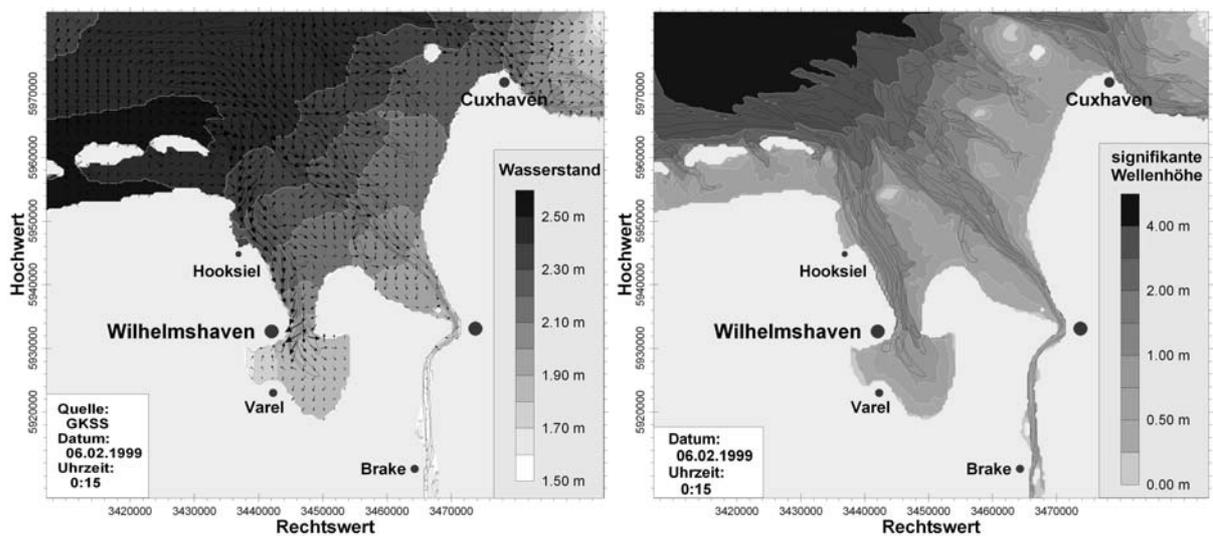


Abb. 3: Beispiel einer gekoppelten Simulation von Strömungen und Seegang

Ein Beispiel der instationären gekoppelten Strömungs- und Seegangssimulationen ist in Abbildung 3 für den Zeitpunkt des Tidehochwassers um Mitternacht zwischen dem 05.02.1999 und dem 06.02.1999 gezeigt. Die Seegangsausbreitung in das Ästuar erfolgt vorwiegend in den Fahrrinnen von Jade und Weser. Über den Wattflächen des Hohe Wags und des Wurster Watts wird die einlaufende Seegangsenergie infolge tiefeninduzierten Brechens stark reduziert.

Zur Analyse der Statistik des Seegangs während Sturmfluten wird den Randbedingungen von Wasserstand sowie Wind und Seegang ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet. Ein Beispiel dieser Zuordnung ist in Elsner et al. (2004) gegeben.

3 Wirkung des Klimawandels auf die Seegangsentwicklung bei Sturmflut

Die Wirkung des Klimawandels auf die Seegangsentwicklung bei Sturmflut erfolgt durch Vergleich der für die Sturmflut 1999 und ihr Klimaszenario durchgeführten numerischen Simulationen.

