

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Schrottke, Kerstin; Bartholomä, Alexander

Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101740>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schrottke, Kerstin; Bartholomä, Alexander (2015): Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden. In: Die Küste 83. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 103-116.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Schließen von Datenlücken und Verbesserung der Messmethoden

Kerstin Schrottke und Alexander Bartholomä

Zusammenfassung

In AufMod galt es, mess- wie modellbasierte Daten zur morphologischen und sedimentologischen Ausprägung und Dynamik der Deutschen Bucht möglichst vollständig zusammenzutragen. Darauf basierend sollte der Kenntnisstand zur langfristigen morphodynamischen Gebietsentwicklung erweitert, sowie daraus ableitbare Ergebnisse und zugehörige Produkte (z. B. dokumentierte Datensätze, Karten) in ein für alle offenes Datenportal überführt werden. Hierzu wurden vorhandene Datensätze durch neue, einheitliche und über Raum und Zeit hoch aufgelöste Messungen ergänzt. In welchem Maße alte und neue Daten auch durch Anpassung und Optimierungen der Aufnahme- und Datenauswertestrategien und -verfahren vergleichbar sind, wird hier aufgezeigt. Anhand von Beispielen zur Charakteristik der Sohl-sedimente (räumlich-zeitliche Verteilung, Zusammensetzung, Porosität) soll verdeutlicht werden, inwieweit gebietsspezifische Erkenntnisse auf den Gesamtbereich Deutsche Bucht übertragbar sind.

Schlagwörter

Hydroakustik, Vermessung, Seitensichtsonar, Korngrößenanalysen, Schlickgerölle, Porosität

Summary

The task in AufMod was to collect, as complete as possible, field- and model-based data on morphological and sedimentological characteristics and dynamics of the German Bight. This was to serve a further extension of the state of knowledge on the long-term morphodynamic development of the area. The results and associated products (e.g. documented records, maps) were to be transferred into a freely accessible open-source data platform. For this purpose, existing data sets were complemented by newly acquired, standardized, and spatially and temporally highly resolved measurements. It is outlined to what extent the old and new data from different sources are comparable and can be optimized and adapted by assimilation and evaluation strategies and techniques. It is also demonstrated by selected examples to what degree area-specific seabed characteristics (spatial-temporal distribution, composition, porosity) can be generalized for the whole German Bight.

Keywords

hydroacoustics, survey, sidescan sonar, grain-size analyses, mud pebbles, porosity

Inhalt

1	Einleitung.....	104
2	Messverfahren und ihre Vergleichbarkeit.....	105
3	Fokusgebiete.....	109
4	Beispiele der Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit spezifischer Erkenntnisse..	110
5	Schriftenverzeichnis.....	115

1 Einleitung

Voraussetzung für die Erfassung der Morpho- und Sedimentdynamik in der Deutschen Bucht ist eine entsprechend umfangreiche Datenbasis, die morphologische und sedimentologische Messdaten flächendeckend und in hoher zeitlicher wie räumlicher Auflösung beinhaltet. In Hinblick auf die Größe des Untersuchungsraumes stellt die Generierung einer solchen Datenbasis eine große Herausforderung dar, die in dem Verbundprogramm AufMod angenommen und mit der Entwicklung des sogenannten „Funktionalen Bodenmodells“ umgesetzt wurde (MILBRADT et al. 2015). Hierzu wurden alle verfügbaren Datensätze unterschiedlicher Bezugsquellen aus dem Untersuchungsraum zusammengetragen, neue Daten generiert und ein Werkzeug geschaffen, mit dem eine möglichst lückenlose Datenvergleichbarkeit über Raum und Zeit möglich ist. Eine Prüfung und Visualisierung der Datengüte war hierfür elementar, wissend das Auflösung, Genauigkeit und Vertrauenswürdigkeit von Daten je nach Alter und Herkunft großen Schwankungen unterliegen können. Bestes Beispiel hierfür ist die in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegene Qualität der Georeferenzierung und Höhenbestimmung von Messpositionen im Seebereich mit einer entscheidenden Verbesserung im Jahr 2000. Die bis dahin künstlich aufgesetzte Signalverschlechterung des bereits eingesetzten amerikanischen satellitengestützten globalen Positionsordnungssystems (GPS) wurde abgeschaltet. Damit reduzierte sich die Positionsungenauigkeit vom drei- auf den einstelligen Meterbereich. Funknavigation wurde somit weitestgehend abgelöst, die sogenannte Decca-Navigation in 2000 abgeschaltet. Mit modernen GPS-Mehrfrequenzsystemen wie dem Differential-GPS (DGPS) mit Echtzeit-Kinematik (RTK) und Langstrecken-Kinematik (LRK) können heute laterale und vertikale Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht werden.

Für eine größtmögliche Vergleichbarkeit von Messdaten galt es im Vorfeld der Datenerhebungen Kriterien und Standards festzulegen, nach denen neue Messdaten mit möglichst einheitlicher Methodik und Aufnahme-strategie erhoben werden konnten, um eine größtmögliche Datenvergleichbarkeit zu gewährleisten. Dabei galt es auch, gebietsspezifische morphologische wie geologisch-sedimentologische Gegebenheiten in den einzelnen Bereichen der Deutschen Bucht zu berücksichtigen. So wurde ein sogenannter „Multi-Methodenansatz“ verwendet, mit dem Messungen möglich waren, die unterschiedliche räumliche wie zeitliche Skalen abdeckten. Gleichzeitig wurde versucht, die genutzten Messverfahren zu optimieren bzw. Methoden zu entwickeln, mit denen sich Kennwerte wie beispielsweise die Porosität der Sedimente oder die Formrauheit von Bodenformen, abbilden lassen (WINTER et al. 2015).

Die Auswertung der aus diesen Messreihen entwickelten Datenbasis erlaubt die Ableitung von sowohl großräumigen und langfristig stattfindenden Veränderungen als auch

kleinräumigen und kurzweiligen Phänomenen und Ereignissen in Modell-Szenarien. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die Gewässersohle der Deutschen Bucht, insbesondere im Küstennahbereich ein dynamisches und zugleich komplexes System darstellt, welches in enger Wechselwirkung mit der sie gestaltenden Hydrodynamik steht. So wurden nicht nur Informationen zu morphologischen Änderungen über Raum und Zeit, sondern auch jene zum geologischen Aufbau, zur Zusammensetzung sowie zu den damit verbundenen physikalischen Eigenschaften des Bodens gesammelt und ausgewertet.

