

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Liebetruth, Frank; Eißfeldt, Fritz P.**

**Nautische Sohle im Schlick. FuE-Abschlussbericht  
A39550110128. Projekt Nr. 8137**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106990>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

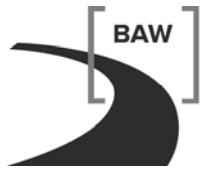
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): Nautische Sohle im Schlick. FuE-Abschlussbericht A39550110128. Projekt Nr. 8137. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

## **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.

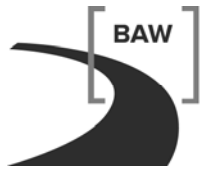
Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Nautische Sohle im Schlick**  
**Projekt Nr. 8137**

**A 395501 10128**



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Nautische Sohle im Schlick  
Projekt Nr. 8137**

Auftraggeber: WSA Brunsbüttel  
WSA Bremerhaven  
WSA Emden  
WSA Stralsund

Bearbeitungszeit: 1999 bis 2010

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A 395501 10128

Aufgestellt von: Abteilung: Geotechnik  
Referat: K1  
Bearbeiter: Liebetruh, F.  
Eißfeldt, F. P.

Hamburg, den 8. März 2011

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

## Zusammenfassung

Zur sicheren Befahrbarkeit der Bundeswasserstraßen und Häfen muss eine schiffbare Wassertiefe vorgehalten werden. Dafür sind regelmäßige Sohliefenkontrollen der Fahrrinnen durchzuführen. Dies erfolgt in der Regel durch *Zwei - Frequenzecholotpeilungen*, wobei in suspensionsartigen Schlickten vielfach keine befriedigenden Aussagen hinsichtlich der Nautischen Sohle und damit dem Erfordernis von Unterhaltungsbaggerungen möglich sind. Aufgrund hoher Schlickvorkommen fallen in den tidebeeinflussten Revieren jährlich umfangreiche Baggermengen und -kosten an. Um diese zu verringern, sind strombauliche Maßnahmen, baggertechnische Optimierungen und eine verbesserte messtechnische Erfassung der Nautischen Sohle erforderlich.

Das Ziel der Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens war es, die Entwicklung verbesserter Verfahren zur Bestimmung der Nautischen Sohle zu begleiten und die Grenzwerte für die Nautische Sohle weiter zu optimieren.

Im Ergebnis umfangreicher Vergleichsuntersuchungen in situ und im Labor wurde die Eignung von Messverfahren und Messgeräten zur messtechnischen Erfassung der Nautischen Sohle nach dem Stand der Technik und nach am Markt neu entwickelten Verfahren untersucht und bewertet sowie Aussagen zur Nautischen Sohle abgeleitet. Dafür wurden punktuell tiefenprofilierende Messsonden zur Erfassung geotechnischer und rheologischer Kenngrößen und linienförmig messende Zwei - und Mehr - Frequenzecholotverfahren eingesetzt.

In der Moderortrinne des südlichen Peenestroms wurden zusätzlich Fahrversuche mit umfangreicher Messung der Fahrdynamik sowie geophysikalischer, rheologischer und geotechnischer Messungen durchgeführt.

Im Ergebnis aller Untersuchungen wurden revierspezifische Grenzwerte zur Bestimmung der Nautischen Sohle im Schlick angegeben. Der Übergang von Wasser zur Schlicksuspension (Fluid Mud) wird durch die hohe Frequenz (z.B. 210 kHz), die Feuchtdichte von  $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$  und durch die Viskosität von  $\eta = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  beschrieben. Die Nautische Sohle wird abhängig von der Kornzusammensetzung des Schlicks (insbesondere dem Sandgehalt) und der undränierten Scherfestigkeit durch eine revierspezifische Grenzdichte zwischen  $\rho = 1,10$  bis  $\rho = 1,28 \text{ g/cm}^3$  und revierunabhängig durch eine Viskosität der Nautisonde von  $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  definiert. Die niedrige Frequenz (z.B. 33 kHz) gibt die Schichtgrenze vom Schlickboden (Weichsediment) zur festen Sohle an (siehe Bild 3).

