

Grundlagen für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

Untersuchungen zur Nautischen Sohle

Dipl.-Ing. Frank Liebetruth, Dipl.-Ing. Fritz Eissfeldt, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, Referat Geotechnik Nord

Einleitung

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat die schiffbare Tiefe (Nautische Sohle) in den Bundeswasserstraßen und Häfen vorzuhalten. Probleme stellen die Bereiche dar, an deren Gewässersohle Schlick sedimentiert, dessen mechanischen Eigenschaften von seiner Zusammensetzung, seinem Alter und seiner Schichtstärke abhängig sind. Im flüssigen Zustand als Sedimentsuspension (Fluid Mud) ist eine Durchfahrt und Steuerbarkeit von Schiffen noch möglich. Mit zunehmender Festigkeit bzw. Viskosität muss der Schlick jedoch gebaggert werden, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs sicherzustellen. Die Nautische Sohle im Schlick (Bild 1) ist daher definiert als derjenige Horizont, von dem ab die physikalischen Eigenschaften des Schlicks einen kritischen Grenzwert annehmen, bei der die Steuerbarkeit und Manövrierfähigkeit des Schiffes nicht mehr gewährleistet ist.

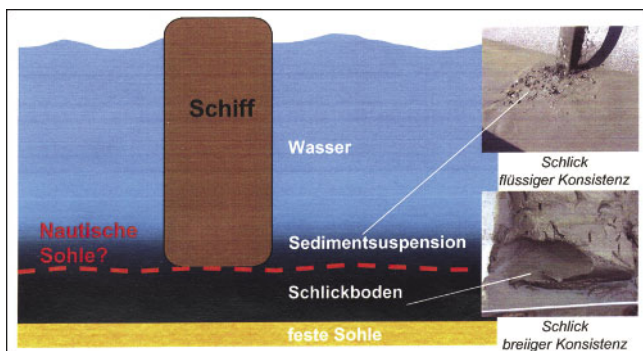


Bild 1: Nautische Sohle im Schlick

Dieser Horizont liegt in Schlickrevieren im Bereich zwischen Sedimentsuspension - auch als schwarzes Wasser oder Fluid Mud bezeichnet - und dem Schlickboden, also mehr oder weniger konsolidiertem Schlick. Aus geotechnischer Sicht kann Schlick als sedimentierender flüssig breiiger Boden klassifiziert werden, der thixotrope Eigenschaften besitzt und sich auf der Gewässersohle bildet. Die Hauptkornfraktionen bestehen aus organischem Schluff und Ton mit unterschiedlichen Feinsandanteilen.

Die Festlegung der Nautischen Sohle ist von drei wesentlichen Faktoren abhängig. Das sind zunächst die hydrodynamischen Einflüsse aus der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße, die wegen der verschiedenen Schiffsformen, Schiffsgeschwindigkeiten und Schiffsantriebe nur schwierig zu beurteilen sind und weiterer Forschung des Wasserbaus bedürfen. Die nautischen

Belange zur Beurteilung der Steuer- und Manövrierfähigkeit eines Schiffes sind von den Nautikern zu beantworten. Aus geotechnischer Sicht maßgebend für die Festlegung der Nautischen Sohle sind die geotechnischen und rheologischen Eigenschaften des Schlicks.

Der internationale Stand des Wissens zur Nautischen Sohle ist in dem Schlussbericht der gemeinsamen PIANC-IAPH Arbeitsgruppe II-30 von 1997 zusammengefasst. Danach sind für Schlick geringere Dichte und Scherfestigkeit in Wasserstraßen und Häfen Kriterien zur Festlegung der Nautischen Sohle angegeben. Neben der Echolotung als flächige Detektionsmethode werden rheologische und dichtebezogene Messungen als punktuelles Verfahren genannt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden eine Reihe von Untersuchungsverfahren mit jeweils unterschiedlichen Festlegungen für die Nautische Sohle angewandt. Um sie in ihrer Aussagefähigkeit und praktischen Verwendbarkeit für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bewerten und präzisieren zu können, wurden unter Federführung der BAW in den vergangenen Jahren Vergleichsuntersuchen im Labor und in-situ durchgeführt.

