

Wirkungskontrolle von Wasserinjektionsbaggerungen auf subaquatischen Dünenfeldern in der Unterweser auf der Basis von hydroakustischen, optischen und laseroptischen Messungen

Svenja Papenmeier¹, Kerstin Schrottke¹, Alexander Bartholomä² & Volker Steege³

¹ Christian-Albrechts Universität zu Kiel, Institut für Geowissenschaften und Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“, Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel, sp@gpi.uni-kiel.de, ²Forschungsinstitut Senckenberg am Meer, Südstrand 40, 26382 Wilhelmshaven, ³Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Referat WS 14 – „Klima- und Umweltschutz für die Wasserstraßen, Gewässerkunde“, Robert-Schuman-Platz 1, 53175 Bonn

Schlüsselwörter: WI-Baggerung, Tideweser, Schwebstoffdynamik, LISST-100x

Einleitung

Tidedominierte Flussmündungen werden weltweit immer intensiver als Wasserstrassen genutzt. Vielerorts hat das wiederkehrende wasserbauliche Eingriffe in Form von Nassbaggerungen zur nutzungsorientierten Anpassung und Erhaltung der Flussgeometrie zur Folge. Insbesondere Fahrrinnenabschnitte, deren Sohlmorphologie von mobilen, mehreren Metern hohen subaquatischen Dünen geprägt ist, müssen zur Gewährleistung der Schiffbarkeit regelmäßig bagggestützt unterhalten werden. Mit herkömmlichen Baggertechniken wird das Baggergut vom Gewässergrund entnommen, um es andern Orts zu verbringen. Hierbei entstehen hohe Transport- und Verbringkosten. Diese entfallen beim Wasserinjektionsverfahren (WI), da das umzulagernde Sediment am Ort, durch Injektion von Wasser in den Gewässergrund, mobilisiert und unter Ausnutzung der gewässereigenen Transportenergie verlagert wird (Meyer-Nehls et al. 2000, Nasner 1992). Die Effizienz dieses Verfahrens in Gewässerabschnitten mit unterschiedlicher Sohlcharakteristik und Hydrodynamik wurde bereits eingehend untersucht, wie Meyer-Nehls et al. (2000) zusammenfasst. Der Einfluss des Verfahrens auf die natürliche Sedimentdynamik und Gewässerökologie ist hingegen nicht vollständig geklärt. Ziel dieser Studie ist somit, den Grad der Einflussnahme sowohl auf die Gewässersohle als auch auf die Wassersäule mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu bestimmen. Mögliche Beeinträchtigungen der Gewässerökologie sollen anhand von Änderungen am Makrozoobenthos abgeleitet werden (vgl. Schmitt et al. dieses Heft).

Untersuchungsgebiet

Der ~120 km lange tidebeeinflusste Weserabschnitt von Bremen bis zur Nordsee gehört zu den wichtigsten und gleichzeitig stark ausgebauten Wasserstrassen Deutschlands (Abb. 1a). Seit 2004 wird hier das WI-Verfahren für Unterhaltungsmaßnahmen eingesetzt und soll auch im Rahmen einer weiteren Fahrrinnenvertiefung genutzt werden (vgl. Schmitt et al. dieses Heft). Das heute meso- bis makrotidale Gewässer ist im Bereich zwischen Bremen und Bremerhaven (Unterweser) derzeit auf mindestens 9 m Springniedrigwasserniveau ausgebaut. Die Gewässersohle ist vorwiegend sandig und hydraulisch rau durch die Präsenz zwei- bis dreidimensional ausgeprägter subaquatischer Dünen. Sie können bis zu 6 m hoch und bis zu 150 m lang sein (Schrottke et al. 2006). Im Zentrum der 15-20 km langen Trübungszone, welches bei mittlerem Oberwasserabfluss von 327 m³/s stromauf von Bremerhaven liegt, ist die Gewässersohle dagegen von kohäsiven

Feinsedimenten überprägt (Schrottke et al. 2005, 2006). Die Schwebstoffkonzentrationen (SSC) können dort 1 g/l übersteigen (Grabemann & Krause 2001), mit bis zu 2-fach höheren Werten zur Nipptide (Grabemann et al. 1997). Im Brackwasserbereich (BB) außerhalb der Trübungszone betragen die SSC ≤ 126 mg/l (Schuchardt et al. 1993). Während die Schwebstofffracht im Tidestrom mit Geschwindigkeiten zwischen 1-2 m/s im Mittel über die gesamte Wassersäule verteilt ist, sinkt diese zum Stauwasser ab. Interpartikuläre Kollision und Turbulenz führt zur Bildung fragiler Schwebstoffaggregate (Winterwerp & van Kesteren 2004). Nach Wellershaus (1981) können diese Durchmesser > 100 μm erreichen. Im limnischen Bereich (LB) erreichen die SSC im Durchschnitt 42 mg/l (Schuchardt et al. 1993) mit gering ausgeprägter tidaler Variabilität.