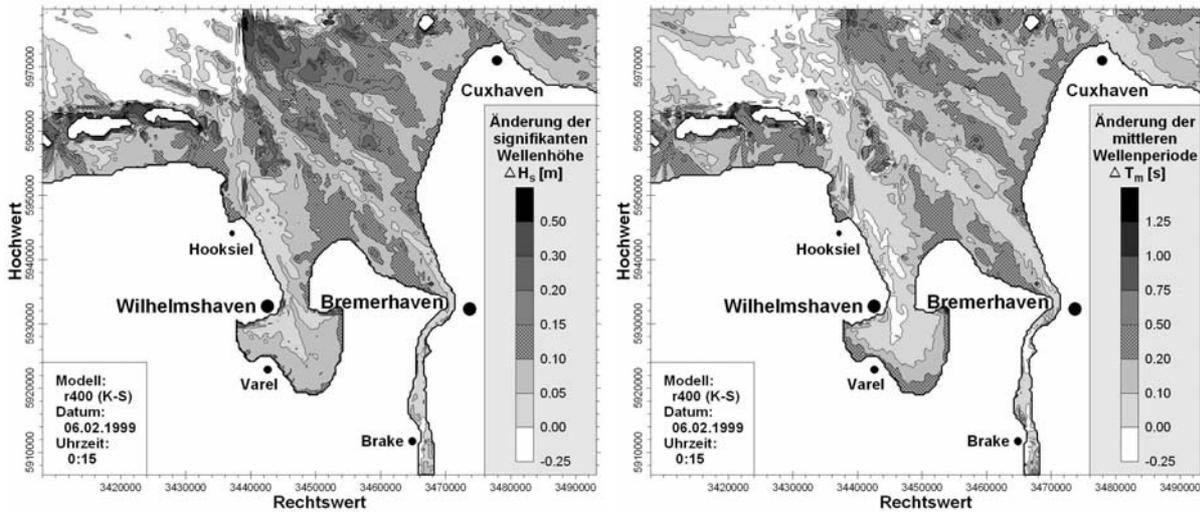


Abb. 4: Veränderung charakteristischer Seegangparameter bei einem mit dem Klimawandel verbundenen Wasserstandsanstieg - signifikante Wellenhöhe (links) und mittlere Wellenperiode (rechts)

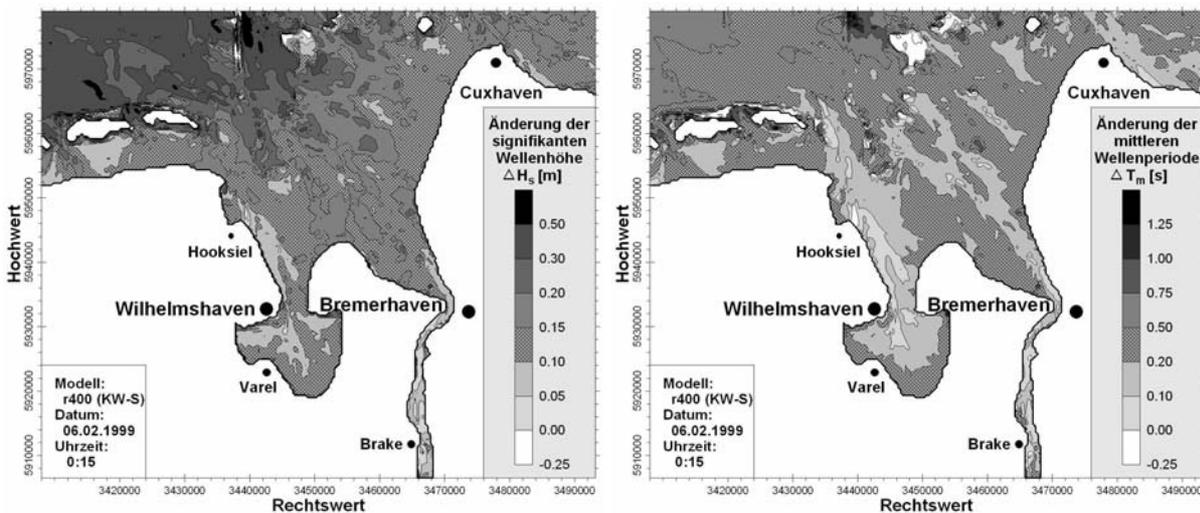


Abb. 5: Veränderung charakteristischer Seegangparameter bei einem mit dem Klimawandel verbundenen Wasserstandsanstieg bei gleichzeitiger Intensivierung des Windes - signifikante Wellenhöhe (links) und mittlere Wellenperiode (rechts)

Für den in Abbildung 3 dargestellten Zeitpunkt sind die sich als Wirkung eines Wasserstandsanstiegs und einer Intensivierung der Windgeschwindigkeit bei Klimawandel ergebenden Differenzen in signifikanter Wellenhöhe und mittlerer Wellenperiode in Abbildung 4 und 5 wiedergegeben. Nach Abbildung 4, welche die Differenz der Seegangparameter für einen mit dem Klimaszenario verbundenen Wasserstandsanstieg ohne Intensivierung des Windes und der Seegangparameter während der Sturmflut 1999 wiedergibt, ergeben sich die größten Änderung der Seegangparameter in den Flachwassergebieten des Rückseitenwatts südlich Wangerooe, des Hohe Wegs und des Wurster Watts aufgrund der geringeren Dissipation durch tiefeninduziertes Brechen. In den Fahrrinnen von Jade und Weser ist bei einem reinen Wasserstandsanstieg mit einem nur sehr geringen Anstieg zu rechnen. Über den Wattflächen ergibt sich zu Beginn des 06.02.1999 ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhe von etwa 0,2 m und der mittleren Wellenperiode von ca. 0,2 m.