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Problemstellung	1
2	Ziel	3
3	Stand des Wissens	3
4	Definition der Nautischen Sohle	3
4.1	Nautische Sohle im Schlick	4
4.1.1	Nautische Sohle im Schlick - geotechnische und rheologische Parameter	6
5	Untersuchungsmethoden/ Motivation	7
6	Ergebnisse	7
6.1	Geotechnische und rheologische Vergleichsuntersuchungen an Schlick aus dem Blexer Bogen in Klappschuten (siehe [3] und [4])	7
6.2	Nautische Sohle in der Moderortrinne (siehe [6], [7], [8])	9
6.3	Nautische Sohle im Blexer Bogen (siehe [9])	11
6.4	Nautische Sohle in der Ems km 47,3 bis km 48,1 (siehe [10])	12
6.5	Nautische Sohle in den Vorhäfen der Schleuse Brunsbüttel (siehe [11], [12])	13
6.6	Sedimentkonditionierung im Emders Fahrwasser zwischen km 44,5 und km 45,0 (siehe [13])	13
7	Schlussfolgerungen	14

## Bildverzeichnis

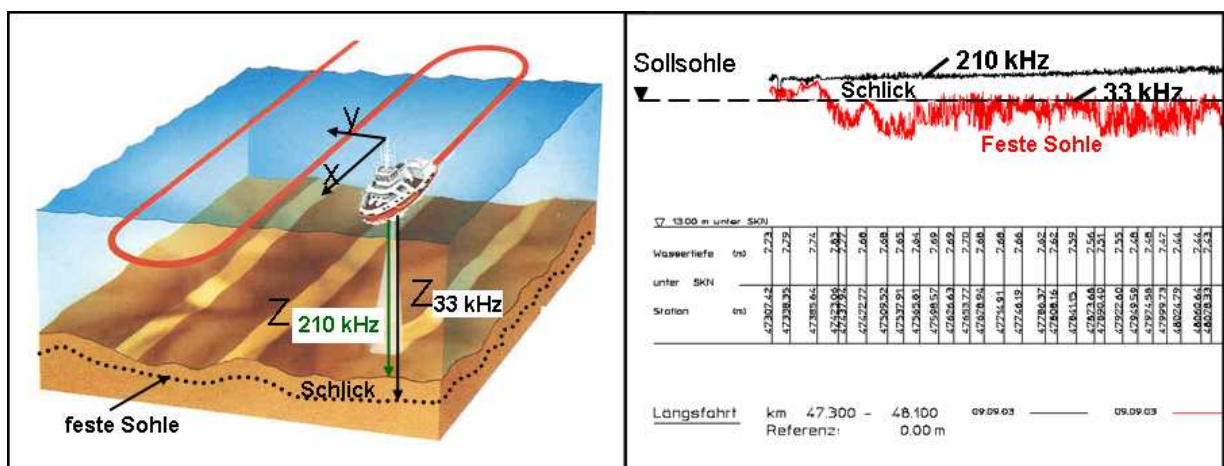
## Seite

Bild 1	Zwei - Frequenzecholotverfahren (WSV)	1
Bild 2	Radiometrische Dichte- (Isotopen-) sonde des WSA Cuxhaven in 2003	2
Bild 3:	Nautische Sohle im Schlick	4
Bild 4	Körnungsband vom Schlick	5
Bild 5	Schlick (Fluid Mud) aus rheologischer Sicht	5
Bild 6	Korrelationen zwischen undrännierter Scherfestigkeit $c_u$ und Dichte $\rho$ [1]	6
Bild 7	Nautisonde	8
Bild 8	Korrelativer Zusammenhang zwischen undrännierter Scherfestigkeit $c_u$ und Viskosität $\eta$ aus Vergleichsuntersuchungen an Schlickern unterschiedlicher Dichte [5]	9
Bild 9	Fahrdynamische Parameter aus Fahrversuchen in der Moderortrinne [7]	10
Bild 10	Geotechnische Definitionen zur Nautischen Sohle in der Moderortrinne [8]	10
Bild 11	Blexer Bogen, Weser km 62 bis km 64,5 mit eingetragenen Untersuchungsbereichen (Testfelder) [9]	11
Bild 12	SILAS und DensiTune Verfahren der Fa. STEMA [10]	12

