

## Das hydrologische System der Wasserstraßen im Küsten- und Ästuarbereich KLIWAS-Vorhaben 2

**Dr. Stephan Mai, BfG,**  
**Dr. Hartmut Heinrich, BSH,**  
**Dr. Harro Heyer, BAW**

### 1 Einleitung

Die vom IPCC (2007) für verschiedene Szenarien globaler Emissionen von Treibhausgasen IPCC (2000) erarbeiteten Projektionen des Klimawandels lassen einen sich beschleunigenden globalen Anstieg der Ozean- und Meerestemperatur und einen damit einhergehend sich beschleunigenden Meeresspiegelanstieg als wahrscheinlich erscheinen. Weiterhin wird eine Verlagerung der Zugbahnen von Stürmen und deren Intensivierung als Folge des Klimawandels für den Nordostatlantik und die Nebenmeere, wie Nord- und Ostsee, diskutiert (von STORCH et al. 1998). Diese auf großer Skala projizierten Klimafolgen der Emission von Treibhausgasen werden auch einen Wandel des hydrologischen Systems der deutschen Wasserstraßen im Bereich der Küstengewässer und Ästuarare nach sich ziehen. Im Rahmen des KLIWAS-Forschungsprogramms wird dieser hydrologische Wandel durch die Bundesoberbehörden Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) mit dem Ziel untersucht, die u. a. durch das IPCC gegebenen globalen Klimaprojektionen für die deutschen Wasserstraßen und Küsten zu regionalisieren.

### 2 Grundlagen klimatisch bedingter, quantitativer Änderungen des Zustands der Küstengewässer und Ästuarare

Die hydrologischen Bedingungen der Küsten und der Ästuarare werden durch den atmosphärischen Antrieb, d. h. Wind und Luftdruck, sowie durch die ozeanographischen Randbedingungen, d. h. Wasserstand, Strömung, Salinität und Temperatur, in der offenen See bestimmt. Auf Ästuarare wirkt zudem der Oberwasserabfluss.

Durch den globalen Klimawandel bedingte Veränderungen des atmosphärischen Antriebs sowie der ozeanographischen Randbedingungen führen zu regionalen Veränderungen der hydrologischen Bedingungen der deutschen Küstengewässer von Nord- und Ostsee sowie deren Ästuarare. So wird sich der durch den Klimawandel bedingte Anstieg des mittleren Meeresspiegels der Ozeane durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels der Nebenmeere fortsetzen. Speziell an der gezeitenbeeinflussten Nordseeküste ist zudem infolge des Meeresspiegelanstiegs eine Erhöhung der Gezeitendynamik in Diskussion (DUWE 2000, PLÜSS 2004). Die infolge des Klimawandels erwartete Veränderung der Windverhältnisse und des Abflusses der Binnenflüsse wird den Salzgehalt und damit den Massenaufbau der Nordsee maßgeblich beeinflussen (SCHRUM 2001, KAUKER 1999 sowie HEYEN & DIPPNER 1998) und auf Strömungen (GRABEMANN et al. 2004) sowie das Seegangsklima (GRABEMANN & WEISSE 2008) rückwirken. Mit der klimabedingten Veränderung der atmosphärischen Zirkulation, insbesondere der veränderten Zugbahnen der Sturmtiefs sowie der sich intensivierenden Westwindlagen, werden neben der Veränderung der mittleren ozeanographisch/hydrologischen Situation zudem häufiger Extremereignisse eintreten. In diesem Zusammenhang wird sich nicht nur die Wahrscheinlichkeit extremer Tidewasserstände erhöhen, sondern es werden auch extremere Seegangbedingungen erwartet (MAI & ZIMMERMANN 2004; OUTZEN, HERKLOTZ, HEINRICH & LEFEBVRE 2008). Eine Zusammenstellung weiterer durch den Klimawandel

bedingter Veränderungen des hydrologischen Systems der Seewasserstraßen findet sich bei MOSER et al. (2008).

Mit den klimabedingten hydrologischen Veränderungen in den Küstengewässern und in den Ästuaren gehen direkte und indirekte Einflüsse auf die Schifffahrt sowie auf das Management von Bundeswasserstraßen einher (MOSER et al. 2008).