Schließlich sei erwähnt, dass in den Fällen, in denen sich Datenlücken nicht allein durch das Verschneiden alter und neuer Messdaten schließen ließen, auf die im Verbundprojekt AufMod generierten, modellbasierten Ergebnisse zurückgegriffen wurde (MILBRADT et al. 2015).

2 Messverfahren und ihre Vergleichbarkeit

Im Folgenden sollen die Messverfahren näher beleuchtet werden, die im Rahmen von AufMod schwerpunktmäßig eingesetzt wurden, um neue Messdaten zu generieren. Darüber hinaus wird eine vergleichende Gegenüberstellung auch zu jenen Messverfahren gegeben, auf denen ältere Datensätze basieren. Auf die detaillierte Abhandlung all jener Messverfahren, die nur in einzelnen Teilprojekten zum Einsatz kamen, um gebietsspezifische Bedingungen besser erfassen zu können, wird nicht weiter eingegangen (HEYER und SCHROTTKE 2013).

Sedimentumlagerungen führen häufig zu morphologischen Änderungen der Gewässersohle. Dort, wo diese Prozesse schnelle und große Tiefenänderungen der Gewässersohle mit massiven Einschränkungen in der Nutzbarkeit des Küstengebietes zur Folge haben, werden regelmäßig Tiefenlotungen zur Kontrolle durchgeführt. Dies erfolgt seit nunmehr vielen Jahren über den Einsatz von Einstrahl- (SBES) bzw. Mehrstrahlecholoten (MBES). Auflösung und Genauigkeit der Tiefenangaben sind dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. So kommt es bei den eingesetzten Gerätetypen auf die u. a. gerätespezifische Abstrahlgeometrie und die genutzte Frequenz an. Mit herkömmlichen SBES werden Tiefendaten nur entlang des abgefahrenen Messprofils erhoben. Die maximale Datendichte entlang dieser Profillinie ergibt sich aus der höchstmöglichen Pulsrate, der Wassertiefe und der Fahrtgeschwindigkeit. Bei MBES, wie den Fächerecholoten, werden zeitgleich nicht nur Tiefendaten entlang des abgefahrenen Messprofils, sondern auch auf parallel dazu liegenden Profillinien erhoben. Auf diese Weise lassen sich ganze Flächen mit wesentlich höheren Datendichten pro Zeiteinheit erzeugen.

Die räumliche Datengüte beider Systemfamilien hängt maßgeblich von der Positionsgenauigkeit der einzelnen Messpunkte ab. Bei den Fächerecholoten mit komplexer Rohdatenstruktur ist eine Lagegenauigkeit als Kombination systemspezifischer physikalischer Auflösung und Georeferenzierung über Lage-Sensorik (Bewegungssensor, Kreiselkompass) und satellitengestützter Positionierung im Zentimeterbereich möglich (z. B. ERNSTSEN et al. 2006). Bei Nutzung hoch aufgelöster GPS-Georeferenzierung sind bathymetrische Daten entsprechend tidenentkoppelt, d. h. Beschickungen, die weitere Fehlerquellen hervorrufen können, fallen weg.

Nicht zuletzt hängt die Datenqualität, wie bei fast allen Messsystemen, auch von den Messbedingungen ab. Hierzu zählt die Lagestabilität des genutzten Fahrzeuges, die Bewegung des Wasserkörpers durch Wellen, (Tide-) Strömung, schiffsgenerierte Turbulenzen,

die Charakteristik des Wasserkörpers, darunter Schwebstoffdichte und Schichtungsphänomene, aber auch die Beschaffenheit der Sohle selbst. Insbesondere bei Präsenz hoch mobiler, fluider Schlicke ist eine exakte Tiefenbestimmung nicht immer möglich (SCHROTTKE et al. 2006). Oft werden deshalb zwei unterschiedliche Frequenzen gleichzeitig genutzt, wissend dass höhere Frequenzen zwar eine höhere Auflösung mit sich bringen, aber auch eine geringere Reichweite bzw. Eindringung, während Schallwellen tieferer Frequenzen prinzipiell auch noch schwach konsolidierte Sohlsedimente durchdringen können und damit die darunter befindliche „feste“ Sohle erfassbar bleibt.

Die Art und Weise der Datenaufbereitung (z. B. Interpolationsverfahren) spielt ebenfalls eine Rolle. Jede Tiefenangabe müsste demnach in eine Umhüllende eingebettet sein, dessen Ausmaß sich jedoch, insbesondere bei älteren Daten, oft nur grob abschätzen lässt. Eine umfassende Datendokumentation, die oftmals fehlt, ist zur Einordnung der Datengüte dabei essentiell. Folglich lassen sich Aussagen zu morphologischen Änderungen bzw. zur Stabilität der Gewässersohle oft nicht sicher treffen. Diese Kenntnisse müssen insbesondere bei vergleichenden Gegenüberstellungen von Daten unterschiedlicher Herkunft berücksichtigt werden.

Sind, wie in AufMod, nicht nur Aussagen zu morphologischen Änderungen der Gewässersohle, sondern auch zur Mächtigkeit der mobilen Deckschicht gefordert, so bedarf es in den meisten Fällen Zusatzinformationen zum geologischen Aufbau des Untergrundes. Hier können ebenfalls hydroakustische Messverfahren zum Einsatz kommen, wie beispielsweise Sedimentecholote, deren Schallimpulse mit niedrigen Frequenzen, aber hohen Sendeleistungen in den Untergrund eindringen. Schichtwechsel bzw. Änderungen der physikalischen Sedimenteigenschaften werden durch Änderungen der akustischen Impedanz angezeigt. Das parametrische Sedimentecholot (SES-2000®) der Firma Innomar Technology GmbH, das in AufMod eingesetzt wurde, um insbesondere oberflächennahe Sedimentstrukturen und deren Lagerungsverhältnisse hochauflösend zu erfassen, bietet hierfür eine vertikale Auflösung von ≥ 6 cm, bei wassertiefen- und frequenzabhängigen Genauigkeiten von z. B. 100/10 kHz: $2/4$ cm + 0,02 % der Wassertiefe (WUNDERLICH and MÜLLER 2003). Vorteil bei dieser Technik ist u. a. der vergleichsweise schmale Abtastbereich, der sowohl bei der Primärfrequenz von 100 kHz, als auch bei den wählbaren Sekundärfrequenzen (4-15 kHz) identisch ist.

Die gewünschten Informationen lassen sich jedoch nicht immer direkt und ausschließlich an den Messdaten ablesen. Je nach genutzter Auswertetechnik (programmgestützt oder manuell) können sich voneinander abweichende Dateninterpretationen ergeben. Meist ist ein Datenabgleich (ground-thruthing) mit Kernbohrungen notwendig, insbesondere in Gebieten, in denen Angaben zum vertikalen Aufbau der Gewässersohle fehlen oder die großen Änderungen unterliegen.