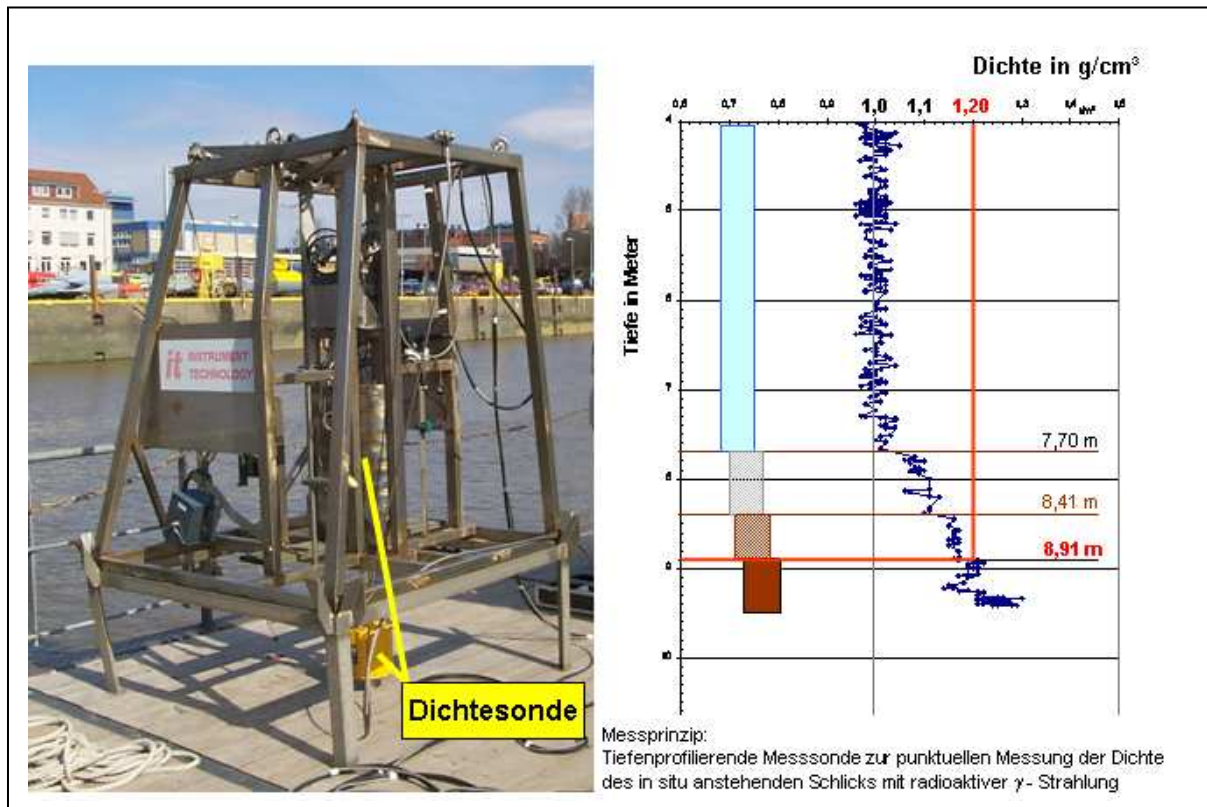
## 1 Problemstellung

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat die schiffbare Tiefe (Nautische Sohle) in den Bundeswasserstraßen und Häfen vorzuhalten. Die Problembereiche stellen die Fahrrinnen dar, an deren Gewässersohle Schlick sedimentiert. Die mechanischen Eigenschaften sind von seiner Zusammensetzung, seinem Alter und vor allem der Mächtigkeit und dem Sandgehalt abhängig. Seine Festigkeit und Viskosität nimmt mit der Tiefe zu. In der Schlicksuspension (Fluid Mud) ist im flüssigen Zustand eine sichere Durchfahrt und uneingeschränkte Steuerbarkeit von Schiffen noch möglich. Mit zunehmender Festigkeit bzw. Viskosität muss der Schlick jedoch gebaggert werden, um die Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs auf den Wasserstraßen sicher zu stellen. Um ein Kriterium für die sichere Durchfahrt und Steuerbarkeit von Schiffen im Schlick und dem Erfordernis für Unterhaltungsbaggerungen zu erzielen, wurde die Definition der Nautischen Sohle (siehe Abs. 4) eingeführt.

Zu Beginn des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens zur Nautischen Sohle im Schlick erfolgte die revierspezifische Festlegung der Nautischen Sohle und damit verbundener Unterhaltungsbaggerungen in der WSV mit Zwei - Frequenzecholotverfahren z. T. in Verbindung mit der radioaktiven Dichte-(Isotopen-) sonde als punktuelles Messverfahren oder mit dem Navitracker zur linienförmigen radioaktiven Dichtemessung (siehe Bilder 1 und 2).



