Die Küste, 83 AufMod (2015), 65-76

Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973)

Christian Winter, Alice Lefebvre, Markus Benninghoff, Verner B. Ernstsen

Zusammenfassung

Bodenformen an der Sohle von Flüssen, Küstenzonen und flachen Schelfen sind wichtige skalenübergreifende Elemente der Küstendynamik in ihren Eigenschaften als Transportkörper von Sedimenten und ihrer Wirkung auf die Strömungsdynamik als Rauheitselemente. Neben vielen neueren Studien über die Entstehung, Gestalt und Dynamik von Bodenformen in vergleichsweise kleinen Untersuchungsgebieten ist die Arbeit von ULRICH (1973) über die Verteilung von Bodenformen in der Deutschen Bucht bis heute die einzige verfügbare zusammenhängende Darstellung für die deutsche Nordseeküste. Die analogen Karten und die Darstellung der Klassifizierung in Buchstabenkürzeln macht sie für heutige quantitative Analysen schwer zugänglich. Hier wurden diese Karten digitalisiert und Eigenschaften der Bodenformen rekonstruiert und interpretiert. Das Ergebnis ist eine Zusammenstellung digitaler Karten eines vollständigen - und eines auf steile, hydrodynamisch wirksame Bodenformen reduzierten Datensatzes der Minimal, Maximal- und Mittelwerte von Höhen, Längen und Steilheiten von Bodenformen in der Deutschen Bucht. Die Datensätze stehen der Allgemeinheit in der Datenbank Pangaea zur Verfügung.

Schlagwörter

Bodenformen, Pangaea, Hydraulische Rauheit, Steilheit, Sedimenttransport

Summary

Bedforms in rivers, coastal zones and shallow shelf seas are important cross-scale elements of coastal dynamics in their function as sediment transport agent and in their effect on the flow dynamics as roughness elements. In addition to many recent studies on the origin, shape and dynamics of bedforms in relatively small study areas the work of ULRICH *(1973) on the classification of bedform types in the German Bight is until today the only available coherent representation of the spatial distribution of bedforms for the whole German coastal sea. The analogue maps and the coded classification makes them difficult to access for quantitative analyses. Here these maps were digitized and properties of the bedforms were reconstructed and interpreted. Resulting digital maps of the whole and a reduced dataset on steep bedforms contain minimum, maximum and average values of heights, lengths and steepness of bedform types in the German Bight. The data sets are available to the public in the database Pangaea.*

Keywords

Bedforms, Pangaea, hydraulic roughness, steepness, sediment transport

Inhalt

1 Einleitung ... 66
2 Materialien und Methoden ... 68
2.1 Karten in ULRICH (1973) ... 68
2.2 Bestimmung quantitativer Größen ... 68
3 Ergebnisse ... 69
4 Diskussion ... 72
5 Schlussfolgerungen ... 73
6 Schriftenverzeichnis ... 73

1 Einleitung

In steter Wechselwirkung von Wellen, Strömungen und Transportprozessen an der beweglichen Sohle von Flüssen und Küstenzonen entstehen Bodenformen wie Dünen und Rippel in einer großen Vielfalt von Form und Größe. Bodenformen wirken dabei gleichermaßen als Transportkörper bodennaher Sedimente wie auch als Rauheitselemente, die Reibung auf die Strömung ausüben.

Aus der Anwesenheit und der Form von Bodenformen an der Gewässersohle von Küstensystemen lassen sich wichtige Eigenschaften der Hydrodynamik, Sedimentologie und Dynamik des Meeresbodens und der Meeresumwelt abschätzen (FLEMMING 2000). Das vertiefte Verständnis räumlicher und zeitlicher Skalen morphodynamischer Prozesse gewinnt im Rahmen der zunehmenden Nutzung der Küsten- und Meeresumwelt besondere Bedeutung; zum Beispiel in Bezug auf den Bau von Offshore-Windparks (z. B. VAN DER VEEN and HULSCHER 2008), Offshore-Öl- und Gasleitungen und Stromkabel (z. B. MORELISSEN et al. 2003; BRANSBY et al. 2010a,b), Piers und Häfen (z. B. VAN LANCKER et al. 2004), Schifffahrtswege (z. B. KNAAPEN and HULSCHER 2002), Energiegewinnung (ALVAREZ et al. 2014), gesetzliche Regelungen (WINTER et al. 2014), der Interaktion morphologischer und biologischer Prozesse (AHMERKAMP et al. 2015) oder andere Nutzungen.