Grundlagen

Der bodenmechanisch physikalische Parameter zur Beschreibung der Adhäsionskräfte Schiff/Schlick ist die undrained Scherfestigkeit c_u . Sie repräsentiert eine Schubbeanspruchung im Schlick beim Eintauchen eines Schiffes und spiegelt die Reibung als Verhältnis von Antriebskraft zu Kontaktfläche wieder.

Die undrained Scherfestigkeit c_u als maßgebender geotechnischer Parameter für die Nautische Sohle hängt von einer Reihe von bodenphysikalischen Parametern wie der Korngrößenverteilung, organischem Anteil, Kalk-, Wasser-, Gas- und Salzgehalt, sowie Porenzahl und Feuchtdichte ab. Derzeit erfolgen Angaben zur Nautischen Sohle im Schlick auf der Grundlage von Dichtemessungen und der kornanalytischen Auswertung von Bodenproben unter Beachtung vorhandener revierspezifischer Korrelationen zwischen undrained Scherfestigkeit c_u und Dichte ρ (Rechlin, D. 1996, HANSA). Die Auswertung der ρ/c_u -Diagramme verschiedener Häfen und Schlickreviere im In- und Ausland ergab als Grenzwert für die undrained Scherfestigkeit einen Wert von $c_u = 128 \text{ N/m}^2 \pm 19 \text{ N/m}^2$. Für die Nautische Sohle der WSV-Wasserstraßen wird eine undrained Scherfestigkeit $c_u = 120 \text{ N/m}^2$ zu Grunde gelegt. Über korrelative Beziehungen (Rechlin, D. 1996, HANSA) lässt sich abhängig von

Korngrößenverteilung und undrännierter Scherfestigkeit bei $c_u = 120 \text{ N/m}^2$ die dazugehörige Grenzdichte ableiten. Der Zusammenhang zwischen Dichte ρ und undrännierter Scherfestigkeit c_u weist jedoch teilweise Streuungen auf und auf Grund seiner thixotropen Eigenschaften kann Schlick gleicher Dichte unterschiedliche Festigkeiten annehmen.

Eine Alternative zur undrännierten Scherfestigkeit c_u stellt die Viskosität η als rheologischer Parameter dar (Dasch, W.; Wurpts, R. 1999, HANSA). Die Viskosität ist der Widerstand einer Flüssigkeit gegen mechanische Verformungen infolge Schubspannung. Die Viskosität ist definiert als der Quotient aus der Schubspannung und der Scherrate bzw. Schergeschwindigkeit. Wegen seiner thixotropen Eigenschaften zählt Schlick zu den nicht-Newton'schen Stoffen. Das bedeutet, dass bei Belastungssteigerung eine Verflüssigung einsetzt, die sich zeitverzögert wieder vollständig zurückbilden kann. Schlick besitzt somit eine Strukturfestigkeit.

Um rheologische und geotechnische Untersuchungsergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden Vergleichsmessungen in mit Schlick gefüllten Schutten unter gleichen Randbedingungen durchgeführt. Dabei kamen die bisher verwendeten geotechnischen Untersuchungsverfahren und neu konzipierte rheologische Viskositätssonden zum Einsatz.

Aus den Schuttenversuchen erwies sich die „Nautisonde“ von Consulting Dr. Dasch u. a. wegen der feinen Auflösung als eine gute Alternative zur bisher in der Praxis eingesetzten Dichtesonde. Mit den Messpaddeln der Nautisonde wird eine Scherbeanspruchung im Schlick erzeugt und gemessen. Diese Scherbeanspruchung ist übertragbar auf eine Schiffsdurchfahrung im Schlick. Die für die Scherbeanspruchung im Schlick notwendigen Kräfte werden von integrierten Sensoren gemessen. Kalibriert ist die Nautisonde an Newton'schen Flüssigkeiten mit genormten Rotationsrheometern. Über korrelative Beziehungen ergibt sich der rheologische Parameter Viskosität η (Pa·s).