**Bild 1** Zwei - Frequenzecholotverfahren (WSV)



**Bild 2** Radiometrische Dichte- (Isotopen-) sonde des WSA Cuxhaven in 2003

Mit den Zwei - Frequenzecholotverfahren sind in den suspensionsartigen Schlickten (Fluid Mud) vielfach keine befriedigenden Aussagen zur Lage der Nautischen Sohle und damit zum Erfordernis von Unterhaltungsbaggerungen möglich. Durch unterschiedliche Schwebstoffgehalte (Organikanteile), Sandeinlagerungen (Dichtegradien) u. a. werden oftmals mehrere Horizonte im Schlick mit den Zwei - Frequenzecholotverfahren detektiert. Zusätzlich sind die mit punktuellen Messverfahren ermittelten Grenzdichten revier- und jahreszeitabhängig. Es hat sich in verschiedenen Schlickrevieren gezeigt, dass mit den üblichen Zwei - Frequenzecholotpeilungen keine eindeutigen Schlickhorizonte über die Tiefe detektiert und dem Schlick geotechnische sowie rheologische Eigenschaften nicht zufriedenstellend zugeordnet werden können. Entgegen des vorhandenen korrelativen Zusammenhanges zwischen der Dichte  $\rho$  und der undränierten Scherfestigkeit  $c_u$  (siehe Abs. 4.1.1) ergeben sich teilweise erhebliche Streuungen bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse. Das ist unter anderem damit zu begründen, dass Schlick gleicher Dichte durch die thixotropen Schlickeigenschaften und das strukturviskose Materialverhalten unterschiedliche Festigkeiten annehmen kann.

Messungen mit radioaktiven Messverfahren sind aufwendig und mit umfangreichen Sicherheitsanforderungen verbunden. Der im WSA Emden bis Ende der 90-er Jahre eingesetzte



Navitracker war veraltet und konnte aus technischen Gründen nicht mehr eingesetzt werden. Somit waren neue Messverfahren und -geräte erforderlich.

## **2 Ziel**

In den tidebeeinflussten Wasserstraßen fallen jährlich umfangreiche Baggermengen und -kosten an. Zur Reduzierung sind deshalb sowohl strombauliche Maßnahmen als auch baggertechnische Optimierungen sowie eine verbesserte messtechnische Erfassung der Nautischen Sohle notwendig.

Das Ziel der Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens war es, die Entwicklung verbesserter Verfahren zur Bestimmung der Nautischen Sohle zu begleiten und die Grenzwerte für die Nautische Sohle zu optimieren.

## **3 Stand des Wissens**

Der internationale Stand des technischen Wissens zur Nautischen Sohle war mit Beginn des FuE-Vorhabens im Schlussbericht der gemeinsamen PIANC-IAPH Arbeitsgruppe II-30 von 1997 zusammengefasst. Im Abschnitt 6.5.4 des PIANC – Berichtes sind Empfehlungen zu den Ausbautiefen in Schlickgebieten angegeben und Kriterien für ihre Bestimmung beschrieben. Neben der Echolotung als flächige Detektionsmethode werden rheologische und dichtbezogene Messungen als punktuelle Verfahren genannt.