Zum Vergleich mit der in Abbildung 4 wiedergegebenen Wirkung einer reinen Wasserstandserhöhung ist in Abbildung 5 die Differenz der Seegangparameter für eine gleichzeitig mit dem Wasserstandsanstieg erfolgende Intensivierung des Windes bzw. des Eingangsseegangs und der Seegangparameter während der Sturmflut 1999 dargestellt. Die Zunahme der charakteristischen Seegangparameter ist nicht nur auf die Flachwasserbereiche des Modellgebiets begrenzt, sondern erstreckt sich wegen des höheren Eingangsseegangs auch auf das Tiefwasser.

Die zeitliche Entwicklung des Seegangs an verschiedenen Positionen in der Außenweser bzw. im Wurster Watt ist für die in Abbildung 2 gegebenen Randbedingungen in Abbildung 6 bzw. 7 dargestellt. Während in der Außenweser ein mit einer Intensivierung des Windes einhergehender Wasserstandsanstieg eine Zunahme der signifikanten Wellenhöhe im Mittel von 12 % und der mittleren Wellenperiode von 6 % bewirkt, beträgt über dem Watt die Zunahme der signifikanten Wellenhöhe im Mittel 25 % und der mittleren Wellenperiode etwa 13 %.

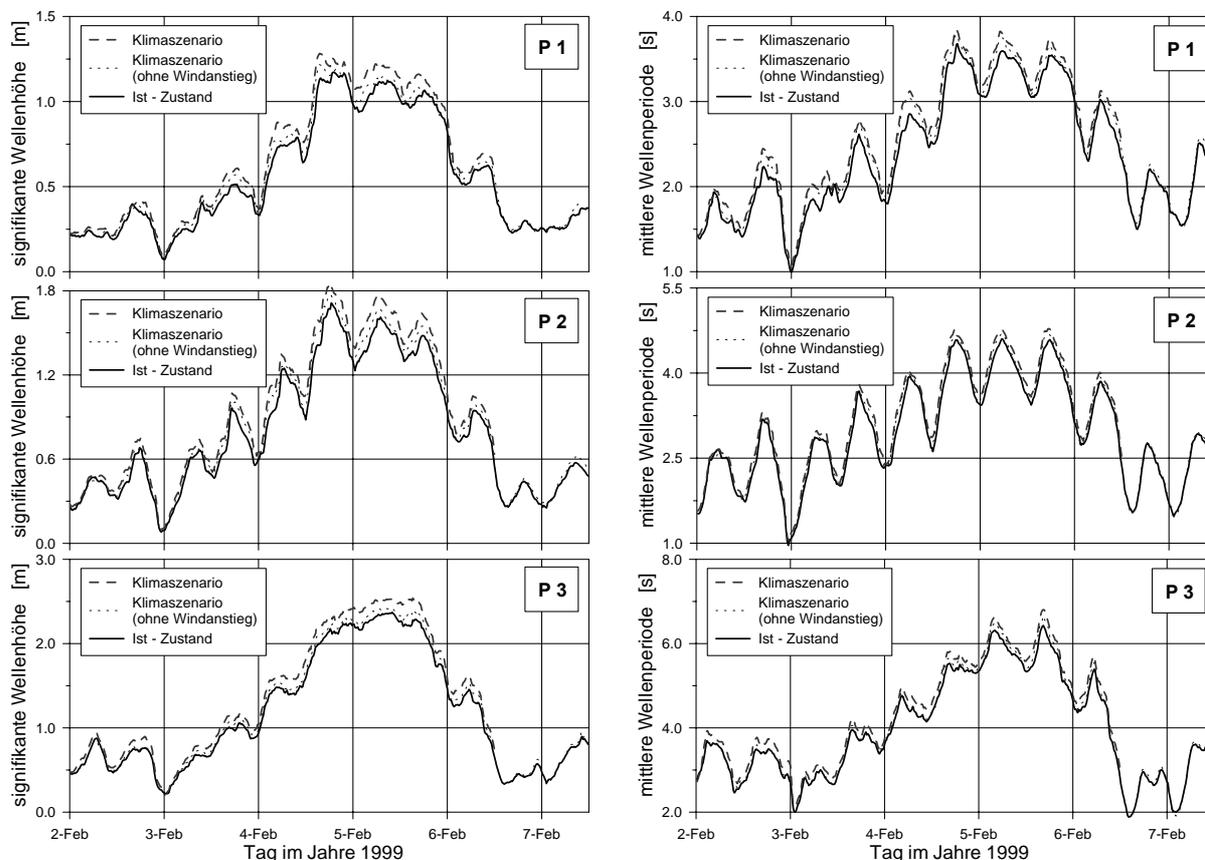


Abb. 6: Zeitreihe der in der Fahrrinne der Außenweser zu erwartenden Veränderung charakteristischer Seegangparameter bei Klimawandel - signifikante Wellenhöhe (links) und mittlere Wellenperiode (rechts)

Im Vergleich dazu führt ein klimaänderungsbedingter Wasserstandsanstieg ohne Intensivierung des Windes in der Außenweser im Mittel zu einer Zunahme der signifikanten Wellenhöhe um 5 % und der mittleren Wellenperiode um 2 %. Über dem Wurster Watt nimmt die signifikante Wellenhöhe im Mittel um 18 % und die mittlere Wellenperiode um 10 % zu.

In der Fahrrinne der Außenweser geht die Änderung des Seegangs demzufolge im Wesentlichen auf die Intensivierung des Windes zurück, während über dem Watt dem Wasserstandsanstieg die größere Bedeutung zukommt.