Da sowohl bei der Flügel- als auch bei der Nautisonde eine Scherbeanspruchung im Schlick erzeugt und gemessen wird, erfolgte eine Kalibrierung der Nautisonde an der Flügelsonde unter Laborbedingungen (Bild 2).

Es ergab sich ein korrelativer Zusammenhang zwischen der undrännierten Scherfestigkeit c_u (Pa) und der Viskosität η (Pa·s) von:

$$c_u \cong 7 \cdot \eta$$

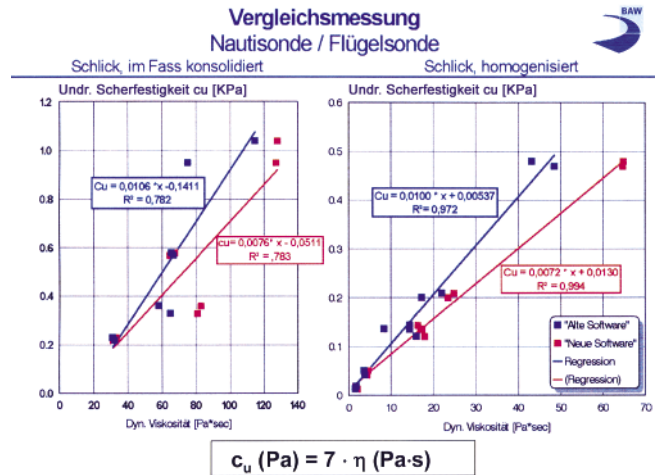


Bild 2: Korrelativer Zusammenhang zwischen undrännierter Scherfestigkeit c_u und Viskosität η aus Vergleichsuntersuchungen an Schlickten unterschiedlicher Dichte

WSV - Praxis

In der WSV erfolgt die revierspezifische Festlegung der Nautischen Sohle und damit verbundener Unterhaltungsbaggerungen mit Zweifrequenzecholotverfahren in Verbindung mit der Dichte-(Isotopen-)sonde. Durch unterschiedliche Schwebstoffgehalte (Organikanteile), Sandeinlagerungen (Dichtegradienten) u. a. werden nicht selten mehrere Horizonte im Schlick detektiert und zusätzlich die revier- und jahreszeitabhängigen Grenzdichten beeinflusst. Es hat sich in verschiedenen Schlickrevieren gezeigt, dass mit den üblichen Zweifrequenz-Echolotpeilungen verschiedene Schlickhorizonte über die Tiefe nicht zufriedenstellend detektiert werden sowie geotechnische und rheologische Eigenschaften den Sedimentsuspensionen und Schlickböden nicht zugeordnet werden können.

Beispiel Brunsbüttel

Das nachfolgende Bild 3 zeigt ein Beispiel aus den Vorhäfen Brunsbüttel.

Dargestellt sind Peilpläne eines WSV-Zweifrequenz-echolotes für zwei Längsprofile. Die Messungen erfolgten zeitgleich bei einem Abstand zwischen den beiden Längsprofilen von nur 12 m. Bei dem oberen Peilplan wurde über das gesamte Längsprofil eine durchgängige Schlickschicht detektiert. Im unteren Peilplan (rechts) liegt das Peilniveau der 100 kHz und 15 kHz-Frequenz annähernd auf gleicher Höhe. Danach ist in diesem Streckenabschnitt keine Suspension vorhanden. Der Übergang zur festen Sohle befindet sich oberhalb der Sollsohle, sodass zur Gewährleistung der Sicherheit des Schiffsverkehrs Baggermaßnahmen notwendig wären.