## **4 Definition der Nautischen Sohle**

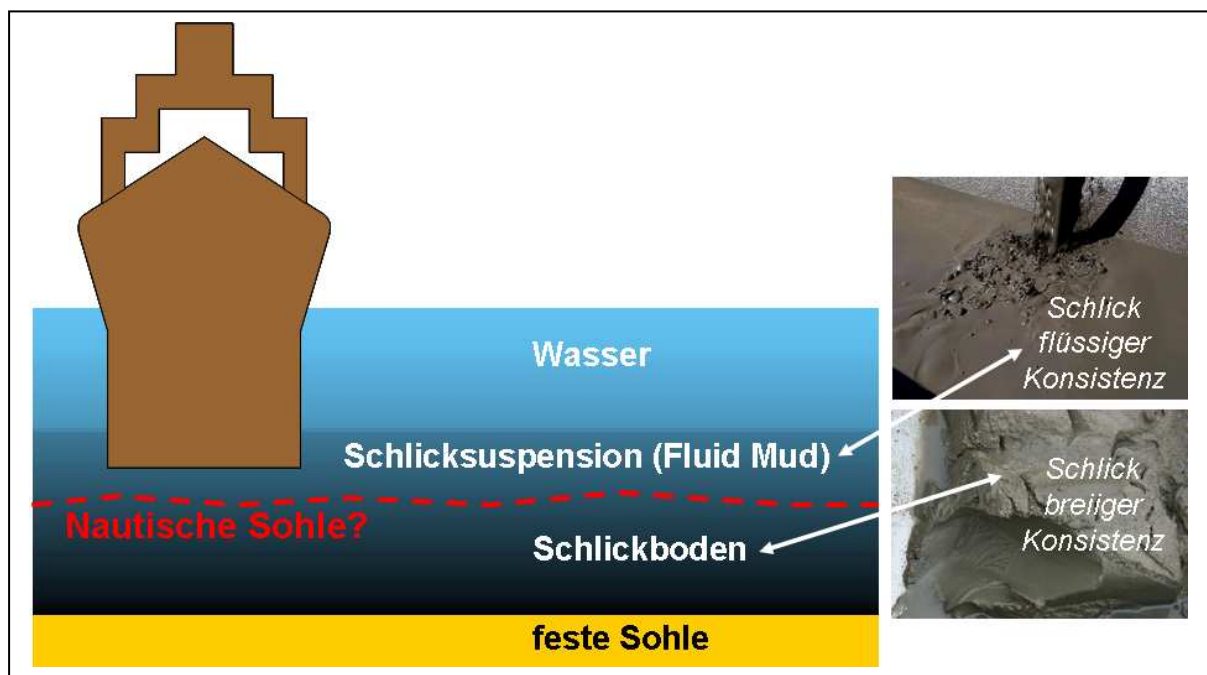
Die Nautische Sohle (siehe Bild 3) ist als derjenige Horizont definiert, von dem ab die physikalischen Eigenschaften des Bodens einen kritischen Grenzwert erreichen, jenseits dessen eine Grundberührung des Schiffskiels entweder Schäden am Schiff oder nicht mehr tolerierbare Wirkungen auf die Steuerbarkeit und Manövrierfähigkeit verursachen. Dies gilt insbesondere für Wasserstraßen, auf denen Schiffe mit eigenem Antrieb Schiffsgeschwindigkeiten von mehr als 5 Knoten fahren.

#### 4.1 Nautische Sohle im Schlick

Die Festlegung der Nautischen Sohle im Schlick ist von drei wesentlichen Faktoren abhängig:

