

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

Baggerungen und wirtschaftliche Nutzung des Baggermaterials (3.1)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

Dipl.-Ing. Rewert Wurpts

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG, Niederlassung Emden

Dr.-Ing. Norbert Greiser

Dr. Greiser & Partner, Wissenschaftler und Ingenieure, Geesthacht

Zusammenfassung

Bei der Verfolgung von Strategien zur Minimierung der Unterhaltungsbaggerarbeiten in Häfen und Wasserstraßen sind der Baggeraufwand, die Baggermengen und die Kosten möglichst klein zu halten. Auf keinen Fall reicht es aus, die schiffbare Wassertiefe ausschließlich durch Echolotung zu bestimmen, denn zum Beispiel die zumeist dafür verwendeten relativ hohen Frequenzen (ab 100 kHz) detektieren Wasser/ Suspensions-, Wasser/Weichschlick- und Wasser/Sand-Grenzschichten gleichermaßen als obersten Sedimenthorizont. Die Frage, ob diese Sedimentschichten gegebenenfalls bis in eine bestimmte Tiefe von Schiffen problemlos durchfahren werden könnten, kann mit dem Echolot nicht beantwortet werden. Der Nachweis gelingt nur über einen vertikalen Scan der Materialkonsistenz. Als Parameter für diesen Nachweis der nautischen Sohle dient bisher zumeist die Dichte. Die Frage, ob und wie leicht das Sediment beim Kontakt mit dem Schiffsboden auseinander fließt, bleibt damit jedoch unbeantwortet. Die Bestimmung der Fließfähigkeit erfordert (zusätzlich) die Messung rheologischer Parameter wie zum Beispiel der scherkraftabhängigen Fließgrenze, Scherrate und Viskosität.

Die dafür eingesetzten Messgeräte müssen

1. zumindest einen damit korrelierten Parameter liefern, der
2. ohne Postprocessing in Echtzeit vom Vermessungsschiff aus kontrolliert werden kann und
3. die Messtechnik muss in der praktischen Ausführung der Messung leicht zu handhaben sein.

Das *Admodus*-Ultraschallmesssystem ist bisher das einzige Messverfahren am Markt, das alle diese Kriterien (einschließlich einer parallelen Messung der Dichte) erfüllt. Zahlreiche Probeläufe dieses Systems im Seehafen Emden, in Bremerhaven und in Rotterdam erbrachten den Nachweis, dass insbesondere auch in durch Baggerungen, Schiffsbewegungen und Rezirkulierungsaktivitäten (sediment conditioning) verflüssigten Fluid Mud- und Schlickformationen verlässliche Ergebnisse über das horizontale und vertikale Schichtenspektrum und deren Festigkeiten geliefert wurden. Für die flächendeckende Messung im Emden Außenhafen wurden die Messergebnisse des *Admodus*-Sonar und der Messsonde *Admodus*-USP regelmäßig durch rheo-

logische Labormessungen überprüft, so dass inzwischen bereits im „normalen“ Echolot-Betrieb mit dem *Admodus*-Sonar Suspensions-, Fluid Mud- und Schlickschichten gleicher Fließgrenze erkannt und vermessen werden können. Auf Grund der innovativen Technologie der Signalauswertung liefert dieses Ultraschallsystem im Gegensatz zu herkömmlichen ADCP-Systemen auch verlässliche Messwerte bis direkt an die feste Gewässersohle. Die Messergebnisse belegen, dass mit der *Admodus*-Technik auch dort Sediment- und Fluid Mud-Schichtgrenzen zweifelsfrei nachgewiesen und in ihrer Tiefenlage richtig wiedergegeben werden, wo sich Festmaterial in hoher Konzentration in der Wassersäule befindet.

Nachgewiesen werden kann damit unter anderem:

- welche Sedimentschichten in welche Tiefe schiffbar sind,
- wieviel nicht-schiffbares Sedimentmaterial welcher Konsistenz und Dichte zur Wiederherstellung der Solltiefen entnommen werden muss (selektives Baggern),
- wie sich rezirkuliertes, verflüssigtes Baggergut im Wasserkörper verteilt und
- in welchem Zeitraum dieses Material wie stark re-konsolidiert.

In diesem Artikel wird an mehreren Beispielen illustriert, wie dieses neue In-situ-Messverfahren zum Nachweis der nautischen Tiefe und zum Erfolgsmonitoring innovativer Baggermethoden erfolgreich eingesetzt werden kann, insbesondere wenn damit Verfahren zur In-situ-Sedimentverflüssigung (sediment conditioning, active nautical depth concept) im Sinne einer KSIS-(keep sediments in system)-Strategie gemeint sind.

Die *Admodus*-Messtechnologie

Das Kernstück der Hardware ist eine spezielle Signalauswerteeinheit („Ultraschall-Computer“, siehe Bild 1), mit der Ultraschallsignale jeglicher Art digitalisiert und bedarfsgerecht weiter ausgewertet werden können. Diese Auswertung basiert auf Routinen, die in der modernen medizinischen Ultraschall-Diagnostik verwendet werden, um Konsistenzunterschiede von Geweben sichtbar zu machen. Diese Technik mit dem *Admodus*-



Bild 1: *Admodus*-Hardwaremodul zur Ultraschall-Signalauswertung

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

Sonar als eigenständiges Echolot und als Ergänzung für handelsübliche 2-Frequenzecholote verfügbar. Damit hat der Vermesser auch die Möglichkeit, die Messergebnisse eines herkömmlichen Sonars mit und ohne *Admodus*-Signalbewertung parallel zu betrachten.

Ergänzt wird diese neue Echolottechnik durch eine Ultraschall-Sonde (*Admodus*-Ultraschall-Sediment-Profil, siehe Bild 2), mit der zusätzlich die Feinauflösung der Konsistenz der gepellten Sedimentschichten möglich ist. Mit ihren hochfrequenten Ultraschall-Sensoren (500 kHz, 1 MHz und 2 MHz) werden beim Absenken alle Schichten bis zur festen Sohle direkt durchfahren. Die in Bild 2 gezeigte Sonde wiegt ca. 25 kg, sie kann aber auch kleiner und leichter oder größer und schwerer konstruiert werden. Die Gewinnung der Messprofile geht sehr schnell, bei 20 m Wassertiefe je nach Windgeschwindigkeit 30 s – 60 s pro Messort und das Ergebnis kann online am PC verfolgt werden. Parallel gemessen werden u.a. folgende Parameter: Dichte, Ultraschalldämpfung (korrelierbar mit der Viskosität), die Schallgeschwindigkeit, Schallreflektivität (als z.B. guter Indikator für den Sandanteil im Sediment) sowie auch die Temperatur. Da durch die parallele Messung der Dichte und Schallgeschwindigkeit auch alle Impedanzsprungschichten aufgefunden werden, dient diese Messung zugleich der Kontrolle von Echolotungen. Das Vertikalprofil der Sonde zeigt auf, welche Schichtgrenzen wie genau vom Echolot detektiert wurden und welche dieser Schichtgrenzen diejenigen sind, die zum Beispiel den Konsistenzunterschied schiffbar/nicht schiffbar markieren.