Neben der Notwendigkeit, lokale Eigenschaften von Küstensystemen zu verstehen, sind grundsätzliche Fragestellungen zur Entstehung, Entwicklung und Wirkung von Bodenformen Grundlage aktueller Forschung (z. B. LEFEBVRE et al. 2011, KWOLL et al. 2013; KWOLL et al. 2014). Hauptziele der genannten Untersuchungen sind ein grundlegendes Verständnis der Wirkungsbeziehungen an der Gewässersohle und die Möglichkeit der Prognose des Verhaltens von Küstensystemen. Dabei werden für die Vorhersage natürlicher und menschlich beeinflusster Entwicklungen verschiedene Modellsysteme verwendet (CHU et al. 2013; WINTER et al. 2014; WINTER 2012; HERRLING and WINTER 2014; MALCHEREK and PUTZAR 2004). Diese prozessbasierten Modelle werden durch Vorgabe von Randbedingungen gesteuert. An der Gewässersohle müssen Bodenrauheiten

vorgegeben werden, die gegebenenfalls Bodenformen als Formrauheit berücksichtigen (LEFEBVRE et al. 2011).

Die geometrischen Eigenschaften von Bodenformen werden durch Auswertung schiffsgestützter Vermessungen mit Echoloten bestimmt. Diese bathymetrischen Daten werden hinsichtlich der Größe, Form und Bewegung von Bodenformen analysiert (ERNSTSEN et al. 2005; ERNSTSEN et al. 2006). Vermessungen werden durch die zuständigen Behörden im Rahmen ihrer hoheitlichen Aufgaben für alle deutschen Gewässer, und zusätzlich durch Forschungsinstitutionen für unterschiedliche kleinere Untersuchungsgebiete, durchgeführt. Heute sind durch durchgängig digital verfügbare bathymetrische Daten quasi automatisierte Analysen möglich, etwa die Darstellung der dekadischen morphologischen Aktivität der Deutschen Bucht (WINTER 2011 oder andere (siehe dieses Heft)). Ungleich aufwendiger war die Zusammenstellung und Auswertung der damals verfügbaren behördlichen Vermessungen durch ULRICH (1973) für die deutsche Nordseeküste. Auf den analogen Echolotschrieben diverser Vermessungsfahrten wurden individuelle Bodenformen identifiziert, nach Höhe und Steilheit klassifiziert und kodiert flächenhaft dargestellt (Abb. 1).

Abbildung 1: Beispiel für Kartenausschnitt, Detail Außenjade, Karte 15, (ULRICH 1973).

Bis heute sind die Karten von ULRICH die einzige großskalige Kartierung von Bodenformen dieser Region auf der Basis von Vermessungen. Allerdings standen diese Klassifikationen bisher nur als analoge (Papier-) karten zur Verfügung und lassen sich so schwer analysieren oder mit anderen Datensätzen kombinieren oder vergleichen.

In dieser Arbeit wurden die Karten der Deutschen Bucht von ULRICH (1973) digitalisiert und die geometrischen Eigenschaften der Bodenformen aus den kodierten Deskriptoren rekonstruiert und interpretiert. Die georeferenzierten Daten sind in der Datenbank des WDC-MARE (www.wdc-mare.org) über das Informationssystem Pangaea (www.pangaea.de) verfügbar.

2 Materialien und Methoden

2.1 Karten in ULRICH (1973)

Die analogen Karten der räumlichen Verteilung von Bodenformen (dort „Riesen und Großrippel") in der Deutschen Bucht waren ein Ergebnis des Programms „Sandbewegung im Deutschen Küstenraum" der Deutschen Forschungsgemeinschaft in der Zeit von 1967 bis 1971. ULRICH hatte Echogramme aus dem Zeitraum 1964-1971 analysiert. Es ist daher zu beachten, dass diese Zusammenstellung (wie auch heutige Vermessungen) keinen streng synoptischen Zustand darstellt.