Zur Wirkungskontrolle der Wasserinjectionsbaggerungen wurden zwei Gewässerabschnitte mit jeweils 4-5 Untersuchungsboxen ausgewählt, die Hydro- und Sedimentdynamik des brackischen bzw. limnischen Milieus reflektieren (Abb. 1a-c). In den Unterhaltungs- bzw. Ausbauboxen galt es die Dünenkuppen auf die gegenwärtige Soll- bzw. geplante Ausbautiefe (Toleranz ± 50 cm) abzu-

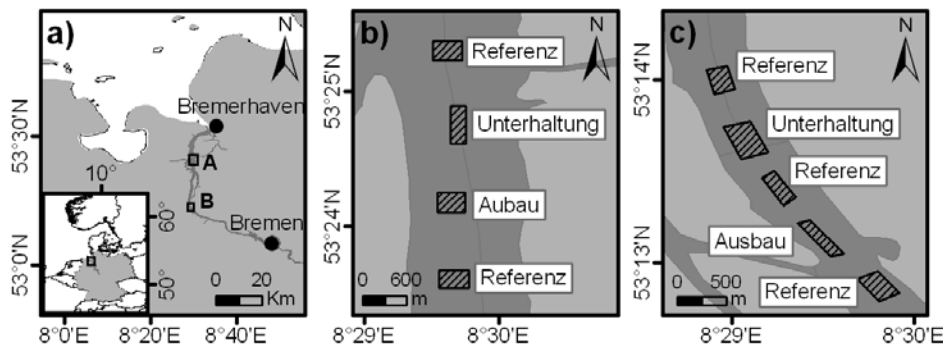


Abb. 1a-c: a) BRD Übersichtskarte, Weserlauf von Bremen – Bremerhaven, Untersuchungsabschnitte: b) brackischer und c) limnischer Bereich mit Lage der Untersuchungsboxen.

tragen. Messungen in den Referenzboxen sollten baggerunbeeinflusste Bedingungen repräsentieren. Baggeraktivitäten fanden im BB und LB am 10.06.2008 bzw. 24.06.2008 bei Nipptide und einem Oberwasserabfluss von 180 m³/s (mündl. Mitt. WSA HB, 2009) statt. Die Baggarbeiten führte die „Akke“ durch. Diese nutzt einen 10 m breiten Injektionsschlitten, der sohnah geführt wird und über Düsen große Oberflächenwassermengen mit geringem Wasserdruck in die Sohle verbringt (Stengel 2006).

Material und Methoden

Diese Studie basiert auf einem multimethodischen Ansatz mit dem die Erfassung hydro- und sedimentdynamischer Prozesse auf und in der Sohle sowie in der Wassersäule zeitgleich möglich wird (Schrottke & Bartholomä 2008, Schrottke et al. 2006). Das parametrische Sedimentecholot (SES-2000®, Innomar Technology GmbH) erzeugte, unter Nutzung von Primär- und Sekundärfrequenz (100 kHz, hier 12 kHz) vertikaler Tiefenprofile über die Wassersäule bis zu 5 m in die Sohle hinein, bei vertikale Auflösung ≥ 6 cm. Zur Bestimmung der Sohloberflächencharakteristik wurde die 330 kHz Frequenz des digitalen Zwei-Frequenz Seitensichtsonars (SSS-Sportskan®, Imagenex) genutzt. Das ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) diente zur profilierenden Strömungsmessung und Abschätzung der SSC durch Auswertung des akustischen Rückstreuesignals (Deines 1999). Genutzt wurde das 1.200 kHz Zedhead-ADCP (Zellengröße 25 cm, RDI-Teledyne™). Rückstreuintensitäten des optischen Feststoffsensors „ViSolid 700IQ“ (OBS, WTW) wurden mittels Wasserproben kalibriert. Die Entnahme erfolgte mit einem horizontalen Wasserschöpfer (2,2 l, HydroBios©) in zwei Wassertiefen. SSC wurden über Vakuumfiltration ($\varnothing 1,2$ μm) ermittelt (Schrottke & Abegg 2005). Daten zur Partikelgrößenverteilung und -Volumenkonzentration (VC) wurden mit einem LISST (Laser In-Situ Scattering & Transmissometry) vom Typ 100x-C (Sequoia® Scientific Inc.) profilierend erhoben. Das Gerät nutzt Laserbeugung an 32 Ring-