Dies ist möglich, weil zum Beispiel die Ultraschall-Dämpfung (attenuation) mit der Viskosität korreliert werden kann, denn auch eine Schallwelle reagiert auf die sich ändernde Zähigkeit eines Sedimentkörpers. Eine hohe Dämpfung mit hoher rückgestreuter Energie in einem Hafensediment lässt auf Sandpartikel schließen, während eine hohe Dämpfung mit geringer zurückgestreuter Energie in erster Linie viskoelastische Fluid Mud-Medien anzeigt. Der bei Niedersachsen Ports in Emden durch bestimmte Fließgrenzwerte festgelegte Übergang vom schiffbaren zum nicht mehr schiffbaren Sediment wurde bisher mit dieser Ultraschall-Technik Sedimentschichten zweifelsfrei nachvollzogen, unab-

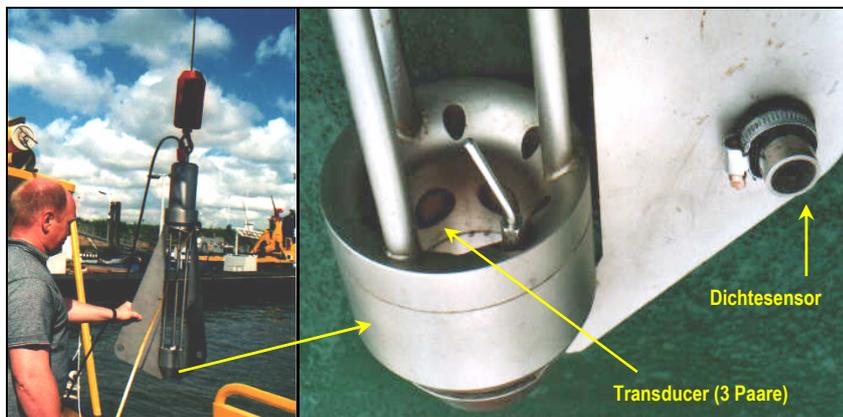


Bild 2: Bild der *Admodus*-USP-Sonde und des Messkopfs im vergrößerten Ausschnitt

hängig davon, ob man die Fließgrenze oder die Viskosität als den entscheidenden Parameter für die Beurteilung der Schiffbarkeit fließfähiger Sedimente betrachtet, denn beide sind ohnehin mathematisch voneinander abhängig.

Die folgenden Bilder zeigen einige Beispiele, wie mit dieser Messtechnik Konsistenzunterschiede von Sedimentschichten visualisiert und quantifiziert werden können.

• Mindertiefenbeseitigung durch mechanisches Eggen (Yachthafen Wedel/Eibe)

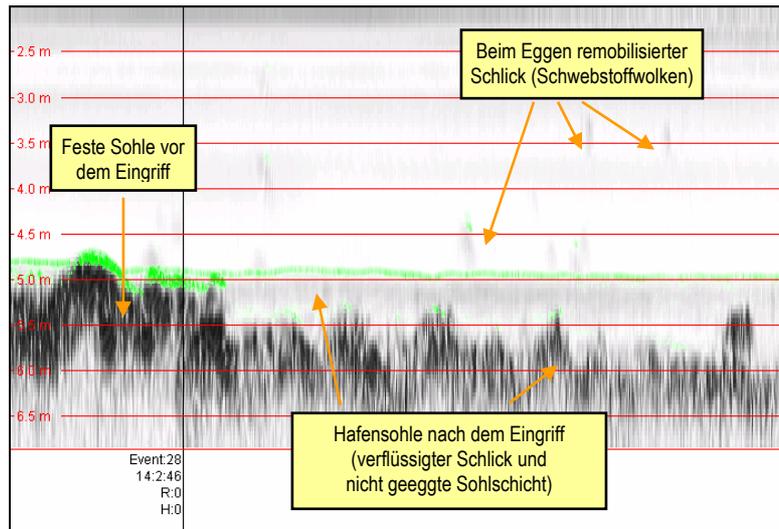


Bild 3: Rohdaten-Echogramm einer durch „Eggen“ verflüssigten konsolidierten Schlickschicht

• Nachweis der Schiffbarkeit von Sedimentschichten im Botlek Harbour/Rotterdam

Die Aufgabe bestand hier in einem Erfolgsmonitoring der Umwandlung von konsolidiertem Sediment in eine schiffbare Weichschicht durch Baggergut-Rezirkulation (sediment conditioning) mit einem Laderaum-Saugbagger. Bild 4 zeigt ein Längsprofil (digitalisiertes Echogramm) durch das Konditionierungsgebiet in der Hafeneinfahrt vor dem Eingriff, Bild 5 entsprechend die Veränderung der Schichtgrenzen-Bathymetrien und Mächtigkeit der oberen Sedimentschicht nach einem ca. 6-stündigen Konditionierungseinsatz.

Den Nachweis der Schiffbarkeit liefert letztlich der vertikale Konsistenz-Scan durch das Sediment mit der Messsonde *Admodus*-USP (Bild 6).

Legt man die Erfahrungen mit Schiffspassagen durch Fluid Mud-Lagen aus dem Emden Hafen zugrunde und überträgt den dort geltenden Ultraschalldämpfungsgrenzwert für die Schiffbarkeit von Sedimentschichten von 2,9 dB/cm für die Ultraschallfrequenz von 2 Mhz auf die Ergebnisse aus dem Botlek-Harbour, dann war vor dem Eingriff nahezu die gesamte obere Schlickschicht nicht-schiffbar (rot eingefärbter rechter Skalenabschnitt mit Dämpfungswerten > 3 dB/cm).

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

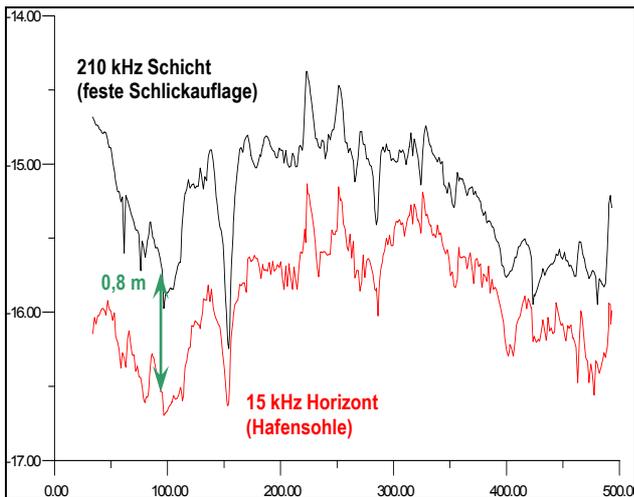


Bild 4: Digitalisiertes 2-Frequenz-Echogramm aus dem Botlek-Harbour vor dem Eingriff

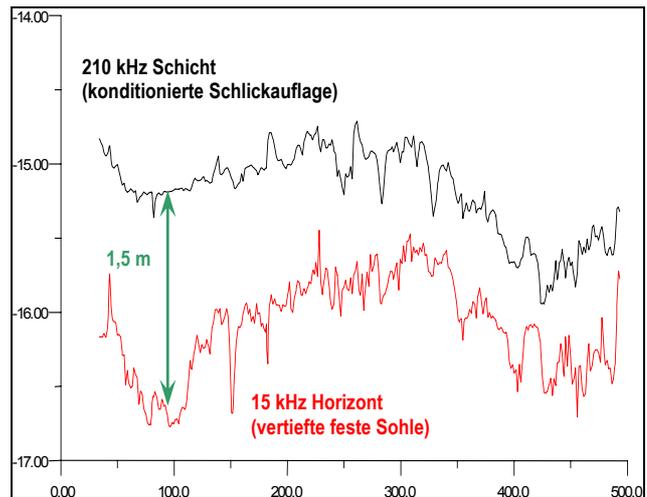


Bild 5: Digitalisiertes 2-Frequenz-Echogramm aus dem Botlek-Harbour nach dem Eingriff