Als direkte Wirkung veränderter hydrologischer Bedingungen würde z. B. ein häufigeres Eintreten oder eine Intensitätszunahme der Stürme und Sturmfluten die Nutzbarkeit der deutschen Seewasserstraßen sowie die Zugänglichkeit der deutschen Häfen erschweren. Insbesondere intensiverer Seegang würde zu einer Zunahme der Belastung von Offshore-Bauwerken, Seezeichen wie Leuchttürmen und Tonnen, Quer- und Parallelwerken wie Leitdämmen, Buhnen und Deckwerken und anderen Anlagen des Seeverkehrs- und Küstenwasserbaus wie Kajen oder Schleusen- bzw. Sperrwerkstore führen. Diese erhöhten Belastungen würden einen erhöhten Wartungs- und Instandsetzungsaufwand an den genannten Einrichtungen zur Folge haben.

Wenn häufiger Stürme auftretend wird z. B. auch die Lotsenversetzung erschwert, so dass höherer Personaleinsatz erforderlich werden kann. Neben der erwarteten klimabedingten Intensivierung von hydrologischen Extremereignissen wird auch die mit dem Klimawandel erwartete Veränderung der mittleren hydrologischen Verhältnisse direkt Baumaßnahmen im Küstenbereich und in den Ästuaren beeinflussen. So ergibt sich wahrscheinlich aus der Veränderung der Tidewasserstände eine Notwendigkeit zur Anpassung von Buhnen und Leitwerken, z. B. in Bezug auf die erforderliche Kronenhöhe. Ein möglicherweise verändertes Einlaufen der Tidewelle in die Ästuare wird Anpassungen, speziell im tideabhängigen Ausbau, erforderlich machen.

Die indirekten Wirkungen hydrologischer Bedingungen betreffen Morphologie, Gewässerqualität und Ökologie und sind im Überblick über Vorhaben 3 durch MANZ et al. (2009) diskutiert.

Die Abbildung 1 stellt die Zuordnung von direkten und indirekten Klimawirkungen im Küsten- und Äs-

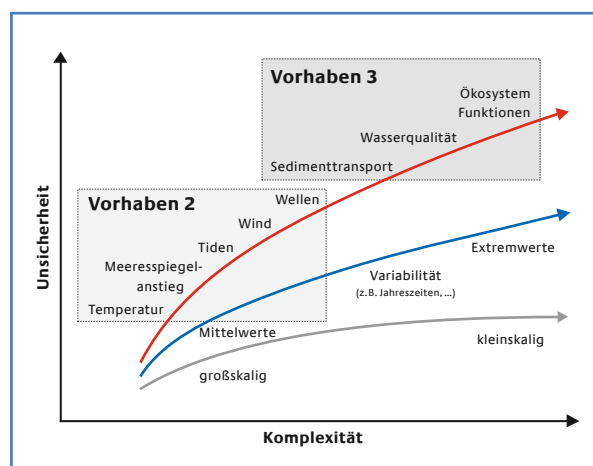


Abb. 1: Prozesse in Küstengewässern und Ästuaren – Komplexität und Unsicherheit (nach: PIANC EnviCom – Task Group 3 Climate Change and Navigation, 2008)

tuarbereich zu den Vorhaben 2 und 3 dar. Die Graphik beschreibt die zunehmende Komplexität einzelner Teilprozesse und die damit verbundene zunehmende Unsicherheit der im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS für die einzelnen Teilprozesse zu erarbeitenden Auswirkungen aus den Projektionen des Klimawandels.

### 3 Bearbeitete Themenbereiche im Vorhaben 2

Als Teil des Forschungsprogramms KLIWAS werden im Vorhaben 2 einerseits bereits eingetretene Änderungen von hydrologischen Parametern in deutschen Küstengewässern und Ästuaren auf der Grundlage von Messungen analysiert; andererseits werden Projektionen der zukünftig wahrscheinlich mit dem Klimawandel eintretenden Veränderungen der hydrologischen Parameter auf der Grundlage numerischer Simulationen ermittelt. Tabellarisch sind die Projekte des Vorhabens 2 in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bereits eingetretene Folgen des Klimawandels werden anhand vorliegender Messwerte von Wasserständen, Strömungen und Seegängen der Nordsee und deren Ästuare analysiert. Dabei werden unter anderem