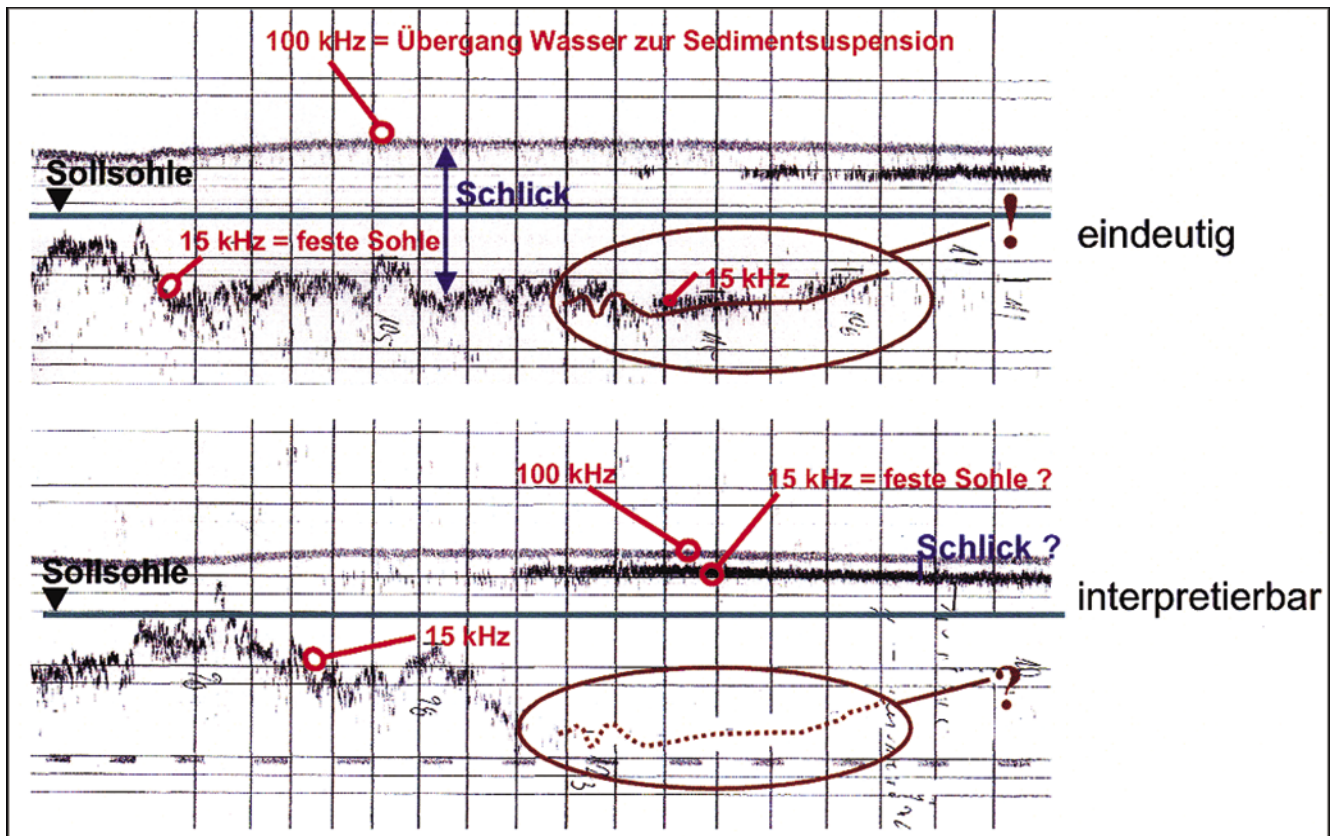


Bild 3: WSV-Peilplotpläne aus den Vorhäfen Brunsbüttel

Um die Peilergebnisse auf ihre Aussagefähigkeit zu beurteilen und Aussagen zu den geotechnischen Eigenschaften der detektierten Suspension hinsichtlich Schiffbarkeit zu machen, wurden von der BAW Vergleichsmessungen vorgeschlagen und durchgeführt. Im Vorfeld dieser Untersuchungen erfolgten bereits in verschiedenen Schlickrevieren der WSV Vergleichsuntersuchungen zur Detektion der Nautischen Sohle mit am Markt angebotenen geophysikalischen, rheologischen und geotechnischen Untersuchungsverfahren. Im Ergebnis dieser Vergleichsuntersuchungen wurden in Brunsbüttel folgenden Messverfahren und -geräte eingesetzt:

Geophysikalische Messverfahren:
Peilungen mit dem

- Zweifrequenzecholot der WSV
- Mehrfrequenzecholotverfahren DSLP der Firma General Acoustics
- Sedimentecholot SAS 96 der Firma Innomar

Rheologische punktuelle Messverfahren:

- Nautisonde von Consulting Dr. Dasch

Geotechnische punktuelle Messverfahren:

- Dichte-(Isotopen-)sonde
- Kernentnahmegerät zur Probengewinnung für Laborversuche.

Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen sind auf dem nachfolgenden Bild 4 dargestellt.

Mit dem Zweifrequenzecholot der WSV wurde keine Schlickschicht festgestellt. Sowohl die hohe 100 kHz Frequenz, die üblicherweise den Übergang vom Wasser zur Sedimentsuspension anzeigt, als auch die niedrige 15 kHz Frequenz, mit der der Übergang zur festen Sohle festgelegt wird, liegen auf einem Horizont. Mit dem DSLP-Verfahren hingegen wurde eine Schlickschicht ermittelt und die Grenzflächen nach General Acoustics als Materialphasen flüssig und fest hochauflösend detektiert. Auch mit dem Sedimentecholot wurde diese Schlickschicht bestimmt und die Grenzübergänge in ähnlicher Höhenkote wie vom DSLP-Verfahren ermittelt. Nach den bisher in der BAW gemachten Erfahrungen eignen sich zur Festlegung der Nautischen Sohle und damit der maßgebenden Baggersohle derzeit nur die punktuellen Messverfahren Nautisonde und Dichtesonde. Im Revier Brunsbüttel lagen die Ergebnisse dieser punktuellen Messverfahren fast auf gleicher Höhenkote.

Durch die vergleichenden Messungen mit unterschiedlichen Messverfahren und -geräten konnten die Widersprüche nach Bild 3 in Brunsbüttel geklärt und die Nautische Sohle näher bestimmt werden. Baggermaßnahmen waren nicht erforderlich.