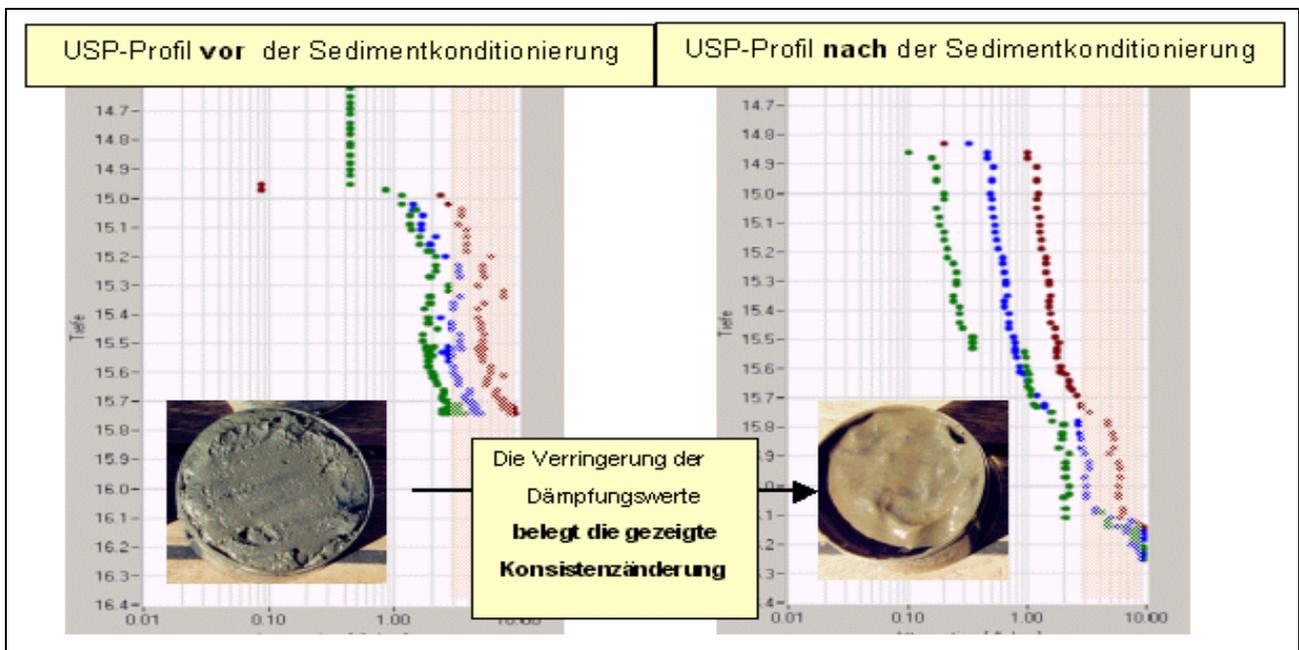


Bild 6: Ergebnis der Vertikalscans mit der USP-Messsonde an den in den Bildern 5 und 6 markierten Stellen des Längsprofils aus dem Einfahrtbereich des Botlek-Harbour vor und nach der Verflüssigung des Sedimentes durch Rezirkulation.

Im rechten Vertikalprofil wird deutlich, dass durch die Baggergutrezirkulation die Sedimentschicht aufgelockert und auch ein Teil des festen Sohlmaterials 'aufgeweicht' und in schiffbaren Schlack überführt wurde. Die Sedimentoberfläche liegt jetzt ca. 0,2 m höher und der Zugewinn an nautischer Tiefe betrug an diesem Messort 0,7 m. Im gesamten Konditionierungsgebiet erhöhte sich die nautische Tiefe um 0,3 m - 1,0 m.

Bild 7 auf der folgenden Seite zeigt die Mächtigkeitsverteilung des schiffbaren Schlacks im Konditionierungsgebiet auf einer Fläche von ca. 183.000 m². Interessant ist aber auch die Visualisierung der Sedimentoberflächenstruktur (Bild 8, nächste Seite). Die klare Abbildung der Saugkopfspuren im Sediment suggeriert dem Betrachter eher eine feste Sedimentkonsistenz als einen verflüssigten Sedimentkörper. Da Schlack eine strukturviskose und keine newtonsche Flüssigkeit ist, fließt er nur, wenn er Scherkräften ausgesetzt ist, die seine Fließgrenze überschreitet. Die vom Saugkopf modellierten

Strukturen bleiben deshalb solange erhalten bis dieser Fließgrenzenwert durch externe Kräfte (z.B. Schiffspassagen und Strömungen) erneut überschritten wird. Zum Nachweis der Sedimentkonsistenz sind deshalb vertikal profilierende Mehrfrequenzpeilungen und/oder Schichtensondierungen unerlässlich. Über Einfrequenzpeilungen können Konsistenzunterschiede im Sediment nicht ermittelt werden.

Fluid-Mud-Konsistenzmessung im Schleusenvorhafen in Bremerhaven

Das folgende Beispiel zeigt, wie die Sonden-Vertikalprofile direkt mit den Echolotdaten verglichen und die detektierten Schichtgrenzen bestimmten Konsistenzparametern zugeordnet werden können. Vermessen wurde eine bis zu 4 m mächtige Fluid-Mud- und Weichschlicklage. Bild 9 veranschaulicht die Lage des Ortes, an dem das gezeigte Multiparameter-Vertikalprofil gewonnen wurde.

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

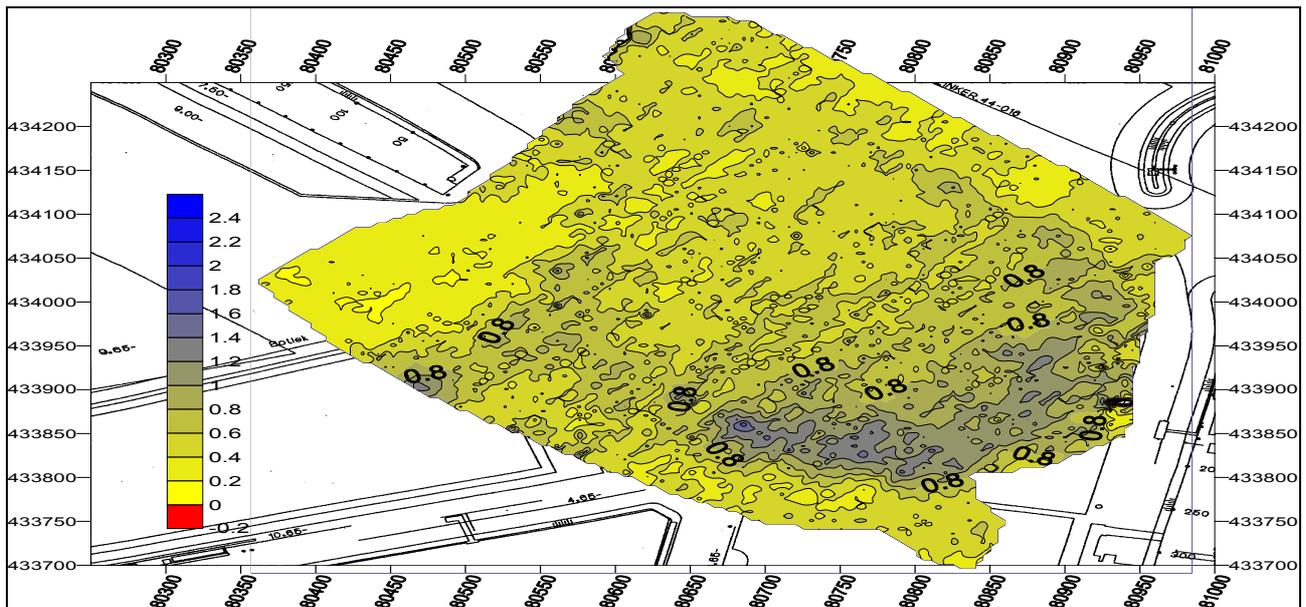


Bild 7: Flächenhafte Mächtigkeitsverteilung der schiffbaren Sedimentschicht im Botlek-Harbour nach der Baggergut-Rezirkulation (Konditionierung)