detektoren zur Partikelgrößenbestimmung; hier zwischen 2,5-500 μm (Agrawal & Pottsmith 2000). Die Messungen wurden während der Baggeraktivitäten von zwei, die Vor- und Nachmessungen von einem Schiff durchgeführt. Die hydroakustischen Messungen erfolgten auf Längsprofilen innerhalb der Fahrrinne. Stationäre Profilmessungen erfolgten über einen Tidezyklus auf Positionen in den Untersuchungsboxen.

Ergebnisse

Die SES Aufnahmen vom 24.06.2008 vor der Baggermaßnahme in der Ausbaubox (LB) zeigen bis zu 4 m hohe, ebborientierte, von kleineren Sohlformen überlagerte subaquatische Dünen. Diese zeigen ein typisches Sedimentinterngefüge (Abb. 2a). Die höchsten Dünenkuppen werden sukzessiv abgetragen wie aus den SSS Aufnahmen hervorgeht (Abb. 2b, c, schwarze Pfeile). Der Injektionschlitten wird dabei präzise über die Dünenkuppen geführt (Abb. 2b, c, weiße Pfeile). Während der Wasserinjektion erhöht sich auf der Leeseite des Schlittens das akustische Rückstreusignal wolkenartig bis in die Wassersäule. Änderungen der akustischen Rückstreuung an der Sohle im unmittelbaren Baggerumfeld deuten auf geänderte Oberflächenrauigkeiten. Abbildung 2d zeigt den Sohlzustand nach Baggerung. Die ausgewählten Dünenkuppen sind um 2 m in der Höhe reduziert (vgl.

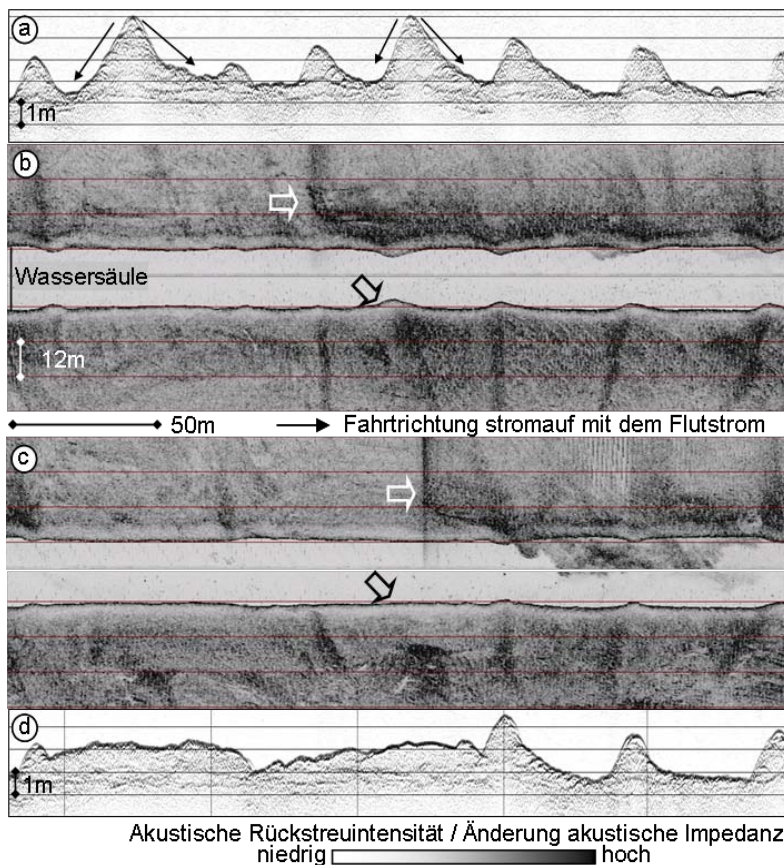


Abb. 2a+d). An den Dünenflanken und den direkt angrenzenden -Tälern finden sich neu abgelagerte Sedimente wieder. Kleinere Dünen scheinen überdeckt, jedoch zeichnen sich diese nicht anhand der Internstrukturen ab. Dagegen weisen die angrenzenden Dünenkörper keine derartigen Änderungen auf.