Die Vermessungen selbst wurden von 11 Institutionen mit mehr als zwanzig verschiedenen Schiffen und jeweils unterschiedlichen Datenerfassungssystemen durchgeführt. Es wurden Echolote von drei verschiedenen Herstellern und verschiedene Navigations- und Positionierungssysteme verwendet. Flächenhafte Vermessungen waren mit den damaligen Einstrahlecholoten nicht möglich. Stattdessen wurden Vermessungslinien in Küstennähe in 50 bis 250 m Abstand, und auf offener See in 250-1.000 m Abständen abgefahren. Insgesamt wurden Echogramme von Vermessungen von etwa 29.500 Seemeilen (54.600 km) auf insgesamt 600 Papierrollen auf die Anwesenheit von Bodenformen überprüft und diese klassifiziert (vgl. ULRICH 1973, Abb. 2, S. 14). Basierend auf Höhe und dem Verhältnis Länge/Höhe wurden zehn Typen durch unterschiedliche Kennungen unterschieden. Aufgrund der relativ eindeutigen Bestimmung wurde die Höhe H als primäres Klassifizierungskriterium verwendet, mit Kennung K (H<0.5 m) als „Kleinform mit Rippelcharakter" Typ 1 (0.5-1 m) als „Großrippel", Typ 2 (1-2 m) als „Groß bis Riesenrippel" und Typ 3 (>2 m) als „Riesenrippel" bezeichnet. ULRICH (1973) folgte damit der Nomenklatur von REINECK et al. (1971). Als sekundäres Klassifikationskriterium wurde die reziproke Steilheit L/H verwendet. Dabei bezeichnet a (12-75) steile, b (75-150) mittelmäßig geneigte und c (200-250) wenig geneigte Formen. Die identifizierten Bodenformtypen wurden auf geografische Arbeitsblätter überführt und Feldgrenzen des Vorkommens von Bodenformen bestimmt. Anschließend wurden die Arbeitsblätter in 22 Karten im Maßstab 1:50000 übertragen und für die Veröffentlichung als Anhänge in ULRICH (1973) auf den Maßstab 1:100.000 reduziert. Neben den strömungsnormalen Bodenformen sind in ähnlicher Weise andere Formen wie S Sandrücken/Sandzungen; U unregelmäßiger Grund, V Vertiefungen, W Bodenwellen aufgeführt. Allerdings ist letztere Nomenklatur rein beschreibend und enthält keine quantitativen Informationen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die räumliche Verteilung der quantitativ erfassten Bodenformen zu rekonstruieren. Folglich wurden letztere Formen nicht berücksichtigt.

2.2 Bestimmung quantitativer Größen

Für das Untersuchungsgebiet sind zehn verschiedene Typen von Bodenformen kartiert, deren Größenordnungen der Höhe und reziproken Steilheit L/H angegeben sind. Minimalwerte der Höhe können damit direkt angegeben werden (Tab. 1). Für den Bodenformtyp K sind keine Angaben gemacht worden. Basierend auf einer Grafik (in ULRICH 1973, Abb. 4, S. 16) wurde eine Minimalhöhe von 0,25 m abgeschätzt. Auch die Maximalhöhen für die meisten Formen sind angegeben, außer im Falle der Typen 3a, 3b und 3c, die ebenfalls aus der Grafik zu 8 m, 6 m und 4 m abgeschätzt wurden. Mittlere Höhen

der Bodenformtypen wurden als einfache arithmetische Mittel berechnet. Werte der minimalen und maximalen Steilheit (H/L) der Bodenformen konnten direkt aus den Tafelwerten (dort ist die reziproke Steilheit angegeben) berechnet werden. Werte für die minimale und maximale Länge der Bodenformen wurden von den minimalen und maximalen Werten der Höhen und Steilheiten abgeleitet. Mittlere Längen wurden durch Mittelung der minimalen und maximalen Längen, mittlere Steilheiten dann durch den Quotienten der mittleren Höhen und Längen berechnet. Schließlich wurden die Bodenformen nach dem Klassifikationsschema von ASHLEY (1990) in große und sehr große Dünen eingestuft.