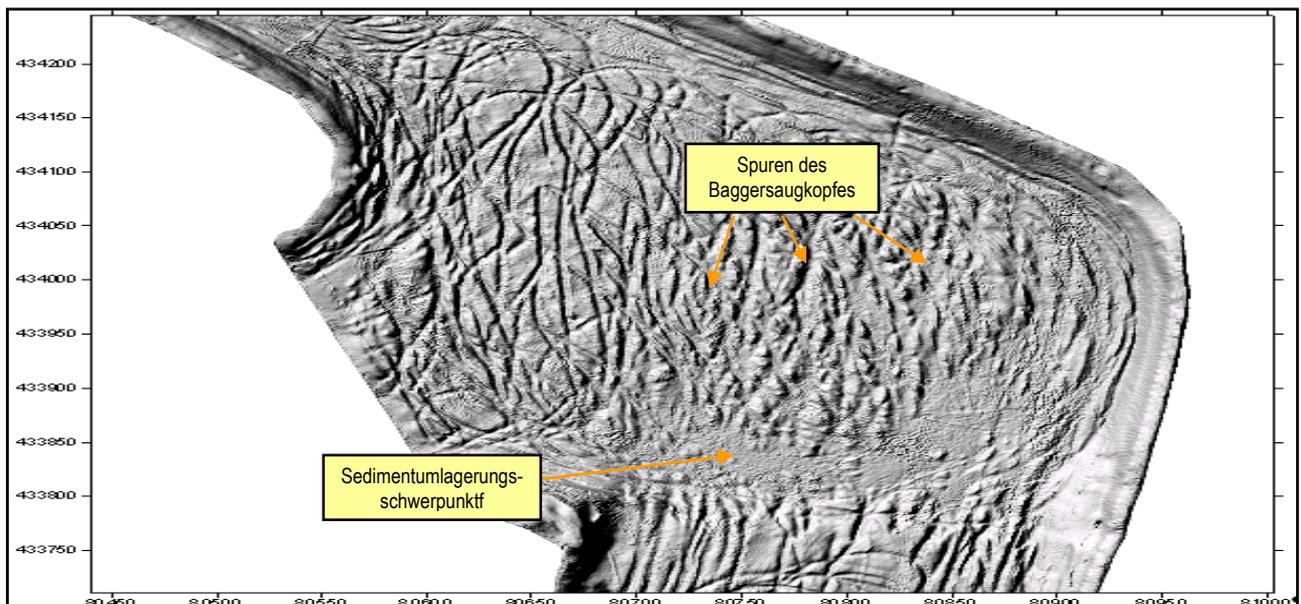


Bild 8: Oberflächenstruktur der schiffbaren Sedimentschicht im Botlek-Harbour nach der Baggergut-Konditionierung. Die Spuren des Baggersaugkopfes sind deutlich sichtbar, obwohl das Sediment durch die Rezirkulation verflüssigt wurde (s. Bild 6).

Mit einer speziellen Software können Fehlsignale, z.B. durch Schraubenwasser, herausgefiltert werden, so dass letztlich nur die real vorhandenen Grenzschichten im Fluid Mud- bzw. Sedimentkörper abgebildet werden. In wenigen Minuten können so z.B. die mit der Sonde nachgewiesenen Dichtesprungschichten linien- und flächenhaft nachvollzogen werden.

Rheologische Grundlagen zur Optimierung von Bagverfahren

Die wesentlichen kennzeichnenden rheologischen Merkmale von Sedimenten, die sich verflüssigen lassen, sind die mit der Scherbeanspruchung veränderliche Zähigkeit η , das Vorhandensein einer Fließgrenze τ_0 , die im Fall von Thixotropie zusätzlich zeitabhängig ist, und dass die bei den Bagvorgängen in der Pra-

xis vorkommenden Strömungen des flüssigen Baggerguts im allgemeinen noch laminar sind. Die Beziehung zwischen der Scherkraft τ und der Deformationsgeschwindigkeit D liefert zahlreiche sogenannte scheinbare Viskositäten. Der Ausdruck „scheinbare Viskositäten“ (apparent viscosity) hat sich in der internationalen Literatur durchgesetzt, weil hierdurch dokumentiert wird, dass sich die Zähigkeit von Schlicksedimenten bei unterschiedlicher Scherbelastung und Verformungsgeschwindigkeit verändert. Dagegen gibt es nur eine einzige Fließgrenze. Das bedeutet zugleich, dass Messgeräte, die mit konstanten Viskositäten arbeiten, wie z.B. die marktüblichen „Stimmgabelgeräte“, für Messungen zur Feststellung der Nautischen Sohle im Fluid Mud nicht geeignet sind.

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

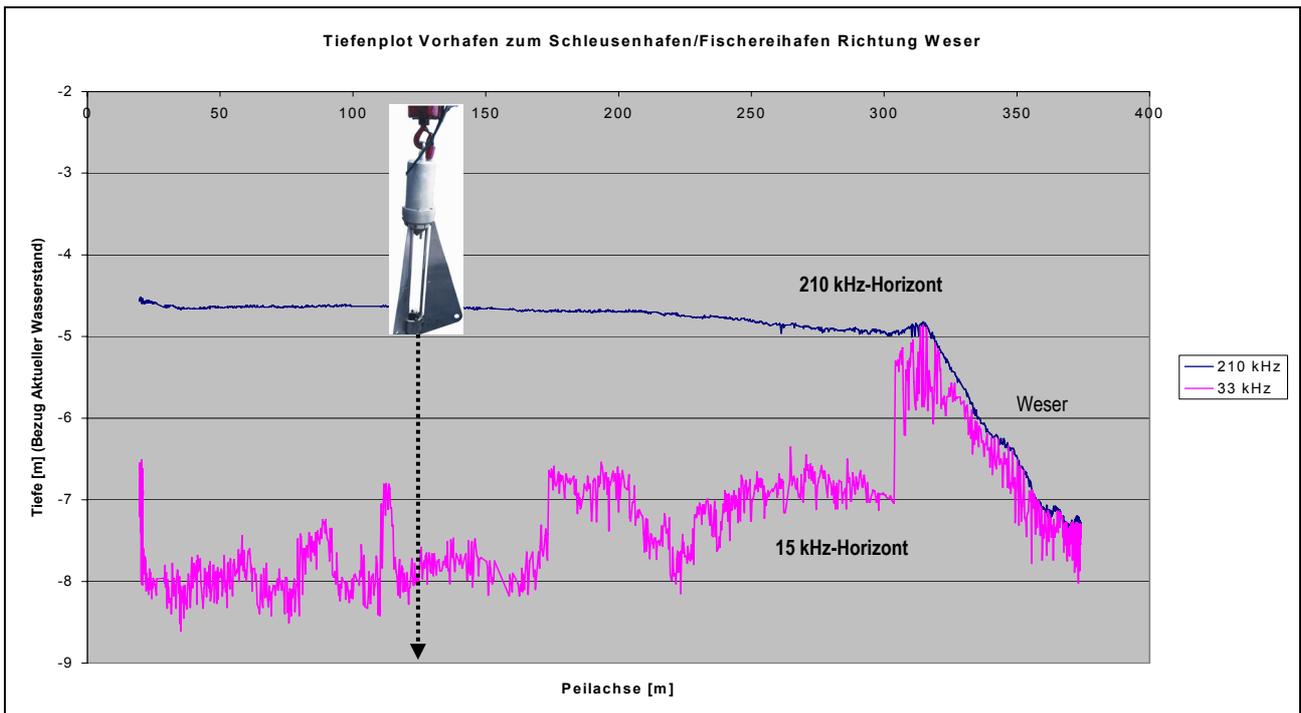


Bild 9: Digitalisiertes 2-Frequenz-Echolotlängsprofil im Vorhafen zum Schleusenhafen. Der Messort der Sondenvertikalprofile aus Bild 10 ist gesondert markiert.