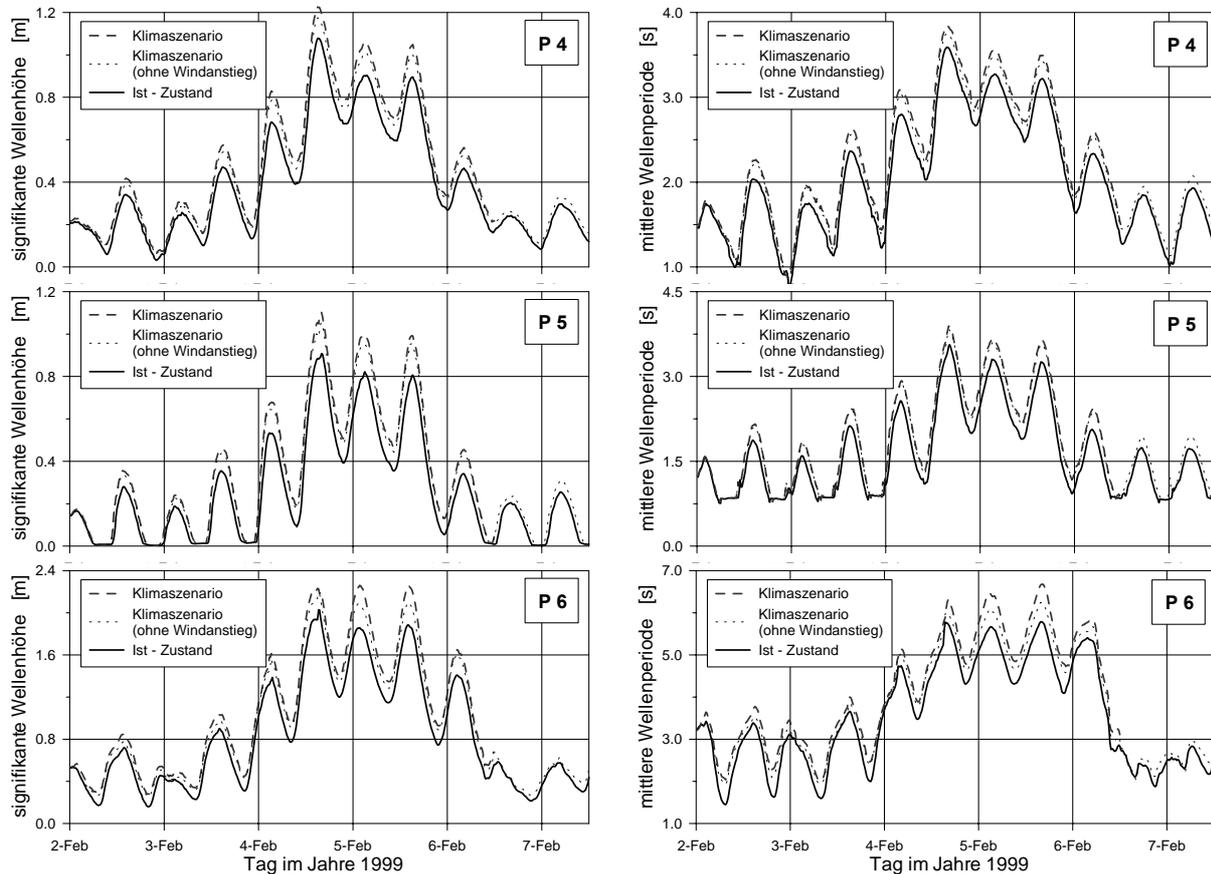


Abb. 7: Zeitreihe der über dem Wurster Watt zu erwartenden Veränderung charakteristischer Seegangsparameter bei Klimawandel - signifikante Wellenhöhe (links) und mittlere Wellenperiode (rechts)

4 Wirkung des Klimawandels auf die Seegangsstatistik während Sturmfluten

Auch die Analyse der nach einer von Mai und Zimmermann (2003) beschriebenen Methodik berechneten Seegangsstatistik bestätigt die größere Bedeutung des Wasserstandsanstiegs über den Wattflächen und der Intensivierung des Windes im Bereich der Fahrrinnen. Die Abbildung 8 verdeutlicht dies exemplarisch für eine Lokation in der Fahrrinne der Weser bei Bremerhaven und über dem Watt nördlich von Solthörn. Während derzeit vor Bremerhaven der Seegang einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/100 eine signifikante Wellenhöhe von 1,2 m und eine mittlere Wellenperiode von 6,1 s aufweist, beträgt die Wellenhöhe gleicher Jährlichkeit bei einem klimabedingten Wasserstandsanstieg 1,25 m und die Wellenperiode 6,2 s. Eine Intensivierung des Windes führt vor Bremerhaven zu einer Erhöhung der Wellenhöhe auf 1,35 m und 6,5 s. Über dem Watt vor Solthörn weist die Seegangsstatistik derzeit eine 100-jährliche signifikante Wellenhöhe von 1,1 m und eine mittlere Wellenperiode von 6,0 s auf. Bei einem klimabedingten Wasserstandsanstieg bzw. einer zusätzlichen Intensivierung des Windes erhöht sich die Wellenhöhe auf 1,2 m bzw. 1,25 m und die Wellenperiode auf 6,3 s bzw. 6,5 s.