Die einzelnen Verarbeitungsschritte für die Umwandlung der analogen Karten von ULRICH (1973) in eine digitale Form sind:

1. 22 Papierkarten (Maßstab 1:100.000) wurden als hochauflösende (600 dpi) Grafiken gescannt und gespeichert.
2. Grafiken wurden in ESRI ArcGIS importiert und georeferenziert.
3. Feldgrenzen von Bodenformfeldern wurden als Polygone digitalisiert. In dem Maßstab der Karten (1:100000) entspricht die Linienbreite der Feldgrenzen etwa 50 m. Entsprechend wird die Genauigkeit der Digitalisierung hier bewertet.
4. Die Kennungen von Ulrich wurden digitalisiert und in zehn Lagen abgelegt (K, 1a, 1b, 1c, 2a, 2b, 2c, 3a, 3b, 3c). Insgesamt wurden 10.755 Kennungen digitalisiert.
5. Jeder Lage wurden zugehörige geometrische Größen (minimale, mittlere und maximale Höhe, Länge und Steilheit) zugeordnet.
6. Die räumliche Verteilung der geometrischen Größen wurde durch Interpolation (Kriging mit sphärischem Semivariogramm Modell) innerhalb der geschlossenen Feldgrenzen erzeugt. Jeweils wurden zwei verschiedene Datensätze abgelegt: Sowohl Dateien mit allen Daten als auch ein reduzierter Datensatz, in dem nur steile Bodenformen aufgenommen sind (1a, 2a, 3a, 3b). Erläuterung siehe unten.

3 Ergebnisse

Die Gesamtzahl der Bereiche, in denen Bodenformen auftreten, ist 1.435. Die Felder sind 0.008 km² bis 92 km² groß, mit einer durchschnittlichen Größe von 0,6 km². Insgesamt bedecken diese Felder eine Fläche von 927 km² (Abb. 2). Bodenformen treten in allen größeren Tidekanälen, Seegatten, Flussmündungen auf. Auch andere Bereiche sind identifiziert, etwa das große Gebiet nördlich der ostfriesischen Inseln. Insgesamt wurden 10.755 Kennungen digitalisiert. Etwa ein Drittel (29%) von ihnen gehören zu den kleinsten (H <0,5 m) Typ K Bodenformen. Am häufigsten treten die mittelhohen (0.5 m < H <2 m) Bodenformtypen 1a (14%), 1b (19%), 2a (10) und 2b (11%) auf. Weniger häufig sind die hohen (H > 2 m) Bodenformtypen 3a (6%) und 3b (3%) und die flachen Typen 1c (6%), 2c (1%) und 3c (<1%).

Durch die Interpolation stehen digitale Daten der räumlichen Verteilung der Höhen, Längen und Steigungen im Höhenbereich von 0,375 m - 5 m mit einem Mittelwert von 1,18 m (und eine Standardabweichung von 0,85 m), die Längenbereich ist 41 m - 475 m mit einem mittleren Wert von 125 m (und einer Standardabweichung von 75 m) und der Steilheit von 0,003 bis 0,031 mit einem Mittelwert von 0,011 (und einer Standardabweichung von 0,006) zur Verfügung.

Abbildung 2: Bereiche mit Bodenformen in der Deutschen Bucht.

Die hydraulische Wirksamkeit von Bodenformen wird oft durch ihre Höhe H oder/und Steilheit H/L parametrisiert (VAN RIJN 1984; BARTHOLDY et al. 2010). Ein Vergleich der hier digitalisierten Typen mit der empirischen Beziehung zwischen Höhen und Längen einer Vielzahl von Bodenformen (FLEMMING 1988) zeigt, dass deren Mittelwerte (mit Ausnahme des Typs 3a) unterhalb dieser Beziehung liegen (Abb. 3). Im Mittel sind die hier rekonstruierten Bodenformen also weniger steil als die meisten Bodenformen der großen Datenbank, die Grundlage für die Beziehung von FLEMMING (1988) war. Das gilt besonders für die Typen K, 1b, 1c, 2b, 2c und 3c, die alle unterhalb der globalen HL-Beziehung liegen. Die Einbeziehung der gesamten (geometrischen) Gültigkeitsbereiche (schraffierte Flächen) für die verschiedenen Typen zeigt, dass die Formen 1a, 2a, 3a und 3b die globale HL-Beziehung überlappen, teilweise sogar die Beziehung für maximale Steilheiten überschreiten. Im Rahmen dieser Studie wurde eine Untergruppe der steilen Bodenformen (1b, 1c, 2b, 2c und 3c) gebildet, für die eine deutliche hydraulische Wirksamkeit vermutet wird.