Abb. 2: Gewässersohle in der Ausbaubox im limnischen Bereich am 24.06.2008 zur Flutphase, dargestellt durch a) SES-Längsprofil vor der Baggerung (Pfeile markieren die Richtung der möglichen Sedimentverlagerung, b+c) SSS-Profile während der Baggerung (Pfeile: weiß: unterschiedliche Positionen des WI-Schlittens, schwarz: unterschiedlich weit fortgeschrittene Bearbeitung einer Dünenkuppe d) SES-Längsprofil nach der Baggerung.

Eine ebenso deutliche Erhöhung der akustischen Rückstreuintensität in der Wassersäule, leeseits des WI-Schlittens kann den ADCP Daten entnommen werden, wie exemplarisch für die Baggeraktivitäten in der Unterhaltungsbox (LB) dargestellt ist (Abb. 3, grauer Kasten). Die Änderung der Signalstärke nimmt einen stark exponentiellen Verlauf. Hohe Signalstärken treten direkt hinter dem WI-Schlitten, insbesondere in Sohlhöhe auf und sinken mit zunehmender Entfernung in Strömungsrichtung ab, bis diese wie in den SSS Aufnahmen nach max. 250 m und in den gezeigten ADCP Daten nach 500 m nicht mehr vom natürlichen Signal unterscheidbar sind (Abb. 2c, 3). Letzteres ändert sich im Tideverlauf, wie aus exemplarisch aufgeführten SSC Profilen beider Bereiche

deutlich wird (Abb. 4a,b). Mit zunehmendem Tidestrom erhöhen sich die Schwebstoffgehalte in der gesamten Wassersäule. Zur Stauwasserphase sinken diese zur Sohle ab.

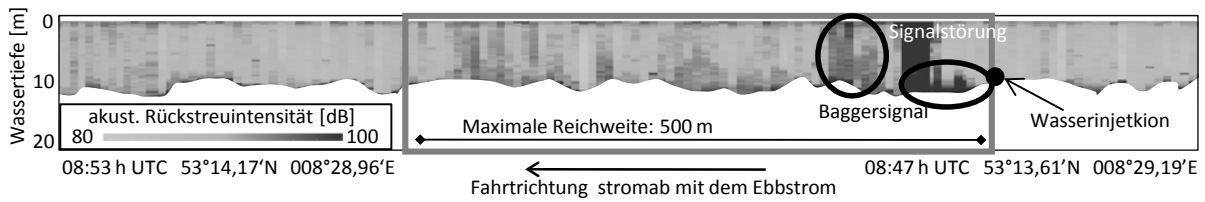


Abb. 3: Längsprofil der akustischen Rückstreuung des ADCPs am 10.06.2008 in der Unterhaltungsbox im limnischen Bereich während der Wasserinjektion.

Eine baggerinduzierte Zunahme der SSC bei Entfernungen zum Bagger von > 60 m sind nicht erkennbar (Abb. 4a,b). Die Werte liegen in beiden Bereichen zwischen 22-320 mg/l (BB) bzw. 26-128 mg/l (LB). Ähnliche Verhältnismäßigkeiten ergeben sich für die Partikelvolumenkonzentrationen mit $\leq 1.600 \mu\text{l/l}$ (BB) bzw. $\leq 470 \mu\text{l/l}$ (LB).

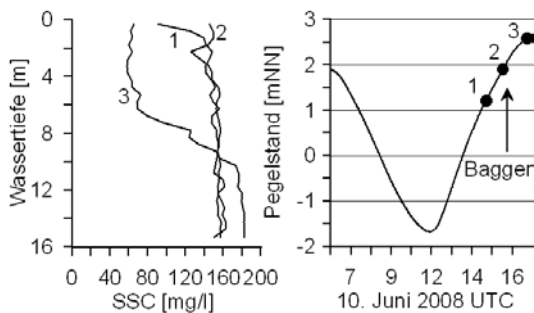


Abb. 4a: Schwebstoffkonzentrationen (SSC) über die Wassertiefe am 10.06.2009 im Brackwasserbereich zu unterschiedlichen Phasen des Flutstroms mit und ohne Wasserinjektion.