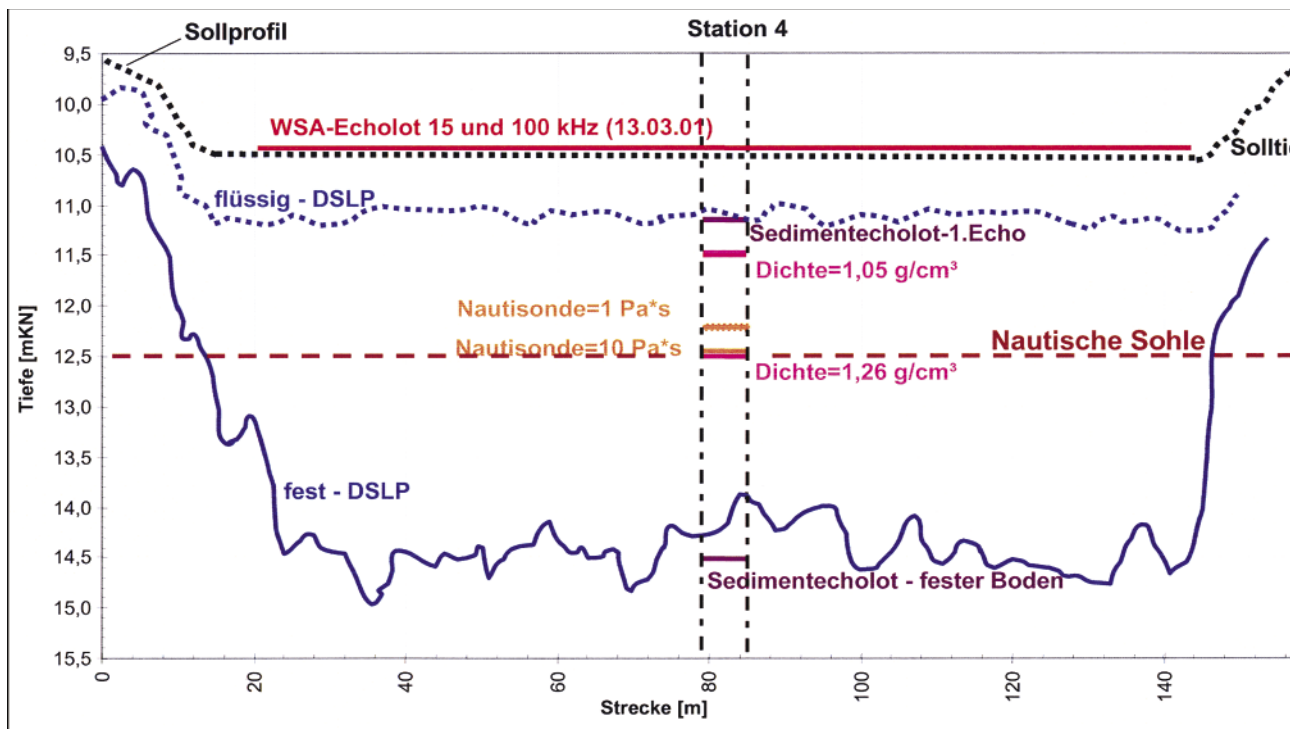


Bild 4: Messergebnisse Querprofil 4, Vorhäfen Brunsbütte

Beispiel Moderortrinne

Die Zuverlässigkeit von Messergebnissen ist am besten in Naturversuchen zu prüfen. Diese Naturmessungen wurden in der Moderortrinne des südlichen Peenestromes mit einem für dieses Revier typischen Binnenschiff durchgeführt. Neben den geophysikalischen, rheologischen und geotechnischen Messungen wurden zusätzlich fünf Fahrversuche mit umfangreichen Messungen zur Fahrdynamik des Schiffes in den Fahr-

wasserrandbereichen durchgeführt. Beurteilt wurde die Steuerfähigkeit und Manövrierbarkeit des Schiffes bei der Fahrt durch Schlick. Weiterhin dienen die Messergebnisse der Verifizierung der geotechnischen und rheologischen Grenzwerte. In Bild 5 sind die Messergebnisse für die Versuchsfahrt im grünen Tonnenstrich aufgetragen.

Das Bemessungsschiff ist bei extrem außermittiger Fahrt im grünen Tonnenstrich durch ca. 40 cm mäch-