Hydroakustisch basierte Messdaten werden heutzutage immer häufiger auch bei der Erhebung flächendeckender Daten zur Oberflächensedimentverteilung und -charakteristik genutzt. An erster Stelle stehen dabei die Seitensichtsonare (SSS), die es mittlerweile in den unterschiedlichsten Ausführungen gibt. Wie bei allen anderen hydroakustischen Messsystemen erfolgt auch bei den Seitensichtsonaren die Datenerhebung über die Aussendung von Schallwellen und die anschließende Erfassung des an Grenzflächen reflektierten oder rückgestreuten Messsignals, hier vorrangig der Sohloberfläche (BLONDEL and MURTON 1997; BLONDEL 2009; LURTON 2002). Die Rückstreuintensitäten stehen dabei in direktem Zusammenhang mit der mikro- (Korngröße) bis makroskaligen (Mor-

phologie) Sohlrauheit sowie den physikalischen Sedimenteigenschaften (u. a. Zusammensetzung, Lagerungsdichte). Ein wesentlicher Fortschritt bei der Nutzung moderner hydroakustischer Messsysteme, insbesondere aber bei Seitensichtsonaren, ist die Umstellung auf die digitale Datenerfassung. Damit sind umfassende, nachträglich durchführbare Korrekturverfahren möglich, die nicht zuletzt auch die Vergleichbarkeit von SSS-Daten erhöhen. Zudem werden immer mehr automatisierte Verfahren zur Sedimentklassifizierung eingesetzt (z. B. BARTHOLOMÄ 2006, 2011). Eine Kalibrierung von SSS-Aufzeichnungen mit Sedimentinformationen aus Bodenproben ist dennoch stets erforderlich.

In AufMod wurden hierzu Sedimentproben entweder mit einem van Veen-Backengreifer oder einem Shipek-Greifer genommen und aus dem daraus verfügbaren Sedimentmaterial repräsentative Teilproben, möglichst der oberen 4 cm entnommen. Unter Verwendung einer speziell für das Projekt entwickelten Eingabemaske konnte eine zur Sedimentbeprobung zugehörige, standardisierte Datendokumentation erfolgen. Diese ist den heute abrufbaren Daten als Metadaten hinterlegt (WOSNIOK et al. 2015). So ist jeder Probe eine einheitliche Grobansprache mit klar definierten Werteskalen zugeordnet und wesentliche Zusatzinformationen beigelegt, wie z. B. Angaben zum Lagerungsgefüge oder zum prozentualen Schlick-Anteil. Diese Maßnahme zeigte sich als gewinnbringend, da hiermit die ansonsten nur marginal beachteten Metadaten nun einen ganz neuen Stellenwert erhalten und weiterführende Interpretationen zulassen.

Dieser Sachverhalt lässt sich am Beispiel der Sedimentproben verdeutlichen, die sich durch eine nicht-kohäsive Matrix, beispielsweise Sand, auszeichnen, jedoch von kohäsiven Feinsedimenten in Form sogenannter Schlickgerölle durchsetzt sind. Eine derartige Oberflächensedimentbeschaffenheit wurde vor allem in den Ästuaren und Wattgebieten immer wieder angetroffen. Diese warf insbesondere bei der laborgestützten Auswertung zunächst die Frage auf, wie mit solchen Mischproben zu verfahren sei, da der Anteil $< 63 \mu\text{m}$ nicht ohne weiteres dem Matrixsediment zugeordnet werden kann. Streng genommen handelt es sich um Proben, die Sedimente unterschiedlichster Genese beinhalten. Dieser Sachverhalt wird über die „klassische“ Analytik nicht automatisch dargestellt. Neue Zusatzinformationen zur Menge (Anzahl), räumlichen Verteilung (Bedeckungsgrad der Sedimentoberfläche im Greifer bzw. Raumbeanspruchung in der Matrix) und Beschaffenheit (u. a. Größe, Wassergehalt) der Schlickgerölle geben hier nun nicht nur den Hinweis auf ein Mischsediment der besonderen Art, was es bei der Nutzung der Kornverteilungsdaten zu berücksichtigen gilt, sondern lassen auch Interpretationen zur Verteilung von Schlickgeröllen über Raum und Zeit zu (siehe Kap. 4).

Insgesamt wurden die Korngrößenverteilungen in AufMod hauptsächlich mittels Trockensiebung nach ASTM in $\frac{1}{4}$ Phi-Stufung von 63-2000 μm ermittelt. Bei Schlickanteilen (Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$) von mehr als 30 Gewichtsprozent am Gesamtsediment wurden die Proben, die im Rahmen von Ausfahrten der Universität Kiel genommen wurden, zusätzlich mittels Laserbeugung (0,04-2000 μm) analysiert. Am Institut Senckenberg am Meer wurden die Sedimentproben fraktioniert untersucht, d. h. die Kiesfraktion wurde mechanisch gesiebt, die Sandfraktion mit der MacroGranometer Sinkgeschwindigkeitsröhre und die Schlickfraktion mit dem Sedigraphen analysiert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in gleicher Weise. Zur Klassifikation der Sedimente gemäß ihrer Korngrößenverteilung wurde die Skala von „Udden-Wentworth“ (ursprünglich WENDWORTH 1922) verwandt. Die Zuordnung und Benennung der Klassen erfolgte über die berechneten Zentralmaße Haupt- bzw. ersten Modus und Medianwert d_{50} . Bei Sedimentproben mit

hohem organischem Anteil erfolgten zudem Glühverlustbestimmungen in Anlehnung an die DIN 18128. Dies diente zur Abschätzung des partikulären Anteils an organischem Kohlenstoff in den Sedimentproben.

Die Porosität stellt einen wichtigen Sedimentparameter dar und wurde somit in AufMod nach Möglichkeit messtechnisch erfasst, um errechnete Werte aus dem mittleren d₅₀ zu flankieren. In marinen Lockersedimenten wird die Porosität von verschiedenen Faktoren wie der Korngröße, -Form und Mineralogie, aber auch von der Sortierung und Packungsdichte sowie von der Sedimentaauflast beeinflusst (WHEATCROFT 2002). Die Erhebung von Porositätsdaten kann je nach Sedimenttyp mit hohen Ungenauigkeiten belegt sein, eine standardisierte Analytik gibt es noch nicht. Mit Kenntnisnahme dieses Sachverhaltes wurden in AufMod insgesamt 467 Sedimentproben zur Bestimmung der Porosität entnommen. Kohäsive Feinsedimente wurden dabei mit einer Spritze beprobt, bei sandigem Material kam ein dünnwandiger 100 ml Nunc-Becher zum Einsatz. Der Becherboden war zum besseren Entweichen der Luft angebohrt. Die Proben wurden getrocknet und bei Bedarf gemörsert. Aus dem bekannten Probenvolumen und -wassergehalt wurde die Porosität errechnet, Wassersättigung des Probenmaterials vorausgesetzt. Die Salinität des Porenwassers wurde, wenn vorhanden, nicht berücksichtigt. Dank der Verknüpfung der Porositätswerte mit den bereits erwähnten, detaillierten Metadaten konnten weitergehende Interpretationen zu den Ursachen der Werteschwankungen gegeben werden (siehe Kap. 4).