Abbildung 3: Diagramm der mittleren (Symbole) Bodenform Höhen und Längen und deren Gültigkeitsbereiche (Flächen). Die durchgezogene Linie bezeichnet die Beziehung $H = 0.0677L^{0.8098}$ für mittlere, und die gestrichelte Linie die Beziehung $H = 0.16L^{0.84}$ für maximale Steilheiten nach FLEMMING (1988).

Die räumliche Verteilung der Mittelwerte der Höhen und Längen sind in Abb. 5 dargestellt. Karten und Daten der Bereiche und Bodenformkennwerte sind in Pangaea zugänglich.

Abbildung 4: Rekonstruierte mittlere Höhen (links) und Längen (rechts) von Bodenformen in der Deutschen Bucht.

4 Diskussion

Die hier rekonstruierten Daten ermöglichen den Zugang zu einer bisher einmaligen Zusammenstellung der Verteilung von Bodenformen in der Deutschen Bucht. Die technischen Voraussetzungen bei der Vermessung, die Bearbeitung der meist analogen Echogramme und deren teilweise subjektive Interpretation erlauben sicher nur eingeschränkt gültige quantitative Analysen absoluter Werte. Für eine Darstellung relativer Größen, einem Verständnis der flächenhaften Verteilung von Bodenformen, der Abschätzung von Größenordnungen und dem Vergleich mit heutigen Verteilungen aber sind diese Daten von hoher Bedeutung.

Leider hatten die Daten und Auswertungen von ULRICH (1973) zu keinen Aussagen über die Richtung/Orientierung oder die Form der Bodenformen geführt. Solche Parameter könnten bei der Abschätzung von Sedimenttransportrichtungen verwendet werden, so wie es in mehreren Studien von großen (KUBICKI 2008) und kleineren Bodenformen (ERNSTSEN et al. 2005, ERNSTSEN et al. 2006; KUBICKI and BARTHOLOMÄ 2011) bereits gezeigt wurde. Eine Bewertung von Sedimenttransportrichtungen und Transportpfaden in der Deutschen Bucht auf der Basis der identifizierten Bodenformen ist so aber nicht möglich.

Die hier analysierten Bodenformen könnten theoretisch vollständig inaktive Relikte (z. B. BUI et al. 2009) oder relativ inaktive Strukturen darstellen, die möglicherweise nur bei Extremereignissen aktiv sind (z. B. WERNER et al. 1974; DIESING et al. 2006). Jüngere Untersuchungen zeigen aber meist die hohe Dynamik von Bodenformen, die sich in Tiderinnen in Zeitskalen von Minuten bis Tiden bewegen können (z. B. WILLIAMS et al. 2003; WINTER and ERNSTSEN 2007). Diese Dynamik von Bodenformen kann durch wiederholte Vermessungen mit heutigen hochgenauen Mess- und Positionierungsverfahren quantifiziert werden (ERNSTSEN et al. 2006). Dabei wird die hohe Dynamik individueller Bodenformen deutlich. Die Bereiche des Auftretens von Bodenformen dagegen sind vergleichsweise stabil (FRACCASCIA et al. 2011). Eine Bewertung der Dynamik individueller Bodenformen in der Deutschen Bucht ist auf Grundlage der ULRICH (1973) Karten zwar nicht möglich, deren Auftreten kann aber als Indikator für eine hohe Aktivität des Meeresbodens dienen. Diese Bereiche des Auftretens großer Bodenformen in den äußeren Ästuaren und Tiderinnen (Abb. 4) sind räumlich ähnlich der Gebiete hoher großskaliger Morphodynamik in der der Deutschen Bucht (WINTER 2011) und der Bereiche hoher mittlerer Schubspannungen (KÖSTERS and WINTER, 2014). .