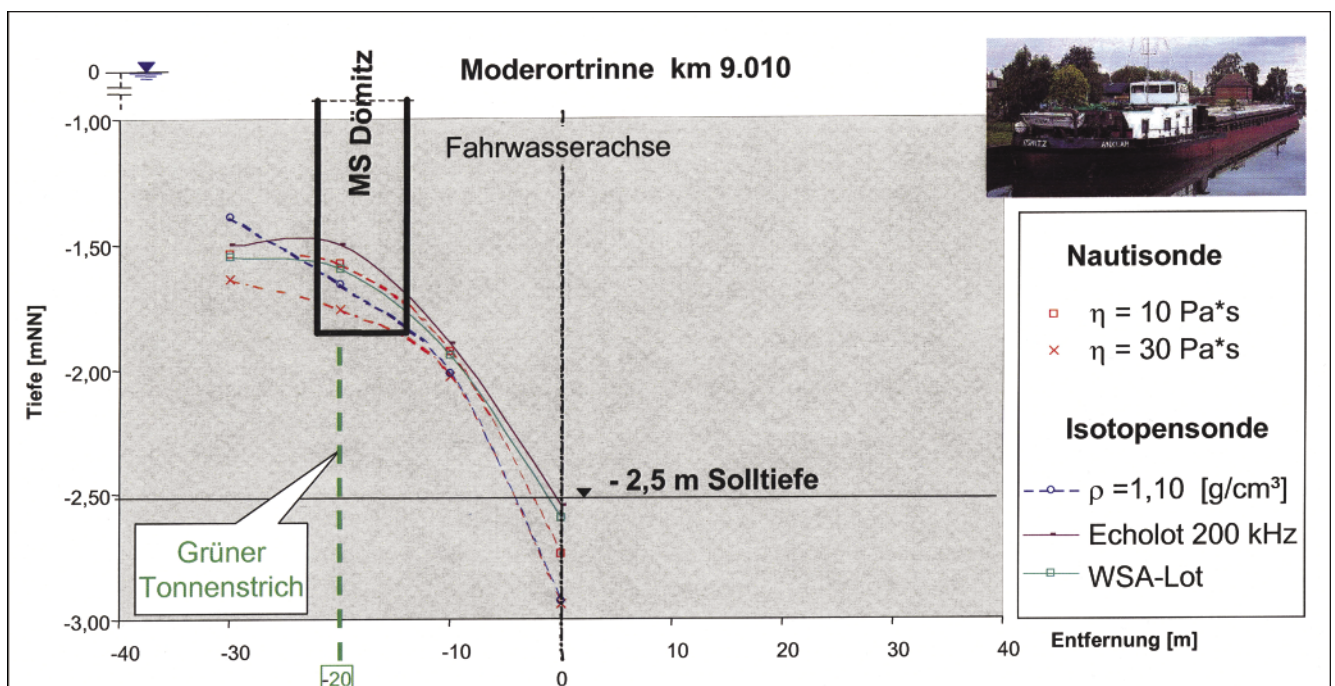


Bild 5: Messergebnisse Querprofil 1, Moderortrinne

tigen Schlick im Grundsatz mit eingeschränkter Leichtigkeit steuerbar gewesen und hat dabei die Sedimentschicht sogar unterhalb der festgelegten Grenzwerte von $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und einer Grenzdicke von $\rho = 1,10 \text{ g/cm}^3$ durchfahren. Bei Begegnungsverkehr ist allerdings eine erhöhte Aufmerksamkeit des Schiffsführers notwendig.

Fazit

Im Ergebnis aller bisher durchgeführten Vergleichsuntersuchungen wird die geotechnische Definition zur Ermittlung der Nautischen Sohle im Schlick aus der Sicht der BAW wie folgt festgelegt (Bild 6):

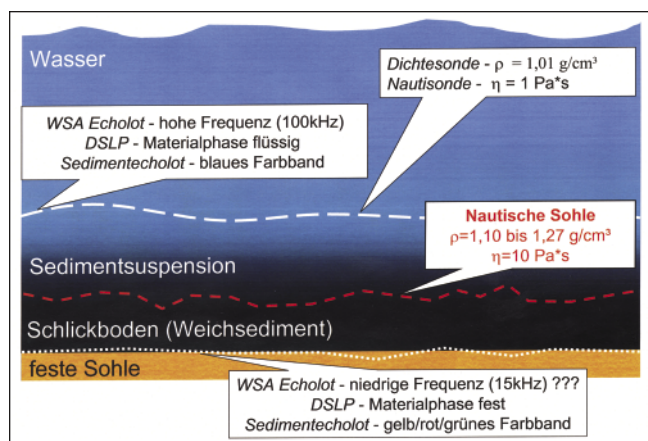


Bild 6: Definitionen zur Nautischen Sohle aus geotechnischer Sicht

Der Übergang von Wasser zur Sedimentsuspension kann genähert durch die hohe Frequenz des Zweifrequenzecholotes, mit dem DSLP-Verfahren durch die Materialphase flüssig sowie durch das erste Echo bzw. blaue Farbe mit dem Sedimentecholot ermittelt werden. Mit den punktuellen Verfahren kann diese Grenzfläche mit einer Feuchtdichte von $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$ und einer Viskosität von $\eta = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beschrieben werden.

Der Übergang vom Schlickboden zur festen Sohle kann genähert mit der niedrigen Frequenz des Zweifrequenzecholotes, durch die Materialphase fest des DSLP-Verfahrens und dem gelb-rot-grünen Farbband des Sedimentecholotes festgestellt werden.

Die Ermittlung der Nautischen Sohle ist nach den vorliegenden Ergebnissen vorerst nur mit der Nautisonde bei einer Viskosität von $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ revierunabhängig und mit der Dichtesonde abhängig von der Korngrößenverteilung des Schlicks zum jeweiligen Zeitpunkt der Untersuchungen durch eine revierspezifische Grenzdicke von $\rho = 1,10 \text{ bis } 1,27 \text{ g/cm}^3$ möglich. Kalibriert an den punktuellen Messungen der Nautisonde oder Isotopensonde können mit dem DSLP-Verfahren und dem Sediment-Echolotverfahren die Eigen-

schaften des Schlicks jedoch weiter klassifiziert und Schichthorizonte angegeben werden.