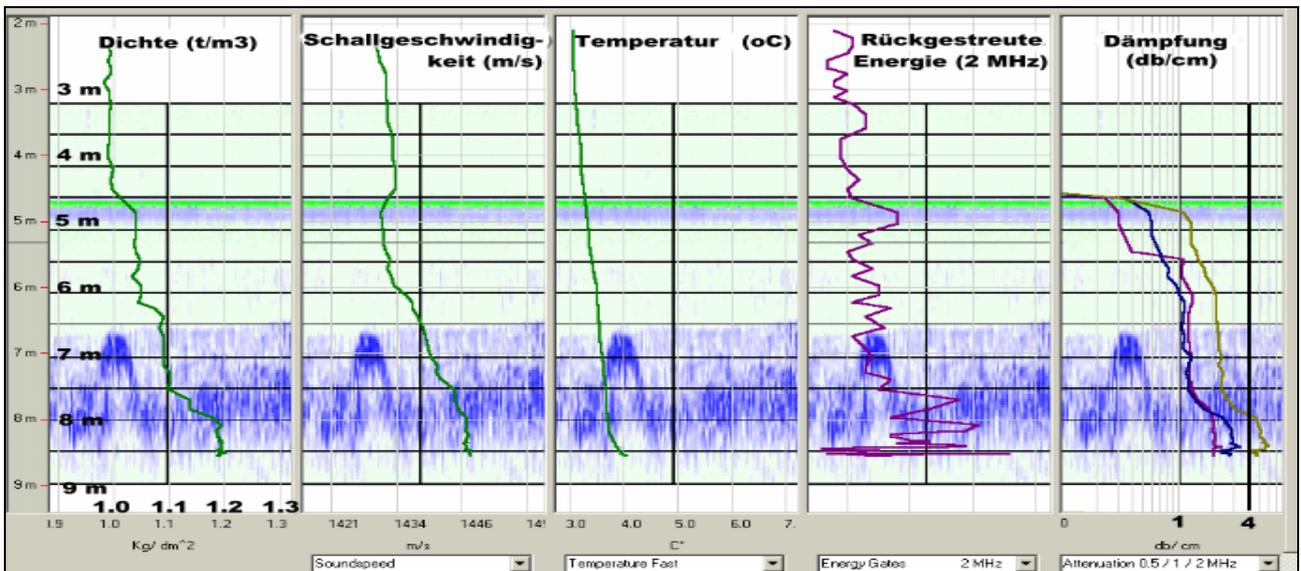


Bild 10: Multiparameter-Vertikalprofil der *Admodus*-USP-Sonde im Vorhafen des Schleusenhafens in Bremerhaven. An dieser Stelle sind über 3 m des Schlamm- und Weichschlick-Körpers flüssig und damit schiffbar.

Bild 12 zeigt das Ergebnis einer rheometrischen Messung einer Sedimentprobe aus dem Emsabschnitt Emden Fahrwasser bei Strom-km 42. Vor dem Einsatz moderner Rheometer wurde die an die (blaue) Herschel & Bulkley Kurve gelegte Bingham'sche Gerade auf die Ordinate verlängert und hätte in diesem Fall eine Fließgrenze τ_0 von etwa 75 Pa, geliefert, müsste daher nach den in Emden eingeführten Bemessungskriterien für die Ermittlung der nautischen Sohle als nicht schiffbar eingestuft werden. Tatsächlich aber drückt das Rheometer mit der parallel aufgezeichneten Viskosität eine Fließgrenze von nur 11 Pa aus, so dass dieses Sediment in Wirklichkeit eine schiffbare Fluid Mud-Formation darstellt.

Bezeichnenderweise ist die parallel aufgezeichnete Viskosität an diesem Punkt, also bei Fließbeginn, etwa 6100 Pa·s groß. Das wird verständlich, wenn man bedenkt, dass diese Angabe in Pascal·Sekunden lediglich für die Fließgeschwindigkeit ausschlaggebend ist, auf keinen Fall aber eine Kraft angibt, die dem Fließvorgang entgegen wirkt. Während Fließgrenze und Fließspannung schon von der Dimension (N/m² bzw. Pa) her eine Aussage über wirkende Kräfte machen, verkörpert die Dimension der Viskosität also lediglich eine Fließeigenschaft.

Aus der Fließkurve in Bild 12 wird noch einmal deutlich, warum eine durch ein 'Stimmgabel'- Messgerät mit

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

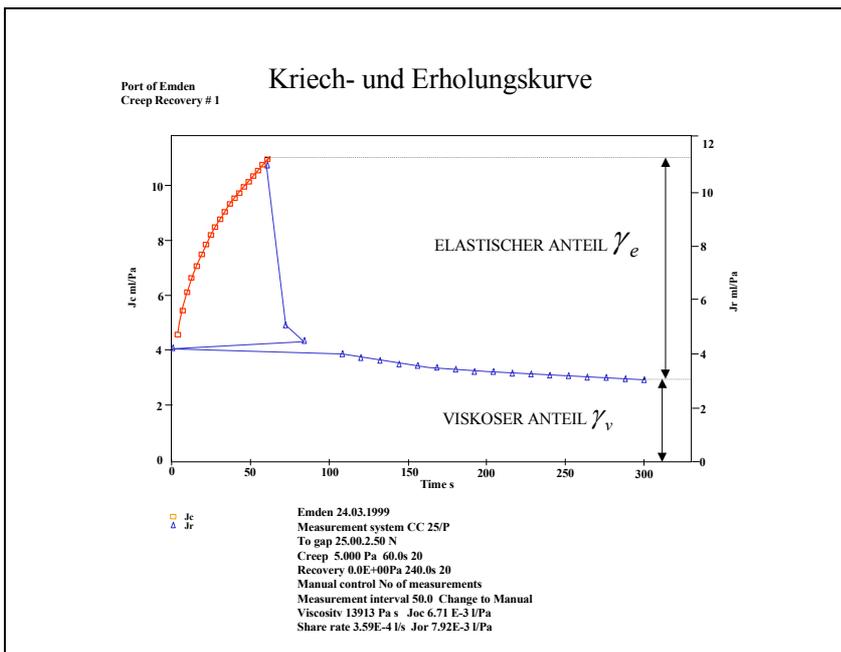


Bild 13: Ergebnis eines Kriech- und Erholungsversuchs mit Emder Hafenschlick

Selbstverständlich ist es schwierig, bei einem durch Schiffsbewegungen und Tideströmungen beanspruchten Sediment zwischen dem flüssigen und dem deformierbaren Anteil nach Lage und Volumen zu unterscheiden. In der Praxis hat es sich aber bewährt, mit dem im nächsten Textabschnitt erklärten speziellen Baggerverfahren nur die durch verschiedene Messkurven ermittelten prozentualen elastischen Anteile störender Sedimentablagerungen zu „behandeln“. Seit der konsequenten Auswertung dieser Messergebnisse konnte in Emden der Aufwand für den Betrieb des Laderaumsaugbaggers in den Jahren 1998 bis 2005 von 2.000 Stunden jährlich auf 950 Stunden reiner Drehzeit

herabgesetzt werden. In dem gleichen Zeitraum verringerte sich der Quotient aus der im Laderaum "behandelten" und der in situ vorhandener Schlickmenge von ca. 3,5 auf deutlich unterhalb 2,0.

Wie bereits erwähnt, gilt im Emden Hafen ein Ultraschall-Dämpfungswert von 2,9 dB/cm (bei 2 Mhz) als In-situ-Bemessungskriterium für die nautische Sohle. Er markiert in etwa einen Fließgrenzwert für die nautische Befahrbarkeit von 70 Pa. Bild 14 zeigt ein Auswertungsbeispiel für die monatlichen Messungen der Ultraschalldämpfung im Außenhafen. Die rechte Grafik zeigt die Solltiefe des Emden Außenhafens (-8,5 m im zentralen und -5,5 m SKN im nördlichen Bereich). In der linken Grafik werden die Tiefenlinien in m gezeigt, die mit der 70 Pa σ Fließgrenze korreliert sind. Nur die mit den Pfeilen markierten Randzonen auf der Ostseite müssten erneut konditioniert werden, der übrige

zentrale Bereich zeigt demgegenüber teilweise erhebliche „nautische Übertiefen“. Auch im nördlichen Bereich besteht nach dieser Messung kein Konditionierungsbedarf.

Somit ist es möglich, den Nassbagger ganz gezielt durch selektives Baggern sehr wirtschaftlich und kostengünstig einzusetzen. Bemerkenswert ist ferner, dass diese Isoyields-Karte nach einer fast viermonatigen "Baggerpause" im Emden Außenhafen aufgenommen wurde. Erst nach vier Monaten zeigen sich also einige wenige kleinere Flächen mit höheren Fließgrenzen als 70 Pa. Diese Isoyields-Karte wird einmal monatlich für

alle zu unterhaltenden Hafenteile aufgestellt, wobei die Daten der abzufahrenden Flächen auch in den Bordcomputer des Nassbaggers eingegeben werden, der diese Flächen dann automatisch abarbeitet.