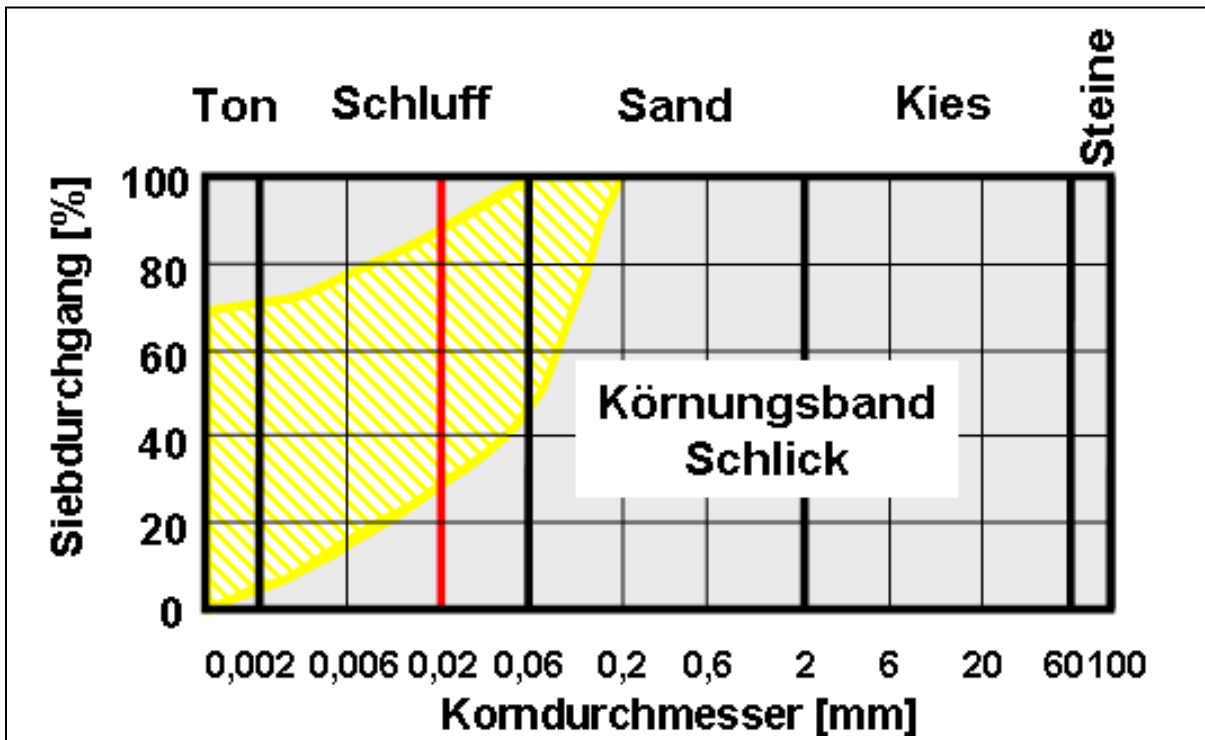
- Die hydrodynamischen Einflüsse aus der Wechselwirkung Schiff / Wasserstraße, die wegen der verschiedenen Schiffsformen, Schiffsgeschwindigkeiten und Schiffsantriebe nur schwierig zu beurteilen sind und weiterer Forschung des Wasserbaus bedürfen.
- Die nautischen Belange zur Beurteilung der Steuer- und Manövrierfähigkeit eines Schiffes, die von den Nautikern zu beantworten sind.
- Die geotechnischen und rheologischen Eigenschaften des Schlicks und deren versuchstechnischer Bestimmung, die im Rahmen dieses BAW-Forschungsvorhabens in den Jahren von 1999 bis 2010 untersucht wurden.

In Schlickrevieren liegt die Nautische Sohle (siehe Bild 3) im Bereich zwischen Schlicksuspension - auch als schwarzes Wasser oder Fluid Mud bezeichnet - und dem Schlickboden, also mehr oder weniger konsolidiertem Schlick.



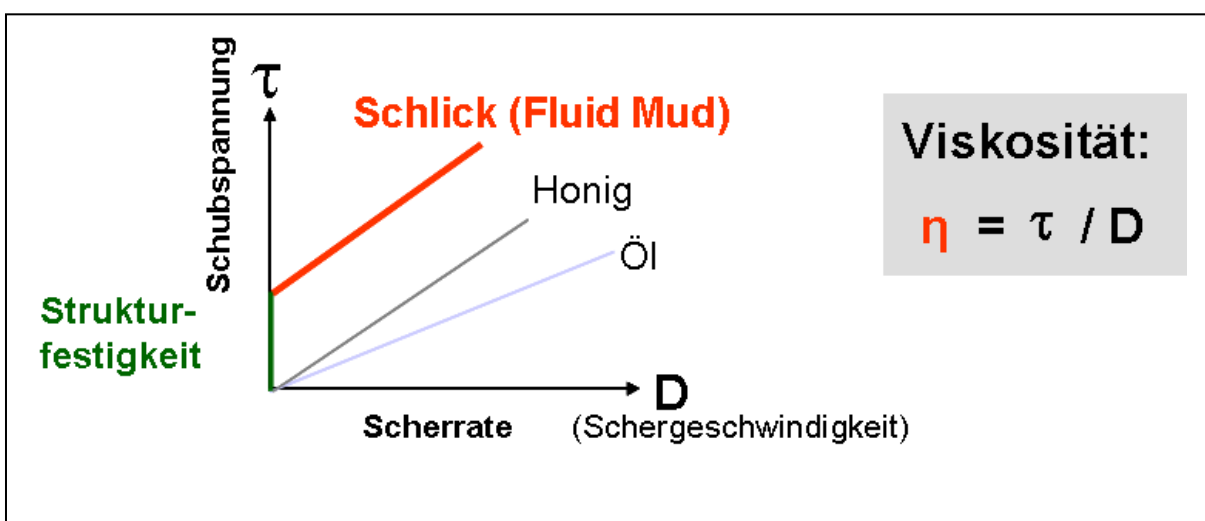
**Bild 3: Nautische Sohle im Schlick**

Aus geotechnischer Sicht kann Schlick als sedimentierender flüssig breiiger Boden klassifiziert werden, deren Hauptkornfraktionen aus organischem Schluff und Ton mit unterschiedlichen Feinsandanteilen bestehen (siehe Bild 4).