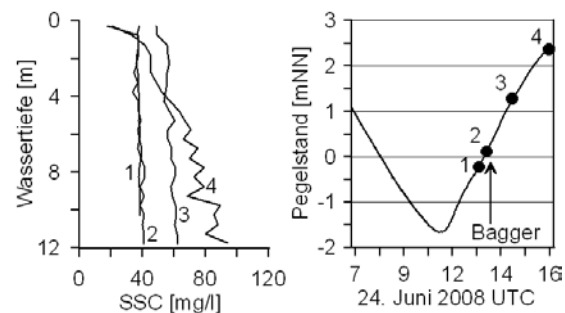


Abb. 4b: Schwebstoffkonzentrationen (SSC) über die Wassertiefe am 24.06.2008 im limnischen Bereich zu unterschiedlichen Phasen des Flutstroms mit und ohne Wasserinjektion.

Die Partikelgrößenverteilungen sind vorwiegend unimodal verteilt. Im BB wird diese Verteilung oft bimodal durch das Auftreten der Fraktionen $< 3 \Phi$. Insgesamt liegen die mittleren Partikelgrößen in beiden Bereichen mit 2,9 Φ (BB) bzw. 2,8 Φ (LB) eng beieinander, wobei eine hohe Varianz (2-4,9 Φ , BB) gegeben ist (1,9-3,4 Φ , LB). Markante Änderungen der Partikelgrößenverteilungen während der Wasserinjektionen sind soweit nicht ersichtlich, allerdings wird im BB der VC Messbereich in Sohlhöhe immer überschritten (Abb. 5).

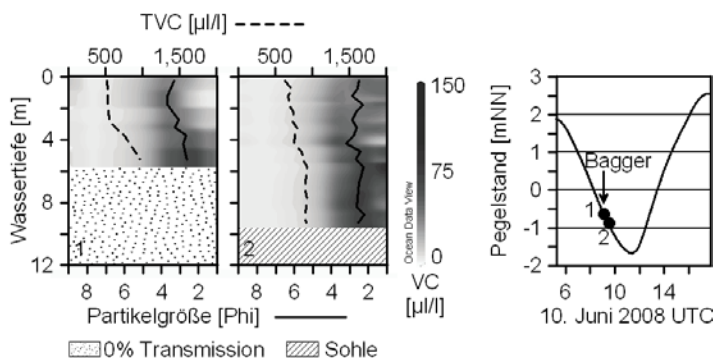


Abb. 5: Partikelvolumenkonzentrationen (VC), mittlere Partikelgrößen und Gesamtpartikelvolumenkonzentration (TVC) über die Wassertiefe am 10.06.2008 im Brackwasserbereich zu unterschiedlichen Phasen des Flutstroms mit und ohne Wasserinjektion.

Interpretation und Diskussion

Die präzise Reduktion der Dünenkuppen konnte nachgewiesen werden, übereinstimmend mit Angaben aus der einschlägigen Literatur (u.a. Meyer-Nehls et al. 2000). Während der Kappung wurden die mobilisierten Sedimente zu den Dünenflanken bzw. den jeweils angrenzenden -Tälern

verfrachtet. Ein weiterreichender Transport der vornehmlich mittelsandigen Fraktionen ist nicht augenscheinlich, weder aus vergleichenden Gegenüberstellungen der Tiefenprofile, den flächenhaften Aufnahmen zur Sohlbeschaffenheit noch aus vergleichenden Betrachtungen der Internstrukturen benachbarter Dünenkörper. Auch ADCP, OBS und LISST Messungen lassen nicht darauf hindeuten. Allerdings lässt sich aus der akustischen Signalerhöhung in der Wassersäule leeseits des Baggers eine baggerinduzierte Einflussnahme ableiten. So sind geringfügige Änderungen der Schwebstoffcharakteristik (SSC, Partikelgröße) an Messpositionen in Entfernungen > 60 m vom Bagger, die meist im Tidesignal verrauschen, offenbar gekoppelt an baggerinduzierte Turbulenz und Luftenbringung. Dieser Sachverhalt wird gestützt durch die Tatsache, dass die Gewässersohle in beiden Abschnitten hauptsächlich aus Sanden und nur zu einem vergleichsweise geringen Anteil aus Fraktionen < 63 µm besteht. Partikel, die als Suspensionsfracht weit verdriftet werden könnten, stehen somit auch nicht in einem Maße zur Verfügung, um große Einträge herbeizuführen. Ein baggerinduziertes Zerbrechen von Schwebstoffaggregaten in der Wassersäule, wie bei Mikkelsen & Pejrup (2000) aufgezeigt, wurde nicht beobachtet. Allerdings beschreibt Wellershaus (1981) die Schwebstoffaggregate in der Weser als relativ resistent gegen äußere Einflüsse.