Ein wesentliches Ziel in AufMod war es, alle verfügbaren Messdaten in für alle nutzbare, zahlencodierte Datensätze mit einer nachvollziehbaren Vergleichbarkeit bereitzustellen (siehe Datenprodukte – Shelf Geo-Explorer). Das galt vor allem für die Daten aus den SSS-basierten Seegrundkartierungen. Hierzu wurden Areale mit gleichen oder sehr ähnlichen Rückstreumustern als Bereiche mit hinreichend ähnlichen Sedimenteigenschaften gewertet und in Polygone überführt (siehe Abb. 1). Dort, wo sich selbst bei optimalen Aufnahmebedingungen Sedimentgrenzen nicht klar in SSS-Aufzeichnungen darstellen ließen, insbesondere bei Präsenz von „fließenden“ Sedimentänderungen, wurden Polygongrenzen geradlinig durch die Übergangsbereiche gelegt. Den Polygonen wurden dann, anhand der zugehörigen, sedimentbezogenen Informationen Sedimentklassen mit entsprechenden Sedimentparametern (u. a. prozentualer Anteil der Hauptfraktionen; Gewichtsanteile der sandigen Fraktionen mit Zentralmaßen; wenn vorhanden: Schill- und POC-Gehalt, Porosität) zugeordnet. Bei Polygonen, innerhalb derer mehr als eine Sedimentprobe genommen wurde, basieren die probenbezogenen Sedimentinformationen entsprechend auf dem arithmetischen Mittel. Polygonen ohne direkten Probenbezug wurden jeweils Werte gleichartiger Polygone zugeordnet. In Fällen, in denen Proben Daten das Oberflächensediment im zugehörigen Polygon nicht repräsentativ abbilden z. B., wenn großflächig anstehende Kleiablagerungen partiell von „mobilen“ Sandschleiern bedeckt waren, die Sedimentprobe jedoch nur Sand enthielt, wurden Sedimentparameter benachbarter Polygone mit gleicher Sedimentbeschaffenheit oder aber Mittelwerte genutzt. Oft ließen sich hoch konsolidierte Feinsedimente mittels Greifer nicht in ausreichender Menge erfassen. Wenn nicht eindeutig feststellbar war, ob es sich um Geschiebemergel/-lehm, Klei oder stark verfestigten Schlick handelte, wurde es als „konsolidierte Sohloberfläche“ ausgewiesen. Schließlich wurden allen Polygonen Angaben zur potentiellen Mobilität und zur Präsenz von Sohlformen zugeteilt.

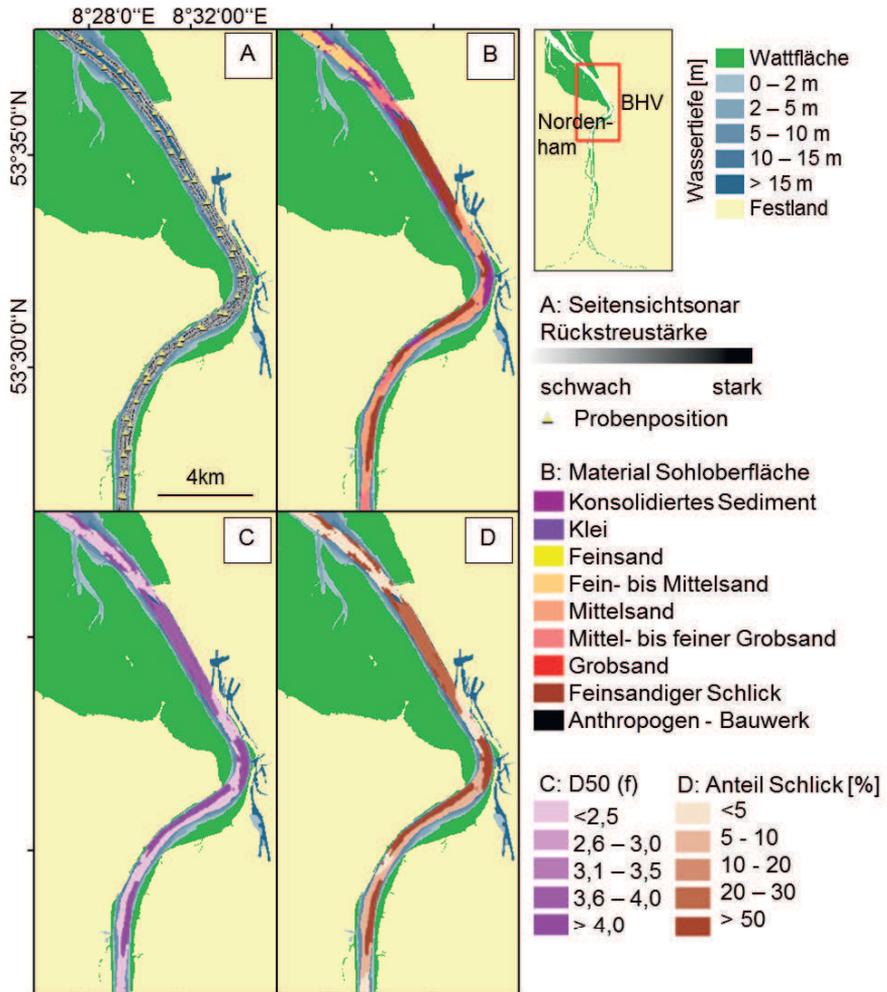


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung einer SSS-Daten (A) basierten Oberflächensedimentkartierung vom Februar 2011, hier eines Abschnittes der Hauptstromrinne im Weser Ästuar mit den Parametern: Sedimentklasse nach Folk 1954 (B), Medianwert der Korngrößenverteilung in Phi (C) und Feinkorngehalt in Gewichtsprozent (D).