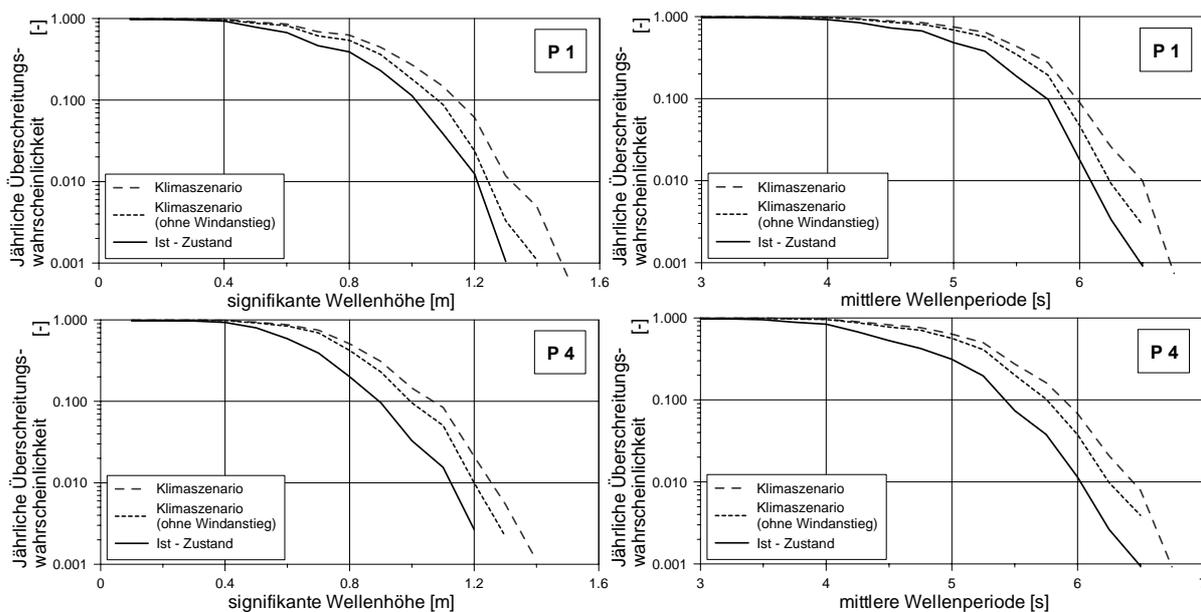


Abb. 8: Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit von signifikanter Wellenhöhe (rechts) und mittlerer Wellenperiode (links) in der Außenweser bei Bremerhaven und über dem Watt nördlich Solthörn - Ist-Zustand und Klimaszenario

5 Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel werden sich neben der meteorologischen Situation und dem Wasserstand außerdem die Seegangbedingungen in Küstengewässern in erheblichem Maße ändern. In den Fahrrinnen wird diese Änderung bestimmt durch die Intensivierung des Windes. In den Flachwassergebieten des Watts ist der Wasserstandsanstieg der dominierende Faktor. Aufgrund der zu erwartenden Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe um bis zu 25 % und der mittleren Wellenperiode um bis zu 13 % ist die Änderung der Seegangsverhältnisse bei der Beurteilung der Sicherheit von Küstenschutzanlagen bei Klimawandel nicht zu vernachlässigen.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Verbundprojekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“ (www.krim.uni-bremen.de) durch das Teilprojekt „Klimaänderung und Küstenschutz“ (Projektkennzeichen: 01 LD 0014) erarbeitet worden. Die Autoren danken besonders I. Grabemann und H.-J. Grabemann (beide GKSS, Geestacht) für die Zusammenarbeit bei der Kopplung von Seegangs- und Strömungssimulationen.

Literatur

- Ausschuß für Küstenschutzwerke (2002): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuß für Küstenschutzwerke, Die Küste, H. 65, 589 S., Heide i. Holstein.
- Behrens, A., Schrader, D. (1994): The Wave Forecast System of the “Deutscher Wetterdienst“ and the “Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie“: A Verification Using ERS-1 Altimeter and Scatterometer Data. Deutsche hydrographische Zeitschrift, Vol. 46, No. 2, S. 131-149, Hamburg.