Sowohl die Dichte- als auch die Nautisonde können als punktuelle Messverfahren nur zur Kalibrierung flächiger Detektionsmethoden dienen.

Mit den o. g. DSLP- und SAS 96-Verfahren kann mit größerem Auswertumfang und zusätzlichen Informationen aus punktuellen Dichte- und Viskositätsmessungen die Auswertequalität gegenüber einem Zweifrequenzecholot deutlich verbessert werden.

Ausblick

Im September 2003 führt die BAW in Zusammenarbeit mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Emden Messungen im Schlick der Ems durch. Neben den bereits vorgestellten geophysikalischen Verfahren sollen auch die neu am Markt angebotenen geophysikalische Messverfahren „admodus“ der Fa. Dr. Greiser und Partner sowie das Verfahren „Silas“ der Firma Stema eingesetzt werden.

Neben dem Vergleich und der Bewertung der Messergebnisse und -verfahren werden die Grenzwerte für die Nautische Sohle und somit für die Unterhaltungsbaggerungen in der Ems festgelegt.

Das Ingenieurbüro Dr. Greiser und Partner untersucht im Auftrag der BAW den Einfluss unterschiedlicher Biomassenanteile auf die Viskosität im Schlick aus den Vorhäfen der Schleuse Brunsbüttel. Mit den Untersuchungen soll beantwortet werden, wie sich die Biomassenänderungen auf die Viskosität, Dichte und Scherfestigkeit von Schlick auswirken und wie groß die jahreszeitbezogenen Änderungen dieser Parameter sind. Daraus wird dann abzuleiten sein, ob der biologische Einfluss auf die Viskosität von Schlick als „wesentlich“ oder als „vernachlässigbar“ für das Revier Brunsbüttel und für andere Schlickreviere einzustufen ist.

Literaturverzeichnis

Rechlin, D.: Bestimmung der nautischen Tiefe in Hauptschlickgebieten, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 133. Jahrgang, 1996 Nr. 7

PIANC: APPROACH CHANNELS – A Guide for Design – Final Report of the Joint-PIANC-IAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA (1997)

Dasch, W.: Die NAUTISONDE ein neuer Viskositäts-sensor, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 135. Jahrgang, 1998 Nr. 9

Eißfeldt, Fritz P.; Pietsch, M.: Geotechnische und rheologische Untersuchungen zur Nautischen Sohle im Revier der Außenweser, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 138. Jahrgang, 2001 Nr. 6

Eißfeldt, Fritz P.: Nautische Sohle im Blexer Bogen, Geotechnische und rheologische Vergleichsuntersuchungen, BAW 99513773, Febr. 2000, unveröffentlicht

Pietsch, M.: Festigkeitsuntersuchungen am Schlick - Vergleich der Messungen mit der Nautisonde und der undrännierten Scherfestigkeit ermittelt mit der Laborflügelsonde, Laborbericht 017, Nov. 2000, unveröffentlicht

Liebetruth, F.: Moderortrinne - Stellungnahme zu den Untersuchungen zur Nautischen Sohle, BAW 99513777, März 2000, unveröffentlicht

Liebetruth, F.: Vorhäfen Schleuse Brunsbüttel - Stellungnahme zu den Untersuchungen zur Nautischen Sohle, BAW 99513773, Nov. 2001, unveröffentlicht

Uliczka, K.; Maushake, Ch.: 1. Teilgutachten zur Ermittlung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne, Fahrversuche zur Schiffsdynamik, BAW 0050210007, Juli 2001, unveröffentlicht

Liebetruth, F.: 2. Teilgutachten zur Ermittlung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne - Geotechnische Stellungnahme zu den Fahrversuchen am 5. und 6. September 2000, BAW 99513777, März 2002, veröffentlicht

Liebetruth, F.: Ermittlung der Nautischen Sohle im Schlick Blexer Bogen, BAW 99513773, Mai 2002, veröffentlicht