3 Fokusegebiete

Die Deutsche Bucht stellt einen riesigen Untersuchungsraum dar, in dem Sedimentverlagerungen auf unterschiedlichen Raum- wie Zeitskalen stattfinden. Im weltweiten Vergleich kann die Deutsche Bucht als ein bereits messtechnisch gut erfasstes Meeresgebiet eingestuft werden. Zumindest liegen bathymetrische und sedimentologische Daten aus vielen Teilbereichen vor, wenn auch auf räumlich und zeitlich unterschiedlichsten Aufnahmen basierend. Die Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht (Nr. 2900) nach FIGGE (1981), die sogenannte „FIGGE-Karte“, gibt beispielsweise einen sehr

umfassenden Überblick über die großräumige Verteilung der Oberflächensedimente, wissend, dass darin enthaltene Daten meist auf Korngrößeninformationen (Medianwert, Sortierung, Schiefe) diskreter Proben mit unterschiedlichsten Bezugszeiten basieren. Die Belastbarkeit der Informationen auf interpolierten Flächen hinsichtlich des unterschiedlich dichten Datenrasters schwankt somit teils stark. Zudem sind, anders als in AufMod, die obersten 10 cm Sedimentsäule einbezogen worden. Eine Differenzierung der Proben hinsichtlich der auf Kornverteilungen einflussnehmenden Gemengteile wie Schill oder Schlickgerölle erfolgte nicht.

Da es mit derzeit verfügbaren Methoden nicht möglich ist, den gesamten Untersuchungsraum zeitgleich und mehrfach flächendeckend messtechnisch zu erfassen, wurden sogenannte „Fokusgebiete“ ausgewählt, innerhalb derer im Wesentlichen neue Felddaten erhoben und diese auch für Prozessstudien genutzt wurden. Diese wurden so ausgewählt, dass die Systeme Schelf/Vorstrand, Wattenmeer und Ästuar repräsentativ vertreten waren. Ferner wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass auch verwertbare Daten älterer Untersuchungen vorlagen, um diese mit in die Zeitreihenuntersuchungen einbeziehen zu können. Die Fokusgebiete umfassten das Küstenvorfeld der Inseln Spiekeroog und Sylt, die nördliche Jade, die Ästuar von Weser und Elbe sowie die Gezeitenrinnen Piep (Dithmarscher Wattenmeer) und Norderhever (Nordfriesisches Wattenmeer). Die Gebiete unterscheiden sich bekanntermaßen in mehreren wesentlichen Aspekten, darunter in der Entfernung zur Küste mit entsprechenden Wassertiefen und zugehöriger Energieeinwirkung durch Wind und Tide, in der Beeinflussung durch den Abfluss von Oberwasser sowie in ihrem geologischen Aufbau und damit letztlich in der resultierenden Morpho- und Sedimentdynamik. Bei der Auswahl der Gebiete stand dennoch vor allem die Übertragbarkeit der dort erzielten Ergebnisse im Vordergrund, die im Folgenden beispielhaft aufgezeigt werden.

4 Beispiele der Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit spezifischer Erkenntnisse

Der in AufMod gewählte Ansatz, Messungen hauptsächlich in den Fokusgebieten durchzuführen, wirft die Frage auf, in wieweit die daraus ableitbaren Erkenntnisse auf andere Gebiete übertragbar sind. Auch wenn viele Ergebnisse auf den ersten Blick betrachtet, überwiegend gebietsspezifischer Natur sind, lassen sich doch viele Aspekte verallgemeinern. Ein Beispiel findet sich in der oft engen Zuordnung zwischen räumlicher Verteilung von Oberflächensedimenten und geologisch-sedimentologischem Aufbau des darunter befindlichen Untergrundes. Bekanntermaßen wird die Seegrundoberfläche in den Gebieten der Deutschen Bucht, in denen das Pleistozän in Form von Geschiebemergel oder anderen glaziogenen Ablagerungen entweder direkt am Seegrund oder nahe der Seegrundoberfläche ansteht, oft von heterogenen Grobsedimenten eingenommen. Diese sogenannten Relikt- bzw. Restsedimentflächen sind weit verbreitet, vor allem auf dem Nordseeschelf, wo oft eine mächtigere Auflage holozäner Sedimente fehlt (ZEILER et al. 2000a, 2000b). Änderungen in der räumlichen Verteilung der Oberflächensedimente auf dem Schelf sind vor allem auf Sturmereignisse zurückzuführen. Dabei ändert sich unter welleninduzierter Energieeinwirkung aber meist nur die räumliche Ausdehnung der einzelnen Faziesbereiche, nicht aber die grundsätzliche Verteilungscharakteristik ihrer Oberflächensedimente. Die Situation fand sich in verschiedenen Bereichen des Nordsee-

schelfs, die im Rahmen von AufMod untersucht wurden und deckt sich mit den bisher bekannten Informationen.

Vergleichbare Abhängigkeiten zwischen geologisch-sedimentologischem Aufbau des oberflächennahen Untergrundes und Oberflächensedimentverteilung finden sich auch in den Bereichen der Deutschen Bucht, die sich jedoch durch eine höhere Morphodynamik und einer meist wesentlich mächtigeren holozänen Sedimentauflage auszeichnen. Das sind vor allem die Vorstrände, Watten und Ästuar. Hierzu sei ein Blick auf die Ergebnisse aus dem Fokusegebiet Spiekeroog geworfen. Einzig dort in der Deutschen Bucht finden sich küstengebundene Zungenriffe, wie es sie ansonsten weltweit an vielen Küsten gibt (u. a. SWIFT 1987; VAN DE MEENE and VAN RIJN 2000). Im Küstenvorfeld von Spiekeroog sind die Zungenriffe in Wassertiefen von 9 bis 20 m anzutreffen. Anhand neuer Daten wird deutlich, wie sehr sich dort die Sedimente des anstehenden pleistozänen Untergrundes an der Sohloberfläche abbilden, obwohl sie von einer bis zu 3 m mächtigen, mobilten, holozänen Sandauflage bedeckt sind (siehe Abb. 2). Das der dortige Geschiebemergel als Materiallieferant fungiert, spiegelt sich vor allem in den grobkörnigen Anteilen der Korngrößenverteilungen wider, die überwiegend die Bereiche der landwärtigen Flanken der äußeren Zungenriffe repräsentieren. Mehrere Momentaufnahmen über einen Zeitraum von zwei Jahren (März 2010 bis April 2012) zeigen insgesamt nur geringfügige Veränderungen in der generellen Verteilung der Oberflächensedimente und das, obwohl sich die Zungenriffe nachweislich bis zu 20 m pro Jahr verlagert haben. Der Verlagerungsprozess ist hier, im Vergleich zum tieferen Schelfbereich, allerdings nicht primär ereignisgesteuert, sondern unterliegt maßgeblich dem Tideeinfluss.