Ergebnisse zur Wasserstandsentwicklung von JENSEN & MUDERSBACH (2007) und TÖPPE (1994) bzw. zur Seegangsentwicklung durch die WASA-GROUP (1998) und LAMB & WEISS (1979) statistisch analysiert. Ziel ist es dabei, bereits aufgetretene Veränderungen in der Statistik der Tidekennwerte (Tidewasserstände und -strömungen) sowie des Seegangs darzustellen und einen sich möglicherweise verstärkenden Trend zu prüfen. Insbesondere für die Analyse der Tidewasserstände ist eine exakte und absolute Georeferenzierung der Pegelnullpunkte für jeden Zeitpunkt der Aufzeichnung des Pegels nötig. Diese absolute Georeferenzierung wird für die Nordseeküste und deren Ästuare u. a. aufbauend auf dem Projekt IKÜS (2008) ausgearbeitet. Auf den offenen Meeren werden vor allen Dingen der Seegang und die Entwicklungen von Temperatur und Salzgehalt untersucht.

Tabelle 1: Projekte des KLIWAS-Vorhabens 2, Klimawandel im Küsten- und Ästuarbereich, „Erfassung der Veränderungen des hydrologischen Systems der Wasserstraßen“

PJ 2.01	Parametrisierung von Klimawandelszenarien Küste/See
PJ 2.02	Validierung von Wasserstandsänderungen hinsichtlich anthropogener und tektonischer Einflüsse (Küstenbereich)
PJ 2.03/04	Veränderung der Tidekennwerte und der Seegangsstatistik – Nordseeküste und Ästuare
PJ 2.05	Analyse der Verwundbarkeit von wasserbaulichen Anlagen der Nordseeküste und Ästuare unter Klimawandelaspekten

Die Analyse der zukünftigen klimabedingten Änderungen des hydrologischen Systems bzw. die weitergehende Analyse bereits eingetretener Änderungen wird mit Hilfe numerischer Modelle durchgeführt. Hierbei greift das Vorhaben 2 auf im KLIWAS-Vorhaben 1

(RUDOLF et al. 2009) erarbeitete meteorologisch-ozeanographische Referenz- und Szenariendatensätze sowie auf die für das Küstengebiet und die Ästuare regionalisierten Szenarien des Klimawandels zu atmosphärischen und marinen Zustandsvariablen und Zirkulationsmustern im Bereich des Nordatlantiks sowie der Nord- und Ostsee zurück. Durch den Vergleich der Modellergebnisse für die Klimaszenarien und den Referenzdatensatz werden die möglichen klimabedingten Veränderungen der meteorologisch/klimatologischen Parameter sowie der ozeanographisch/hydrographischen Parameter ermittelt. Für küstennahe Regionen sowie die Ästuare werden im Vorhaben 2 die Auswirkungen erwarteter Klimaszenarien weiter lokalisiert.

#### 4 Ziele der Projekte im Vorhaben 2

Ziel des Vorhabens 2 ist es, das Ausmaß der bereits durch den Klimawandel eingetretenen sowie der bei sich beschleunigendem Klimawandel (IPCC 2007) zu erwartenden Veränderungen des hydrologischen Systems in den Küstengewässern von Nord- und Ostsee sowie in den Ästuaren abzuschätzen und die Unsicherheiten der modellierten Wirkungen ausgewählter Klimaprojektionen zu ermitteln.

Zur Verminderung der Unsicherheiten des aus Messungen abgeleiteten bestehenden Trends von Wasserstandserhöhungen an deutschen Küsten werden qualitätsgesicherte und georeferenzierte Wasserstände unterschiedlicher Epochen in einem zeitlich und örtlich homogenen und global-kompatiblen Referenzsystem bereitgestellt. Tektonisch und anthropogen bedingte Vertikalbewegungen werden dabei erfasst und berücksichtigt. Mit Hilfe der Abbildung der Wasserstände in einem global-kompatiblen Referenzsystem werden klassische Pegelmessungen und Ergebnissen der Satellitenaltimetrie verbunden, so dass auch Aussagen über Meeresspiegelvariationen auf hoher See bzw. in größerer Entfernung vom Land getroffen werden können.