Die Quantifizierung der Reibungswirkung durch Bodenformen auf die Strömung ist von grundlegender Bedeutung für das Verständnis und die Simulation von Hydro- und Sedimentdynamik in den Küstengebieten (z. B. MALCHEREK and PUTZAR 2004; LEFEBVRE et al. 2011). Diese Formrauheit wird in der Literatur durch empirische Beziehungen quantifiziert, die Höhe und Steilheit von Bodenformen parametrisieren (VANONI and HWANG 1967; YALIN 1972; VAN RIJN 1984; SOULSBY 1997; BARTHOLDY et al. 2010). Für eine Abschätzung der großskaligen hydraulischen Rauheit sind reduzierte Datensätze vergleichsweise steiler Bodenformen erstellt worden. Diese können direkt als Grundlage für die Berechnung der Bodenrauheit verwendet werden oder als Referenzgröße für den Vergleich mit Prädiktoren dienen.

5 Schlussfolgerungen

Bodenformen an der Sohle von Flüssen, Küstenzonen und flachen Schelfen sind wichtige skalenübergreifende Elemente der Küstendynamik in ihren Eigenschaften als Transportkörper von Sedimenten und ihrer Wirkung auf die Strömungsdynamik als Rauheitselemente. Hier wurden Karten der Verteilung von Bodenformen in der Deutschen Bucht digitalisiert sowie die Eigenschaften der Bodenformen rekonstruiert und interpretiert. Ein reduzierter Datensatz wurde generiert, in dem ausschließlich die steilen hydraulisch wirksamen Bodenformen enthalten sind. Das Ergebnis sind digitale Karten der beiden Datensätze der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte von Höhen, Längen und Steilheit von Bodenformen in der Deutschen Bucht.

Diese Daten bilden eine einzigartige quantitative Grundlage für die Modellierung von Strömungen und Sedimenttransport im Gebiet der Deutschen Bucht. Die angegebenen Parameter können direkt als Grundlage für die Berechnung der Bodenrauheit verwendet werden, oder als Referenzgröße für den Vergleich mit bisherigen und neuen Prädiktoren dienen. Modellstudien und Untersuchungen von Messergebnissen können in eine großskalige Betrachtung der Dynamik der Deutschen Bucht einbezogen werden. Es wurde betont, dass Bereiche des Auftretens großer Bodenformen in den äußeren Ästuaren und Tiderinnen ähnlich der Gebiete hoher großskaliger Morphodynamik in der der Deutschen Bucht (WINTER 2011) und der Bereiche hoher mittlerer Schubspannungen (KÖSTERS and WINTER, 2014) sind. Die skalenübergreifende Bedeutung von Bodenformen als Indikator hoher Dynamik wird deutlich.

Alle Daten sind als Karten und Datensätze frei in der Datenbank Pangaea zugänglich (http://www.pangaea.de/).

Die Autoren danken dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) für die Genehmigung der Verwendung und Veröffentlichung der Daten von Ulrich (1973).

6 Schriftenverzeichnis

AHMERKAMP, S., WINTER, C., JANSSEN, F., KUYPERS, M. M. M. and HOLTAPPELS, M.: The impact of bedform migration on benthic oxygen fluxes. Journal of Geophysical Research – Biogeosciences, 120, doi:10.1002/2015JG003106, 2015.

ALVAREZ-SILA, O.; WINTER, C. and OSORIO, A. F.: Salinity Gradient Energy at River Mouths. Environ. Sci. Technol. Lett., Article ASAP, doi: 10.1021/ez500239n, 2014.

ASHLEY, G. M.: Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. J Sediment Petrol 60, 160-172, 1990.

BARTHOLDY, J.; FLEMMING, B.; ERNSTSEN, V. B.; WINTER, C. and BARTHOLOMÄ, A.: Hydraulic roughness over simple subaqueous dunes. Geo-Mar Lett 30, 63-76, 2010.

BRANSBY, M. F.; BROWN, M.; HATHERLEY, A. and LAUDER, K.: Pipeline plough performance in sand waves. Part 1: model testing. Can Geotech J 47, 49-64, 2010a.