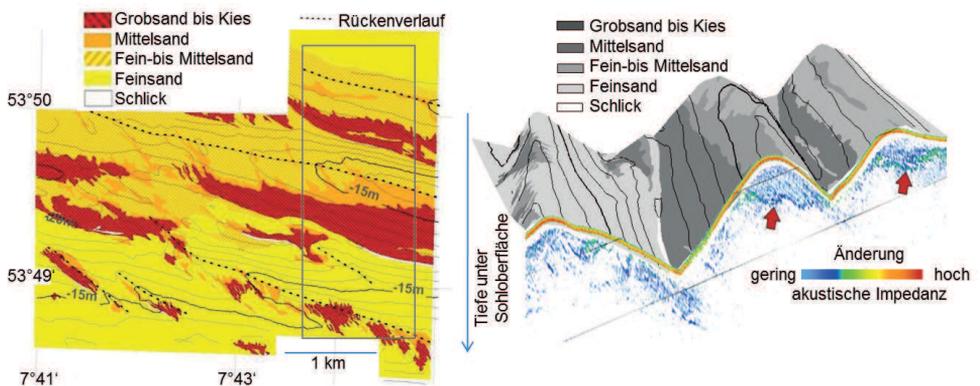


Abbildung 2 (links): Sedimentverteilung auf den Zungenriffen seewärts der Insel Spiekeroog auf der Basis von SSS-Daten aus dem Jahr 2010 und (rechts): 3D-Rekonstruktion der bis zu 3 m mächtigen Lockersedimentauflage auf Basis von SSS- und SES-Daten; Lokalität siehe Rechteck linke Abb. (mod. nach MARKERT et al. 2015).

Auch in den Watten und Ästuaren spiegelt sich vielerorts der „feste“ Untergrund an der überliegenden Oberflächensedimentzusammensetzung wider. Auch dort verschiebt sich die Oberflächensedimentverteilung zu größeren Kornspektrten, wenn die holozäne Sedimentauflage ausdünn oder auskeilt und pleistozäne Ablagerungen anstehen. Insbesondere in den Watten und Ästuaren, wo die Gezeitenrinnen oft ihren Verlauf ändern, können auch Ablagerungen, die ansonsten als erosionsstabil gelten, durch laterale Erosionspro-

zesse im Zuge von Kolkbildungen auf Flächen oder aber durch Baggerungen innerhalb von Fahrrinnen abgetragen werden (REINECK 1984). So finden sich dort immer wieder Abbruchkanten, an denen pleistozäne aber auch konsolidierte Feinsedimente des Holozäns zeitweilig unbedeckt anstehen, erodiert und schließlich in Form von zunächst kantigen Bruchstücken abtransportiert werden (siehe Abb. 3 und RICKLEFS et al. 2015). Ferner spiegelt sich die Präsenz solcher Erosionsbereiche auch in weiter entfernt liegenden Gewässerabschnitten durch charakteristische Mischsedimente wider.



Abbildung 3: Aufnahme aus dem Gebiet der Medemrinne (Elbmündung) mit einer unter Erosion befindlichen Wattkante, bestehend aus konsolidierten Feinsedimenten.

Gemeint sind jene Bereiche, in denen die meist siltig-sandige Gewässersohle von sogenannten Schlickgeröllen, d. h. von durch Sohltransport kantengerundeten Bruchstücken, durchzogen ist bzw. sogar überdeckt wird (vgl. Kap. 2). Je nach Konsolidierungsgrad und Materialherkunft können die in den Untersuchungsgebieten angetroffenen Schlickgerölle in zwei Typklassen eingeteilt werden. Typ 1 umfasst jene aus stark verfestigtem Material (konsolidierter Schlick, Klei, Geschiebemergel, Torf, Mudde), während schwach konsolidierte Feinsedimente, die aus der Aufarbeitung kürzlich gebildeter Schlickablagerungen stammen (vgl. Kap. 2), dem Typ 2 zugeordnet werden (siehe Abb. 4).

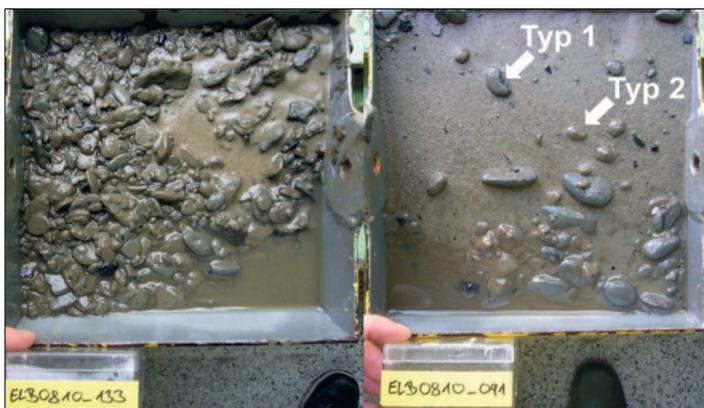


Abbildung 4: Fotos von Greiferproben exemplarisch aus dem Elbe Ästuar. Die feinsandige Matrix ist unterschiedlich dicht von Schlickgeröllen überlagert bzw. durchsetzt. Auf dem Foto rechts wird zudem auf Schlickgerölle hingewiesen, die sich insbesondere durch ihre Konsistenz (Typ 1: hart, Typ 2: weich) bzw. Materialherkunft unterscheiden.

Schlickgerölle des Typs 2 können dabei derart weich sein, dass diese bei einer Greifer gestützten Beprobung nach dem Hieven des Greifers und dem Abfließen des überstehenden Wassers auf der Sedimentoberfläche zerfließen. Es ist somit davon auszugehen, dass jene des Typs 2 aufgrund ihrer Konstitution nur über kurze Strecken transportierbar sind; ihr regionales Vorkommen demnach eng an die zugehörige Materialquelle gekoppelt ist (siehe Abb. 5, obere Grafik). Hochfluide Schlicke werden bekanntlich vornehmlich in den ästuarinen Trübungszone gebildet, was den prozentualen Anstieg von Schlickgeröllen des Typs 2 im Bereich der Flusskilometer 695 bis 715 im Elbe Ästuar zur Aufnahme im August 2010 verdeutlicht (siehe Abb. 5, obere Grafik).