Aufbauend auf den qualitätsgesicherten und georeferenzierten Zeitreihen von Wasserstandsmessungen werden historische Trends der Statistiken der Tidekennwerte (JENSEN et al. 2008a, 2008b), wie Tidehochwasser ( $T_{hw}$ ), Tidehub ( $T_{hb}$ ), Tideniedrigwasser ( $T_{nw}$ ), Flutdauer ( $T_f$ ) und Ebbdauer ( $T_e$ ), reanalysiert. Neben Trends in den Statistiken der Tidekennwerte werden aus den an deutschen Küsten durchgeführten Strömungs- und Seegangmessungen die Statistiken von Flutstromdauer ( $T_f$ ), Ebbstromdauer ( $T_e$ ) und maximaler Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit ( $v_f$ ,  $v_e$ ) sowie signifikanter Wellenhöhe ( $H_s$ ) und mittlerer Wellenperiode ( $T_m$ ) sowie deren Trends bereitgestellt.

Für ausgewählte Szenarien des Klimawandels werden Projektionen der zu erwartenden Veränderungen in den Tide- und Seegangskennwerten, in den Strömungsmustern sowie in weiteren atmosphärischen Parametern, wie z. B. Temperatur, Luftdruck, Windrichtung und -geschwindigkeit, und ozeanographischen Parametern, wie z. B. Temperatur, Eisbildung und Salzgehalt, mit Hilfe numerischer Simulationen, wie z. B. in GRABEMANN & WEISSE (2008) dargestellt, ermittelt. Durch Verwendung verschiedener Modellketten (sog. Multi-Modellansatz) wird eine Abschätzung der Unsicherheit der Projektionen erfolgen.

Die im Vorhaben 2 ermittelten Ergebnisse bilden die Grundlage für die im KLIWAS-Vorhaben 3 (MANZ et al. 2009) durchgeführte Untersuchung der Wirkung des Klimawandels auf den Schwebstoffhaushalt, die qualitativ-hydrologischen Verhältnisse sowie auf die Ufervegetation in den Küstengewässern und Ästuaren. Das Vorhaben 2 bildet somit die Grundlage für die Bewertung von Gefährdungspotenzialen auf dem Meer und im Küstenbereich sowie für die Entwicklung von Anpassungsoptionen für die Unterhaltung und zukünftige Nutzung der Seewasserstraßen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der vier Projekte des KLIWAS-Vorhabens 2 liefern die fachlichen Grundlagen zu den bereits eingetretenen sowie zu den zu erwartenden, durch den Klimawandel bedingten Veränderungen im hydrologischen System der Küstengewässer und Ästuar und stellen damit die Basis für die Projekte des Vorhabens 3 her. Im Vorhaben 2 werden Aussagen bzw. Projektionen zu meteorologischen Parametern, insbesondere dem Wind, und ozeanographischen Parametern, insbesondere dem Wasserstand, der Strömung und dem Seegang, ausgearbeitet.

Durch die Korrektur der anthropogenen und tektonischen Einflüsse auf die Messungen der Tidewasserstände werden Unsicherheiten der aus Messdaten abgeleiteten Trends u. a. in den Tidekennwerten vermindert. Ergänzend werden Messungen von Strömungsgeschwindigkeiten und Seegang erstmals bezüglich eines durch den Klimawandel bedingten Trends analysiert.

Hinsichtlich der Projektion der zu erwartenden meteorologischen und ozeanographischen Bedingungen werden Unsicherheiten durch einen Multi-Modellansatz vermindert.

Insbesondere durch die Darstellung und Bewertung der Unsicherheiten der Ergebnisse des Vorhabens 2 werden der Bundeswasserstraßenverwaltung die fachlichen Grundlagen für die sachbezogene Sprachfähigkeit bei Fragen zu Auswirkungen des Klimawandels in der Diskussion mit der interessierten Öffentlichkeit, den Interessenverbänden und weiteren Entscheidungsträgern bereitgestellt.

## Literatur

- DUWE, K. (2000): Zirkulation und Austauschprozesse in Küstengewässern und Ästuaren der Nord- und Ostsee. Verbundprojekt „Klimatologie und Prognose klimainduzierter Änderungen hydrographischer Größen in Nord- und Ostsee (KLINO), Projekt C“, Abschlussbericht, 57 S.