Schlussfolgerungen

Das WI-Verfahren ermöglicht eine präzise Bearbeitung ausgewählter Dünenkuppen. Die sohlnahe Ausbreitung der abgetragenen Sande ist dabei räumlich und zeitlich eng begrenzt. Eine Generierung neuer Schwebstofffracht bzw. ein Austrag von Sedimenten als solche über Transportstrecken von mehreren hundert Metern ist als gering einzustufen bzw. liegt dort im Rahmen der tidegesteuerten Schwebstoffdynamik.

Danksagung

Danken möchten wir der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieser Studie, die über das Exzellenzcluster Ozean der Zukunft und dem Senckenberg Institut Wilhelmshaven durchgeführt wurde und angegliedert war in das Untersuchungsprogramm „Wirkungskontrolle Wasserinjektion“. Dieses wurde unter Federführung der Wasser- und Schifffahrtsämter (WSA) Bremerhaven und Bremen, dem WSA Cuxhaven sowie der Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg durchgeführt. Unser Dank richtet sich auch an das WSA Wilhelmshaven für die Bereitstellung von Schiff und Besatzung.

Literatur

- Agrawal, Y. C. & Pottsmith, H. C. (2000): *Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. Marine Geology*, 168: 89-114.
- Deines, M. L. (1999): *Backscatter estimation using broadband acoustic doppler profilers. Proceedings of IEEE Sixth Working Conference on Current Measurements: 249-253.*
- Grabemann, I. & Krause, G. (2001): *On different time scales of suspended matter dynamics in the Weser estuary. Estuaries and Coasts*, 24: 688-698.
- Grabemann, I., Uncles, R. J., Krause, G. & Stephens, J. A. (1997): *Behaviour of Turbidity Maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) Estuaries. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45: 235-246.
- Meyer-Nehls, R., Gönnert, G., Christiansen, H. & Rahlf, H. (2000): *Das Wasserinjektionsverfahren: Ergebnisse einer Literaturstudie sowie von Untersuchungen im Hamburger Hafen und in der Unterelbe. Ergebnisse aus dem*

Baggeruntersuchungsprogramm Heft 8. Freie und Hansestadt Hamburg Wirtschaftsbehörde Strom- und Hafenausbau, 111 S.

Mikkelsen, O. A. & Pejrup, M. (2000): *In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume. Marine Geology, 170: 443-459.*

Nasner, H. (1992): *Injektionsbaggerung von Tideriffeln. Hansa, 129 (2): 195-196.*

Schrottke, K. & Abegg, F. (2005): *Measurements of near-bed suspended sediment dynamics in a tidal channel of the German Wadden Sea. Die Küste, 69: 353-344.*

Schrottke, K. & Bartholomä, A. (2008): *Detaillierte Einblicke in die ästuarine Schwebstoffdynamik mittels hochauflösender Hydroakustik. Tagungsband zum Seminar „Ultraschall in der Hydrometrie: neue Technik – neuer Nutzen?“ FgHW/DWA, 3-4 Juni, Koblenz: 75-82.*

Schrottke, K., Becker, M., Bartholomä, A., Flemming, B. W. & Hebbeln, D. (2006): *Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler Geo-Marine Letters, 26: 185-198.*

Schuchardt, B., Haseloo, U. & Schirmer, M. (1993): *The tidal freshwater reach of the Weser estuary: riverine or estuarine? Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 27: 215-226.*

Stengel, T. (2006): *Wasserinjektionsbaggerung in der Unterweser: Eine ökologische und ökonomische Alternative zu Hopper Baggerung. PIANC Deutschland - Schifffahrt, Häfen, Wasserstraßen.: 204-208.*

Wellershaus, S. (1981): *Turbidity maximum and mud shoaling in the Weser estuary. Archiv für Hydrobiologie, 92: 161-198.*

Winterwerp, J. C. & van Kesteren, W. G. M. (2004): *Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Developments in Sedimentology, Elsevier: 205 S.*