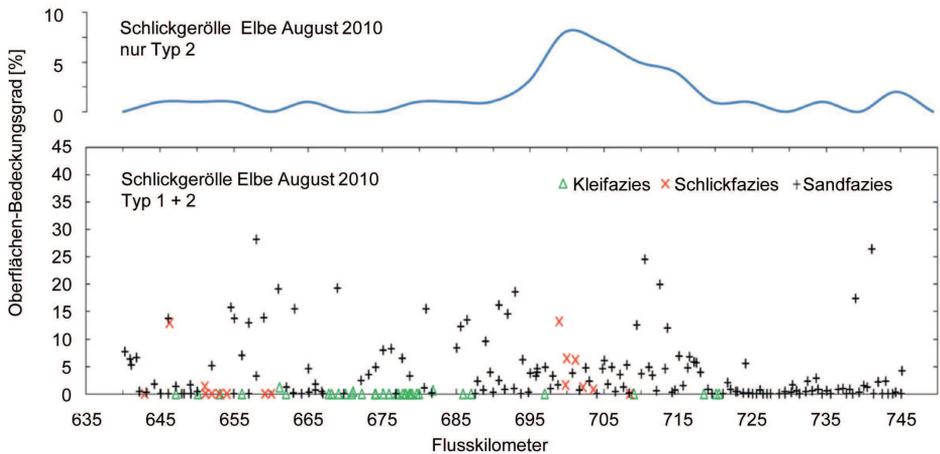


Abbildung 5: Prozentuale Bedeckung der Gewässersohle mit Schlickgeröllen entlang des Elbe Ästuars im August 2010, exemplarisch mit Ausweisung der Typklasse 2 (obere Grafik) sowie in Kopplung mit dem zugehörigen Matrixtyp (untere Grafik).

Schlickgerölle vom Typ 1 traten zu den Aufnahmen in den untersuchten Gewässerabschnitten zum Teil großflächig auf (siehe Abb. 5, untere Grafik). Oft wurden sie in Mengen angetroffen, so dass das Oberflächensediment in den Greiferproben streng genommen als Konglomerat mit sandiger Matrix hätte angesprochen werden müssen. Sie bildeten teils eine nahezu geschlossene Deckschicht, so dass davon auszugehen ist, dass mit großer Wahrscheinlichkeit unter dieser Begebenheit die Mobilität des darunter befindlichen, meist sandigen Sediments deutlich beeinträchtigt wurde. Werden einzelne Faziesräume betrachtet, so zeigt sich beispielsweise für die Kleifazies, für die der Bedeckungsgrad der Sohloberflächen mit Schlickgeröllen zur Aufnahme im August 2010 als gering eingestuft werden kann, dass das anstehende Sediment zwar als Materialquelle fungiert, nicht aber gleichzeitig auch Depositionsraum für daraus hervorgehende Schlickgerölle ist (siehe Abb. 5, untere Grafik). Dieses Beispiel verdeutlicht zudem die mögliche Nutzbarkeit von Schlickgeröllen als eine Art Tracer zur Analyse von Sedimenttransportwegen bzw. -entfernungen.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass das Vorkommen von Schlickgeröllen nicht nur in den Ästuaren, sondern auch in den Watten der Deutschen Bucht und letztlich auch überall dort, wo Entstehungsbedingungen gegeben sind, als weitreichender zu betrachten ist, als bisher veröffentlicht; ihre Präsenz, je nach Menge als sedimentcharakterisierendes Element einbezogen werden muss.

Ein anderer wichtiger sedimentcharakterisierender Parameter, der in AufMod vor allem in den ästuarinen Untersuchungsräumen besondere Betrachtung fand, insgesamt aber einen hohen Stellenwert für alle Sedimente im gesamten Untersuchungsraum hat, ist die Porosität. Dieser sedimentphysikalische Parameter war vor allem für die im Projekt durchgeführte Modellierung im Hinblick auf die Konsolidierung von Sedimenten und deren Mobilisierungspotential von Interesse. Im Durchschnitt lagen die Porositätswerte bei 67 % (Weser; $\sigma:9,7$) bzw. 73 % (Elbe; $\sigma:10,4$) in Bereichen mit tonig-siltiger und bei 38 % (Weser; $\sigma:5,5$) bzw. 42 % (Elbe; $\sigma:9,7$) in jenen mit sandiger Matrix. Damit entsprechen die Durchschnittswerte durchaus denen, die aus der Literatur bekannt sind, was eine gewisse Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Bereiche der Deutschen Bucht unterstreicht: Bei FÜCHTBAUER und REINECK (1963) finden sich für Sedimente des Schlick- bzw. Mischwattes sowie für jene aus Hafengebieten Porositäten zwischen 50 bis über 80 %. Für Sande der südlichen Nordsee liegt sie im Mittel zwischen 37 und 42 %. HAMILTON und MENARD (1956) geben für tonige bis siltige Ablagerungen aus 30 m Wassertiefe mittlere Porositätswerte von 51 bis über 70 %, für Sande von 38 (gS) bis 48 % (sfS) an. Auch WHEATCROFT (2002) gibt für Sande aus Wassertiefen von 19 m Porositätswerte an, die mit 36 bis 49 % denen aus dem Weser und Elbe Ästuar vergleichbar sind. Inwieweit die Porosität räumlichen wie zeitlichen Schwankungen unterworfen ist, wird exemplarisch aus Abb. 6 deutlich. Die weiter oben aufgeführten Standardabweichungen (σ) sowie die in Abb. 6 aufgetragenen Porositätswerte weisen ferner darauf hin, dass die Porosität feinkörniger Sedimente im Vergleich zu sandigen Ablagerungen stärker variieren. Hierfür können die unterschiedlich hohen Konsolidierungsgrade der feinkörnigen Ablagerungen heran gezogen werden. Insgesamt weichen die Porositätswerte, die die Sedimente aus dem Weser Ästuar repräsentieren weniger vom Mittel ab, als jene aus dem Elbe Ästuar. Inwieweit Werteschwankungen über Raum und Zeit mit Änderungen einflussnehmender Rahmenbedingungen (z. B. jahreszeitlich bedingte Oberwasserabflussraten, Sturmereignisse, Lage der Trübungszone) in Zusammenhang stehen, kann derzeit noch nicht umfassend beantwortet werden.