- GRABEMANN, H.-J., GRABEMANN, I., EPEL, D. P. (2004): Climate Change and Hydrodynamic Impact in the Jade-Weser Area: Case Study, Coastline Reports, Nr. 1, S. 83–91
- GRABEMANN, I., WEISSE, R. (2008): Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. *Ocean Dynamics*, doi: 10.1007/s10236-008-0141-x.
- HEYEN, H., DIPPNER, J. W. (1998): Salinity variability in the German Bight in relation to climate variability. *Tellus*, 50A, 545–556.
- IKÜS-PROJEKTGRUPPE (2008): Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik. Abschlußbericht der KFKI-Projekte 03 KIS 055 – 03 KIS 058, 172 S.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC 2007). Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hrsg. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L., Cambridge University Press, 996 S., Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2000) Special Report on Emission Scenarios. Hrsg. B. Metz und O. Davidson, 599 S., Cambridge, Great Britain.
- JENSEN, J., MUDERSBACH, C. (2007): Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten, in: Glaser, R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H. und Wardenga, U. (Hrsg.), Berichte zur Deutschen Landeskunde, Themenheft: Küstensenarien, Band 81, Heft 2, S. 99–112, Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., Leipzig.
- JENSEN, J., WAHL, T., FRANK, T., BLASI, C. J. (2008a): Mean Sea Level and Tidal Analysis at the German North Sea Coastline, Observations and Causes of Sea Level Changes: A Session to Mark the 75th Anniversary of the Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), European Geosciences Union, Generalversammlung, Wien
- JENSEN, J., WAHL, T. und MUDERSBACH, C. (2008b): Sea Level Variations at the German North Sea and Baltic Sea Coastlines, Proceedings of the 7th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (PIANC COPEDEC VII), Dubai
- KAUKER, F. (1999): Regionalization of climate model results for the North Sea. PhD thesis, GKSS 99/E/6.
- LAMB, H. H., WEISS, I. (1979): On Recent Changes of the Wind and Wave Regime of the North Sea and the Outlook. Fachliche Mitteilungen des Amtes für Wehrgeophysik, GeophysBDBw-FM 194, 108 S.
- MAI, S., ZIMMERMANN, C. (2004): Veränderung der Seegangsbewingungen an den Küsten von Jade und Weser als Folge der Klimaänderung. *Coastal Reports*, H. 1, S. 93–100.
- MANZ, W., HEINRICH, H., HEYER, H. (2009): Gewässermorphologie, Gewässergüte und ökologischer Zustand im Küsten- und Ästuarbereich. Tagungsband zur 1. Statuskonferenz „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“, 18./19. 03. 2009
- MOSER, H., HAWKES, P., ARNTSEN, O. A., GAUFRES, P., MAI, S., PAULI, G., WHITE, K., BLACKWELL, S., CORBETT, J. J., DE SCHEPPER, K., DUMON, G., GREYLING, L. M., KÖTHE, H., SOTILLO, M. G., SUZUKI, T. (2008): Waterborne Transport, Ports and Waterways: A Review of Climate Change Drivers, Impacts, Responses and Mitigation. Report of PIANC EnviCom – Task Group 3 Climate Change and Navigation, 57 S., Brussels, Belgium.
- OUTZEN, O., HERKLOTZ, K., HEINRICH, H., LEFEBVRE, C. (2008): Extreme Waves at FINO 1, Research Platform Caused by Storm “Tilo” on 9 November 2007. *DEWI MAGAZIN* No. 33, AUGUST 2008
- PLÜSS, A. (2004): Nichtlineare Wechselwirkung der Tide auf Änderungen des Meeresspiegels im Übergangsbereich Küste/Ästuar am Beispiel der Elbe. In

Gönnert, G., H. Grassl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch, und J. Sündermann (Eds) „Klimaänderung und Küstenschutz“, 129–138.

- RUDOLF, B., BECKER, P., HEINRICH, H. (2009): Klimaszenarien für Schifffahrt und Wasserstraßen. Tagungsband zur 1. Statuskonferenz „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“, 18./19.03.2009
- SCHRUM, C. (2001): Regionalization of climate change for the North Sea and Baltic Sea. *Climate Research*, 18, 31–37.
- VON STORCH, H., LANGENBERG, H., POHLMANN, T. (1998): Küstenklima – Stürme, Seegang und Sturmfluten. In: Warnsignal Klima, Hrsg. J. L. Lozán, H. Grassl, P. Hupfer, S. 182–189, Hamburg.
- TÖPPE, A. (1994): Beschleunigter Meeresspiegelanstieg. *HANSA-Schifffahrt-Schiffbau-Hafen*, Jg. 131, H. 7, S. 78–82, Hamburg.
- WASA GROUP (1998): Changing Storm and Wave Climate in the Northeast Atlantic. *Bull. Amer. Met. Soc.*, Jhrg. 79, H. 5, S. 741–760.