- Elsner, A., Mai, S., Zimmermann, C. (2004): Risk Analysis Applied in Integrated Coastal Zone Management, Coastline Reports, Nr. 1 (dieser Band)

- Grabemann, H.-J., Grabemann, I., Eppel, D. P. (2004): Climate Change and Hydrodynamic Impact in the Jade-Weser Area: Case Study, Coastline Reports, Nr. 1 (dieser Band)
- Mai, S. (2002): Seegangsausbreitung in Hever und Heverstrom. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, H. 87, S. 98-141, Hannover.
- Mai, S., v. Lieberman, N., Fittschen, T., Bartels, K. (2000): Seegang in der Weser vor Bremerhaven - Ein Vergleich von Naturmessung und numerischer Simulation. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Jg. 137, H. 9, S. 278-281, Hamburg.
- Mai, S., v. Lieberman, N. (2001): Sturmflutgefährdung der Hafenstadt Bremerhaven: Eine Risikoanalyse, Tagungsband der 18. Jahrestagung des Arbeitskreises „Geographie der Meere und Küsten“, Vechta, Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, Bd. 22, S. 84-100, Vechta.
- Mai, S., Zimmermann, C. (2003): Risk Analysis - Tool for Integrated Coastal Planning, Proc. of the 6th Int. Conf. on Coastal and Port Engineering in Developing Countries COPEDEC, CD-ROM, Colombo, Sri Lanka.
- von Storch, H. Reichardt, H. (1997): A Scenario of Storm Surge Statistics for the German Bight at the Expected Time of Doubled Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. Journal of Climate, 10, Nr. 10, S. 2653-2662.
- Weisse, R., Feser, F. Günther, H. (2003): Wind- und Seegangsklimatologie 1958 – 2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS-Report, 32 S., Geesthacht.

Adresse

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. Stephan Mai
Universität Hannover
Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen
Nienburger Str. 4
30165 Hannover

E-mail: smai@zfn.uni-bremen.de