Bild 15 zeigt den mit dem gelben Doppelpfeil markierten Peillängsschnitt. Danach liegen die drei kleineren Frequenzen noch alle jenseits der Solltiefe, wodurch bestätigt wird, dass die seit 1988 im Emden Außenhafen festgestellte Übertiefe nach nunmehr 17 Jahren immer noch vorhanden ist. Interessant ist, dass die Linie für eine Fließgrenze von 70 Pa σ (Attenuation von 2,9 dB) noch etwa 20 cm tiefer als die nied-

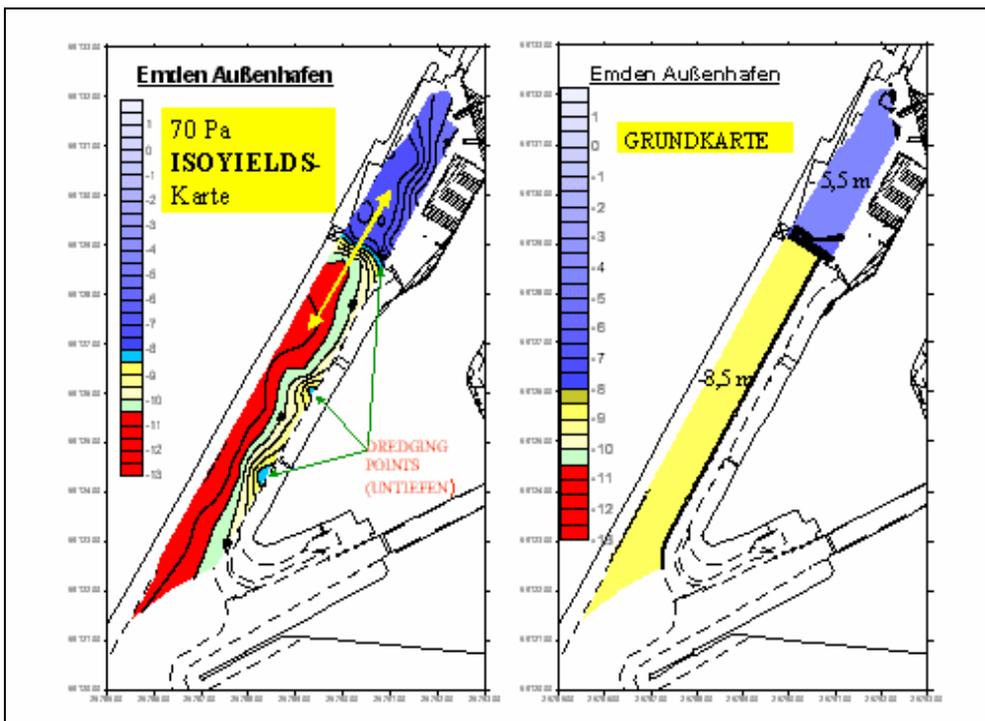


Bild 14: Solltiefen und Isoyields-Karte vom Emden Außenhafen

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

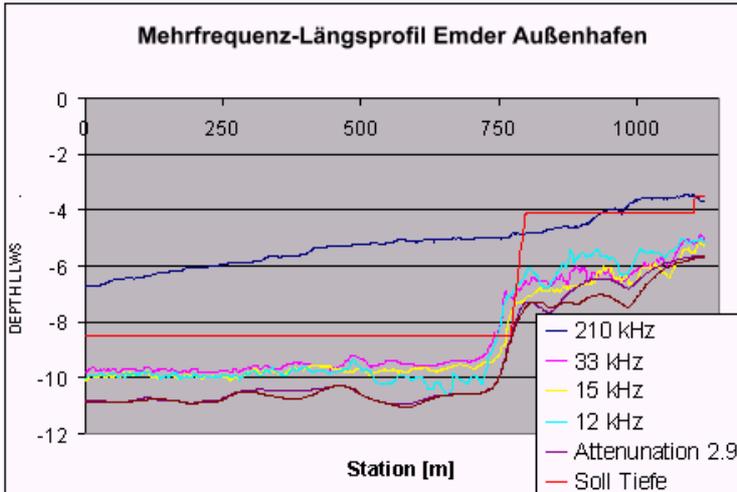


Bild 15: Vergleich verschiedener Peilfrequenzen zur Ermittlung der nautischen Sohle auf dem in Bild 14 markierten Längsprofil.

rigste Frequenz liegt. Hiermit ist bewiesen, dass sogar eine Messung und Kontrolle der nautischen Sohle mit 12 kHz noch an der sicheren Seite liegt. Deutlicher wird der Abstand zwischen 12 kHz und 33 kHz: Er beträgt ca. 1,0 m. Bei einer Frequenz von z.B. 33 kHz als Richtwert lägen allein im Emders Außenhafen die Baggermengen etwa 25 % höher. Diese Frequenz könnte für den Nachweis der nautischen Tiefe zwar noch herangezogen werden, führt aber zu deutlich mehr Baggeraufwand.

Das Baggergut-Konditionierungsverfahren im Emders Außenhafen

Der im Hafen Emden eingesetzte Laderaumsaugbagger wurde in den letzten 15 Jahren mehrfach modifiziert. Als segensreich hat sich die Installation einer Unterwasserpumpe erwiesen, welche auf der Höhe des Saugkopfes arbeitet, wobei die darüber stehende Wassersäule die Pumpe direkt beaufschlagt, und nicht erst ein Wasser-/Fluid Mud-Gemisch entsteht, wie es mit einer Innenbordpumpe auf Höhe der Wasserlinie der Fall ist. Mit Hilfe der Unterwasserpumpe und einer Entgasungsanlage zum Abbau des eventuell auftretenden Methangasgehaltes gelingt es, die Dichte im Laderaum im Vergleich mit der in situ-Dichte auf Höhe des Saugkopfes noch zu erhöhen.

Wie Bild 16 zeigt, sind mit dem so konzipierten Gerät folgende Entnahmevorgänge möglich:

1. Das Schiff wird von unten her mit Fluid Mud gefüllt {Linie (1)}. Die Unterwasserpumpe drückt das Gemisch auf Höhe des Laderaumbodens in das Schiff; der Überlauf ist auf Höhe der Oberkante des Laderaumes angeordnet, das Gemisch fließt durch einen geschlossenen Rohrkreislauf wieder kurz über den Saugmund zurück und kann dort austreten. Wie Messungen mit Ultraschall belegen, bleiben auf diese Weise

belüftete und rezirkulierte Schwebstoff-Formationen schwebend oberhalb des Saugkopfes (Wurpts, 2005); die in situ-Dichte ist also kleiner geworden. Trübungserscheinungen um das Gerät herum sind bei diesem Verfahren ausgeschlossen.

2. Das Baggergut wird von der Unterwasserpumpe bis auf die Oberfläche der Ladung des gefüllten Laderaumes gedrückt; die Abgabe erfolgt am Boden des Schiffes über einen Balkenverschluss, der auf voller Laderaumlänge angeordnet ist. Dieser Verschluss kann, je nach Trübungsgeschehen, das Baggergut aus dem Laderaum wieder dosiert auf die Hafensohle abgeben. Das Gerät kann nicht "verklappen". Diese Anordnung wird überwiegend in flacheren Teilen des Hafens angewendet { Linie (2)}.
3. Die Pumpe füllt den Laderaum; der Überlauf liegt auf Höhe des gefüllten Laderaumes und das dünnere Transportgemisch fließt durch Schwerkraft wieder in den Saugmund zurück { Linie (3)}. Hier wird es in einen neuen Transportvorgang eingebunden, welcher dann zusammen mit dem Transportgemisch aus dem Rücklauf eine wesentlich höhere Förderkonzentration erhält.