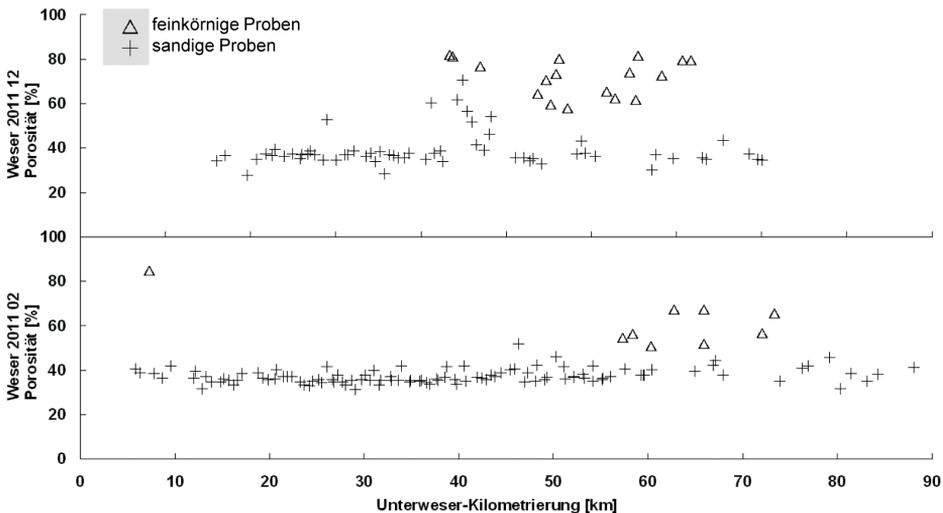


Abbildung 6: Porositätswerte der im Weser Ästuar zu den Untersuchungen im Februar und Dezember 2011 entnommenen Sedimentproben; aufgetragen gegen die Flusskilometrierung.

Abschließend sei noch auf eine zentrale Erkenntnis zur generellen Oberflächensedimentverteilung in den einzelnen Fokusgebieten und deren Änderung über Raum und Zeit durch die Kopplung von aktuellen mit älteren Daten eingegangen. Wie schon weiter oben aufgeführt, ergeben sich nicht zuletzt durch die geologische Vorprägung und die über Raum und Zeit unterschiedlich einwirkenden Energien teils wesentliche Unterschiede in der Ausprägung der Oberflächensedimente in den einzelnen Untersuchungsräumen der Deutschen Bucht. Und doch ist ihnen gemein, dass die bereits in älteren Datensätzen aufgeführten, großräumigen Faziesbereiche, die sich mit moderner Aufnahmetechniken zwar heute noch wesentlich differenzierter darstellen lassen, langfristig erhalten bleiben. Änderungen über Raum und Zeit lassen sich hauptsächlich an den Faziesgrenzen feststellen.

5 Schriftenverzeichnis

- BARTHOLOMÄ, A.: Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight, southern North Sea. In: *Geo-Marine Letters*, 26, 177-184, 2006.
- BARTHOLOMÄ, A., HOLLER, P., SCHROTTKE, K. and KUBICKI, A.: Acoustic habitat mapping in the German Wadden Sea – Comparison of hydro-acoustic devices. In: *Journal of Coastal Research*, Special Issue 64, ICS 2011 Proc., 1-5, 2011.
- BLONDEL, P.: *Handbook of Sidescan Sonar*. Berlin, Springer, 2009.
- BLONDEL, P. and MURTON, B.J.: *Handbook of seafloor sonar imagery*. John Wiley & sons, Chichester, 1997.
- ERNSTSEN, V.B., NOORMETS, R., HEBBELN, D., BARTHOLOMÄ, A. and FLEMMING, B. W.: Precision of high resolution multibeam echo sounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment. In: *Geo-Marine Letters*, 26 (3), 141-149, doi: 10.1007/s00367-006-0025-3, 2006.
- FIGGE, K.: Begleitheft zur Karte der Sedimentkartierung in der Deutschen Bucht, Nr. 2900, Hamburg, BSH, 1981.
- FÜCHTBAUER, H. und REINECK, H. R.: Porosität und Verdichtung rezenter, mariner Sedimente. *Sedimentology* 2. 1963, 294-306, 1963.
- HAMILTON, L. H. and MENARD, H. W.: Density and Porosity of Seafloor Surface Sediments off San Diego, California. *AAPG Bulletin*, 40, 1956, 754-761, 1956.
- HEYER, H. und SCHROTTKE, K.: Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod. doi: 10.2314/GBV:780783271, 2013.
- LURTON, X.: *An introduction to underwater acoustics*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2002.
- MARKERT, E.; KRÖNCKE, J. and KUBICKI, A.: Small scale morphodynamics of shoreface – connected ridges and their impact on benthic macrofauna. In: *Journal of Sea Research*, 99, 47-55, 2015.
- MILBRADT, P.; VALERIUS, J. and ZEILER, M.: Das funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. *Die Küste*, 83, 2015.
- REINECK, H.-E.: *Aktuogeologie klastischer Sedimente*. Frankfurt am Main, Verlag W. Kramer. 348, 1984.

- RICKLEFS, K.; ARP, D. und STAGE, M.: Zur zeitlichen Variabilität der Sedimentverteilungen in den Gezeitenrinnen Piep und Hever. *Die Küste*,83, 2015.
- SCHROTTKE, K.; BECKER, M.; BARTHOLOMÄ, A.; FLEMMING, B. W. and HEBBELN, D.: Fluid Mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. In: *Geo-Marine Letters* 26 (3), 185-198, 2006.
- SWIFT, D. J. P.: Shoreface-connected sand ridges on American and European shelves, a comparison. *Estuarine and Coastal Marine Sciences*, 7, 1987, 257-273, 1987.
- VAN DE MEENE, J. W. H. and VAN RIJN, L. C.: The shoreface-connected ridges along the central Dutch coast - part 1: field observations. *Continental Shelf Research*, 20, 2000, 2295-2323, 2000.
- WENDWORTH, C. K.: A scale of Grade and Class terms for Clastic sediments. *Journal of Geology*, Vol. 30, 377-392, 1922.
- WHEATCROFT, R. A.: In Situ Measurements of Near-Surface Porosity in Shallow-Water Marine Sands. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 27, No. 3. 2002.
- WINTER, C.; LEFEBVRE, A.; BENNINGHOFF, M. und ERNSTSEN, V. B.: Die Verteilung und Eigenschaften von Bodenformen in der Deutschen Bucht, eine Rekonstruktion der Karten von Ulrich (1973). *Die Küste*,83, 2015.
- WOSNIOK, C. und VALERIUS, J.: Datenmanagement in AufMod. *Die Küste*,83, 2015.
- WUNDERLICH, J. and MÜLLER, S.: High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics. *International Ocean Systems* 7, (4):6–11, 2003.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. and FIGGE, K.: Mobile Sand Deposits and Shoreface Dynamics in the Inner German Bight (North Sea). *Marine Geology*, 170, 2002a.
- ZEILER, M.; SCHULZ-OHLBERG, J. und FIGGE, K.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste, *Die Küste*, 62, 2000b.