BRANSBY, M. F.; BROWN, M. J.; LAUDER, K. and HATHERLEY, A.: Pipeline plough performance in sand waves. Part 2: Kinematic calculation method. Can Geotech J 47, 65-77, 2010b.

BUI, V. D.; SCHIMANSKI, A.; STATTEGGER, K.; PHUNG, V. P.; NGUYEN, T. T.; NGUYEN, T. H.; NGUYEN, T. T. and PHI, T. T.: Sand waves on the Southeast

Vietnam Shelf recorded by high resolution seismic profiles: formation and mechanism. Front Earth Science China 3, 9-20, 2009.

CHU, K.; WINTER, C.; HEBBELN, D. AND SCHULZ, M.: Improvement of morphodynamic modeling of tidal channel migration by nudging. Coastal Engineering, 77, 1-13, doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.02.004, 2013.

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; COLEMAN, R.; LAMBECK, K. and MITROVICA, J. X.: Estimates of the Regional Distribution of Sea Level Rise over the 1950-2000 Period. Journal of Climate, Vol. 17, 2609-2625, 2004.

DIESING, M.; WINTER, C.; KUBICKI, A. and SCHWARZER, K.: Decadal scale stability of sorted bedforms, German Bight, south-eastern North Sea. Continental Shelf Research 26, 902-916, 2006.

DUFFY, G. P. and HUGHES-CLARKE, J. E.: Application of spatial cross correlation to detection of migration of submarine sand dunes. J Geophys Res-Earth 110, F04S12, 11 pp, 2005.

DYER, K. R.: Coastal and estuarine sediment dynamics. Wiley, Chichester, 1986.

ENGELUND, F. and FREDSØE, J.: Hydraulic theory of alluvial rivers. Advances in Hydroscience 13, 187-215, 1982.

ERNSTSEN, V. B.; NOORMETS, R.; WINTER, C.; HEBBELN, D.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and BARTHOLDY, J.: Development of subaqueous barchanoid-shaped dunes due to lateral grain size variability in a tidal inlet channel of the Danish Wadden Sea. J Geophys Res-Earth 110, F04S08, 13, 2005.

ERNSTSEN, V. B.; NOORMETS, R.; WINTER, C.; HEBBELN, D.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and BARTHOLDY, J.: Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. Geo-Mar Lett 26, 151-163, 2006.

FLEMMING, B. W.: Zur Klassifikation subaquatischer, strömungstransversaler Transportkörper. Bochumer Geologische und Geotechnische Arbeiten 29, 44-47, 1988.

FLEMMING, B. W.: The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. In: Trentesaux, A. and Garlan, T. (eds.): Proceedings of the International Workshop on Marine Sandwave Dynamics, 23-24 March 2000, University of Lille 1, Lille, France, 55-60, 2000.

FRACCASCIA, S., HEBBELN, D. und WINTER, C.: Bedform evolution in a tidal inlet inferred from wavelet analysis. Journal Coastal Research, SI 64, 2011.

HERRLING, G. and WINTER, C.: Morphological and sedimentological response of a mixed-energy barrier island tidal inlet to storm and fair-weather conditions. Earth Surface Dynamics, 2(1), 363–382, doi:10.5194/esurf-2-363-2014, 2014.

KNAAPEN, M. A. F. and HULSCHER, S. J. M. H.: Regeneration of sand waves after dredging. Coast Eng 46, 277-289, 2002.

KÖSTERS, F. and WINTER, C.: Exploring German Bight coastal morphodynamics based on modelled bed shear stress. Geo-Marine Letters 34, 21-36, 2014.

KUBICKI, A.: Large and very large subaqueous dunes on the continental shelf off southern Vietnam, South china Sea. Geo-Mar Lett 28, 229-238, 2008.

KUBICKI, A. and BARTHOLOMÄ, A.: Sediment dynamics in the Jade tidal channel prior to port construction, southeastern North Sea. J Coastal Res SI64, 771-775, 2011.

KWOLL E., WINTER C. and BECKER M.: Intermittent suspension and transport of fine sediment over natural tidal bedforms. In: Venditti, J. G.; Best, J.; Church, M. and R.