Das Verfahren (3) kommt im Emders Hafen nicht zur Anwendung, da der Sandgehalt fast Null beträgt. Die beiden Verfahren (1) u. (2) dagegen werden zur Verbesserung des aeroben Zustandes des Baggergutes im Laderaum durch die Berührung mit Luft sowie dessen Zurückführung auf die Hafensohle regelmäßig eingesetzt. Ziel ist es, Fluid Mud, welcher in einem Umkreis von ca. 5 m² bis 6 m² um den Saugkopf herum aufgenommen wird, auf einer freien Oberfläche von ca. 600 m² über der Ladung im Hopperraum zu erteilen und mit Sauerstoff in Berührung zu bringen. Eine Sauer-

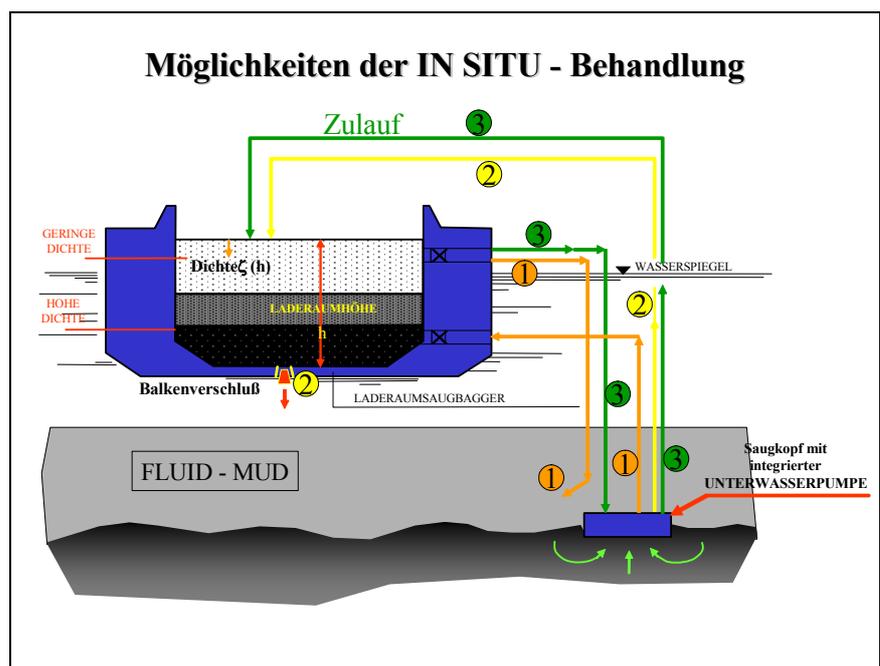


Bild 16: Prinzip des in Emden angewandten Baggerverfahrens (Erläuterungen im Text)

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

stoffzehrung ist bei diesem Verfahren nicht zu beobachten; die Bildung von Methangas ist nicht nachweisbar, denn durch die ständige „Behandlung“ der jeweiligen Hafensflächen wird das verflüssigte Sediment (Fluid Mud) in einem aeroben Zustand gehalten.

Bei einem "normalen" Sedimentationsprozess werden die tiefer gelegenen Schlick-Horizonte sehr bald von der Sauerstoffzufuhr aus der Wassersäule abgeschnitten. Enthält der Schlick noch größere Mengen organisches Material, so können die Bakterien dieses nur noch unvollständig abbauen und es bildet sich Faulgas. Reduzierte Eisen-, Mangan- oder Schwefelverbindungen färben den anaeroben Schlick schwarz. Dies wird durch das in Emden praktizierte Behandlungsverfahren vermieden, so dass dieses Baggerverfahren auch allen bisher bekannten umweltrelevanten Erfordernissen gerecht wird. Es darf auf keinen Fall mit dem "Eggen" oder mit einer sog. Injektionsbaggerung verwechselt werden. Bei dieser wird nämlich unter Zugabe von Druckwasser das Sediment an der Hafensohle aufgewirbelt, damit es das Hafenbecken mit dem Ebbstrom als Suspension verlässt.

Im Emdener Außenhafen werden dagegen bewusst derzeit ca. 700.000 m³ konditionierter Schlick im Hafenbecken gehalten, weil es gleichzeitig den Einstrom weiteren Sedimentmaterials aus der Ems unterbindet. Dieser Fluid Mud-Körper steht mit dem Feststoffangebot der Ems in einem Fließgleichgewicht: Ausgetauscht werden mit der Ems nach ADCP-Messungen pro Tide lediglich ca. 5.000 m³.

Das Fluid- und Bypasssystem im Hafen Leer

Auf Grund der Erkenntnisse zum Fließverhalten von Fluid Mud und verflüssigtem Schlick wurde im Hafen Leer ein Unterwassersaugsystem installiert, dem Fluid Mud über ein Gefälle von 1:1000 aus beiden jeweils 1.100 m langen Hafenbecken passiv zugeleitet wird. Der Hafen Leer ist in Bild 17 als Grundriss abgebildet. Durch eine Schleuse mit der vorbeiführenden Leda bzw. Ems verbunden, besteht der Leeraner Hafen im

wesentlichen aus zwei früheren Flussarmen von jeweils ca. 1.200 m Länge. Von der 1978 hergestellten Wassertiefe von 6,00 m waren durchschnittlich 2 m durch konsolidierten Fluid Mud verloren gegangen, woraus im Laufe der Jahre fester Schlick geworden war.

In unregelmäßigen Abständen, jedoch mindestens 1 mal jährlich, wurden zur Erhaltung der Wassertiefen an den wichtigsten Flächen Hopperbaggerungen durchgeführt, wobei das Baggergut innerhalb des Hafens(!) an für die Hafengewirtschaft unbedeutenderen Stellen verklappt wurde. Durch die damit verbundenen Scherbelastungen erhielt das Baggergut einen großen Teil seiner früheren Fließfähigkeit zurück und nach ausführlichen Messungen wurde festgestellt, dass es innerhalb kürzester Zeit wieder an die soeben hergestellten Vertiefungen zurückgeflossen war.

Es wurde deshalb der Vorschlag unterbreitet, zur Vermeidung der ständigen jährlichen Baggerungen ein sog. Fluid- und Bypasssystem an der Hafensohle zu installieren. Es wurde etwa 50 m vor dem Binnenhaupt der Seeschleuse verlegt (Bild 18). Hierbei handelt es sich um eine normale Baggerpumpe, die mit horizontal arbeitendem Kreisel in einem hierfür gebauten Sumpf aus Beton liegt. Die Oberkante des Pumpensumpfes wurde auf 7 m Bagbertiefe gelegt und in beiden Hafenarmen nach erfolgter Grundreinigung ein Gefälle des Hafensbodens in Richtung Pumpe von 1:1000 hergestellt. Die Rückführung der Suspension in die Leda erfolgt über eine Leitung von 30 cm Durchmesser, welche auf 350 m Länge vom Pumpensumpf in Richtung Leda unter dem Deich hindurchgepresst wurde.

Die Pumpe hat einen Ausgangsdurchmesser von 12" entsprechend 30 cm, wird elektrisch angetrieben, und darf laut Genehmigung bei ablaufendem Wasser in der Leda 2 Stunden arbeiten. Bei somit täglich 4-stündiger Arbeitszeit kommt die Pumpe auf eine ausreichende Monatsleistung von zurückgeführtem schwebstoffhaltigem Wasser.

Die Pumpe soll

1. den im Hafen befindlichen „fließfähigen“ bzw. durch ein kleines Wasserinjektionsgerät verflüssigten Mud zurückbefördern soweit dieser sich im weiteren Bereich des Hafens bilden konnte, und
2. die durch die Schleuse mit dem Schiffsverkehr hereinschwebenden Schwebstoff-Formationen soweit wie möglich in ihrem Sumpf auffangen und zurück befördern.