J. Hardy (eds.): Coherent Structures in Flows at the Earth's Surface. Wiley-Blackwell, London, 2013.

KWOLL, E.; BECKER, M.; WINTER, C.: With or against the tide: the influence of bedform asymmetry on the formation of macroturbulence and suspended sediment patterns. Water Resources Research 50, 1-16, doi: 10.1002/2013WR014292, 2014.

LEFEBVRE, A.; ERNSTSEN, V. B. and WINTER, C.: Influence of compound bedforms on hydraulic roughness in a tidal environment. Ocean Dynam 61, 2201-2210, 2011.

MALCHEREK, A. and PUTZAR, B.: The prediction of dunes and their related roughness in estuarine morphological models. Proceedings of the 8th International Conference on Estuarine and coastal Modelling, Monterey, California, 839-851, 2004.

MORELISSEN, R.; HULSCHER, S. J. M. H.; KNAAPEN, M. A. F.; NÉMETH, A. A. and BIJKER, R.: Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines. Coast Eng 48, 197-209, 2003.

PAARLBERG, A. J.; DOHMEN-JANSSEN, C. M.; HULSCHER, S. J. M. H. and TERMES, P.: Modelling river dune evolution using a parameterization of flow separation. J Geophys Res-Earth 114, F01014, 17, 2009.

REINECK, H. E.; SINGH, I. B. und WUNDERLICH, F.: Einteilung der Rippeln und anderer mariner Sandkörper. Senck Marit 3, 93-101, 1971.

SEISS, G. und PLÜß, A.: Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 86, 61-64, 2003.

SOULSBY, R. L.: Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Thomas Telford, London, 1997.

ULRICH, J.: Die Verbreitung submariner Riesen- und Groβrippeln in der Deutschen Bucht. Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift., Reihe B (4^0). Nr. 14, 31, 1973.

VAN DER VEEN, H. H. and HULSCHER, S. J. M. H.: Effects of large-scale human activities on the North Sea bed. In: Parsons, D.; Garlan, T. and Best, J. (eds): Marine and River Dune Dynamics III, International Workshop, April 1-3 2008, Leeds, United Kingdom, 307-314, ISBN: 978-2-11-097208-8, 2008.

VAN LANCKER, V.; LANCKNEUS, J.; HEARN, S.; HOEKSTRA, P.; LEVOY, F.; MILES, J; MOERKERKE, G.; MONFORT, O. and WHITEHOUSE, R.: Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK). Cont Shelf Res 24, 1171-1202, 2004.

VANONI, V. A. and HWANG, L. S.: Relation between bed forms and friction in streams. J Hydr Div-ASCE 93, 121-144, 1967.

VAN RIJN, L. C.: Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. J Hydraul Eng-ASCE 110, 1733-1754, 1984.

WERNER, F. und ARNTZ, W. E.: Tauchgruppe Kiel: Sedimentologie und Ökologie eines ruhenden Riesenrippelfeldes. Meyniana 26, 39-62, 1974.

WILLIAMS, J. J.; BELL, P. S.; HUMPHERY, J. D.; HARDCASTLE, P. J. and THORNE, P. D.: New approach to measurement of sediment processes in a tidal inlet. Cont Shelf Res 23, 1239-1254, 2003.

WINTER, C. and ERNSTSEN, V. B.: Spectral Analysis of Bedforms, In: C. Dohmen-Janssen and SJMH Hulscher (Ed) River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, 907-912, 2007.

WINTER, C., 2011. Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 706 – 710. Szczecin, Poland, ISBN 0749-0208

WINTER, C.: Observation- and Modelling of Morphodynamics in Sandy Coastal Environments. Habilitationsschrift Universität Bremen, Fachbereich Geowissenschaften, 2012.

WINTER, C.; HERRLING, G.; BARTHOLOMÄ, A.; CAPPERUCCI, R.; CALLIES, U.; HEIPKE, C.; SCHMIDT, A.; HILLEBRAND, H.; REIMERS, C.; BREMER, P. und WEILER, R.: Wissenschaftliche Konzepte für ein Monitoring des ökologischen Zustands des deutschen Küstenmeeres. Wasser und Abfall, 07-08/2014; 21-26, 2014.

YALIN, M. S.: Mechanics of sediment transport. Pergamon Press, New York, 1972.