Nach den Erfahrungen aus dem Emdener Hafen, wo bei Entnahmebaggerungen mit einem Schneidkopfsaugbagger bei etwa gleichem Gefälle ausreichend große Zuflussgeschwindigkeiten beobachtet werden konnten, kann im Hafen von Leer mit der gleichen Zulaufgeschwindigkeit gerechnet werden, da zwischen den rheologischen Parametern der verschiedenen

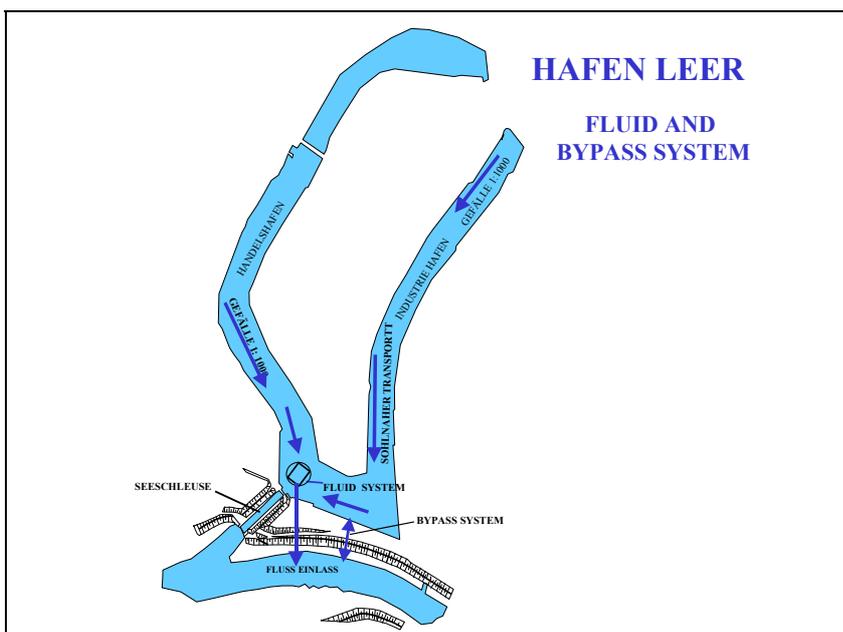


Bild 17: Grundriss des Hafens Leer

Umweltfragen (3)

Messtechnik und Baggertechnologie für ein Kosten sparendes Sedimentmanagement mit Hilfe der Fließfähigkeit des Baggergutes

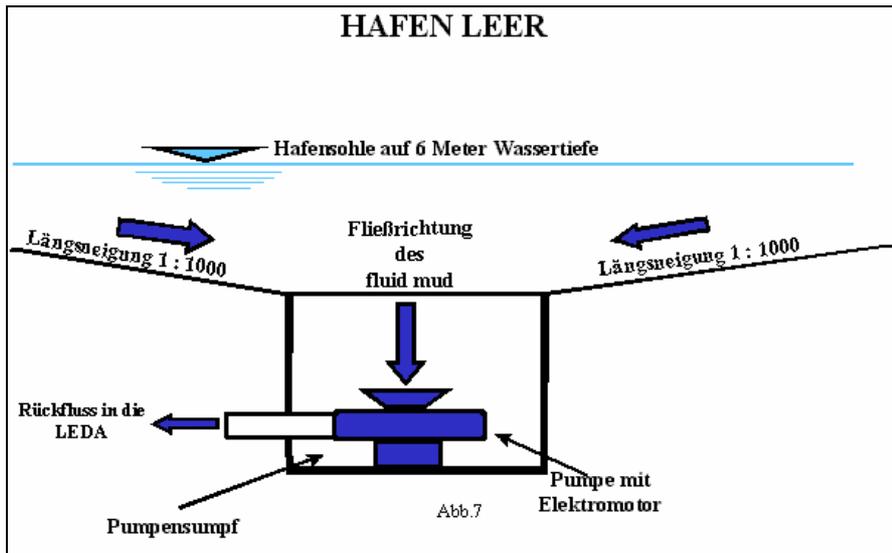


Bild 18: Skizze des Fluid- und Bypass-Systems im Hafen Leer

Schlick-Formationen in Emden und in Leer keine wesentlichen Unterschiede bestehen.

Da der Hafen Leer keinen Zufluss aus dem Hinterland besitzt, musste bisher der Hafenswasserstand jedes Mal durch Öffnen der Seeschleuse ausgeglichen werden (Ersatz von ca. 30.000 m³ Wasser täglich), wodurch erfahrungsgemäß erhebliche Schwebstoffmengen in den Hafen 'eingeschleust' wurden. Zu diesem Zwecke wurde ein Bypasssystem unter dem Deich hindurch gepresst, welches auf der Sohle des vorbeiführenden Flusses Leda Wasser aufnimmt und als Ausgleichsmenge in den Hafen pumpt.

Die Bypassanlage besteht aus einem Einzelrohr mit $d = 1.200$ mm Durchmesser mit einer integrierten Wasserpumpe, die auf beide Fließrichtungen eingeschaltet werden kann. Der weitere Vorteil dieses Bypasssystems liegt in der Zuführung von sauerstoffhaltigem Wasser aus der fließenden Leda in das relativ stehende und daher bei warmen Außentemperaturen recht sauerstoffarme Wasser des Hafens.

Zusätzliche Einleitungen in die Fluidpumpe (4.200 m³ Fluid Mud innerhalb von 4 Stunden) haben gezeigt, dass die Pumpe ausreichend bemessen wurde; der Maximaldurchsatz lag bei 130 g/l wobei der Pumpenmotor bei weitem noch nicht an der Leistungsgrenze arbeitete. Ein vorgeschalteter Konzentrationsmesser schaltet die Pumpe bei einem Zufluss von weniger als 50 g/l automatisch ab. Bedient werden beide Pumpen durch den Schleusenwärter. Ein wichtiges Argument zur Anschaffung des Fluid- und Bypass Systems (Gesamtkosten 1,3 Mio. €) waren die jährlichen Kosten für die Unterhaltung der Tiefen in Höhe von 0,4 Mio. €.

Literatur

GAMNITZER R., GREISER N., RUPP J. (2003): Sedimentuntersuchung mit Ultraschall, Hydrographische Nachrichten 12/ 2003, S. 25 -32.

GREISER N., GAMNITZER R., RUPP J. (2002): Pseudoplasticity of Cohesive Sediments: Causes and Innovative Techniques for Pre-Dredging Surveys, in Proceedings of the CEDA Dredging Days 2002, 22.-24. October 2002, Casablanca, Morocco, pp. III 27-33

GREISER N., GAMNITZER R., RUPP, J., WURPTS, R. (2004): Density versus Viscosity – A Comparative Study of the Nautical Bottom, in Proceedings of the World Dredging Congress XVII, Hamburg 27.09.-01.10.2004

WIT DE P.C., MEIJER H., GAMNITZER R., GREISER N., RUPP J. (2003): Reducing Siltation by Nautical Dredging: Investigation Results from Botlek Harbour, Rotterdam, in Proceedings of the CEDA Dredging Days 2003, 20.-21. November 2003, Amsterdam RAI, The Netherlands, pp. 61-70

WURPTS, R. (2003): 15 Jahre Erfahrung mit Fluid Mud: Bestimmung der nautischen Sohle durch rheologische Parameter Teil 1+2, Hansa 2003, Nr. 9+10, S. 64-72 u. 74-79

WURPTS R., GAMNITZER R., GREISER N. (2004): Monitoring der Nautischen Sohle mit Ultraschall, Hansa 2004, Nr. 9, S.

Verfasser

Dipl.-Ing. Rewert Wurpts

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG
Niederlassung Emden
Friedrich-Naumann-Str. 7-9, 26725 Emden
Tel.: 04921 897 – 142
E-Mail: rwurpts@nports.de

Dr. Norbert Greiser

Dr. Greiser & Partner
Wissenschaftler und Ingenieure
Max-Planck-Strasse 31, 21502 Geesthacht
Tel.: 04152 8369 – 56
E-Mail: norbert.greiser@greiserundpartner.de