**Bild 4** Körnungsband vom Schlick

Aus rheologischer Sicht ist Schlick als strukturviskose Substanz mit thixotropen Eigenschaften zu klassifizieren und zählt zu den nicht-Newton'schen Flüssigkeiten. Das bedeutet, dass bei Belastungssteigerung eine Verflüssigung einsetzt, die sich zeitverzögert wieder zurückbilden kann (siehe Bild 5).

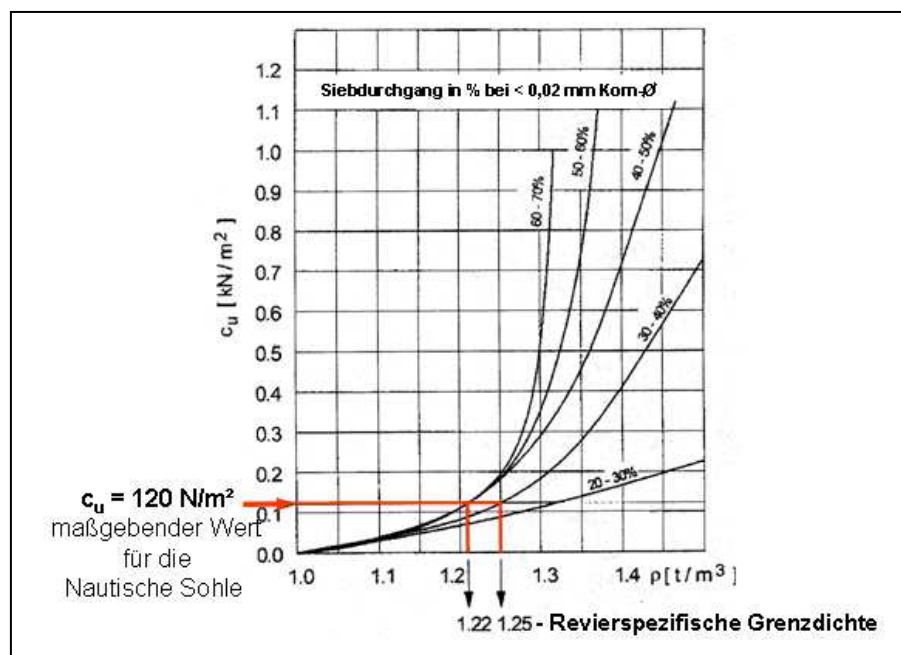


**Bild 5** Schlick (Fluid Mud) aus rheologischer Sicht

#### 4.1.1 Nautische Sohle im Schlick - geotechnische und rheologische Parameter

Der geotechnische Parameter zur Beschreibung der Adhäsionskräfte Schiff / Schlick ist die undrÄnirte Scherfestigkeit  $c_u$ . Sie reprÄsentiert eine Schubbeanspruchung im Schlick beim Eintauchen eines Schiffes und spiegelt die Reibung als VerhÄltnis von Antriebskraft zur KontaktflÄche wieder. Die undrÄnirte Scherfestigkeit  $c_u$  als maÄgebender geotechnischer Parameter fÄr die Nautische Sohle hÄngt von einer Reihe von bodenphysikalischen Parametern wie KorngrÖBenverteilung, organischem Anteil, Kalk-, Wasser-, Gas- und Salzgehalt, sowie Porenzahl und Feuchtdichte ab.

Mit Beginn des Forschungsvorhabens erfolgten Angaben zur Nautischen Sohle im Schlick auf der Grundlage von Dichtemessungen und der kornanalytischen Auswertung von Bodenproben unter Beachtung vorhandener revierspezifischer Korrelationen zwischen undrÄnirter Scherfestigkeit  $c_u$  und Dichte  $\rho$  (siehe [1] und Bild 6). Die Auswertung der  $\rho / c_u$  - Diagramme verschiedener HÄfen und Schlickreviere im In- und Ausland ergab als Grenzwert fÄr die undrÄnirte Scherfestigkeit einen Wert von  $c_u = 128 \text{ N/m}^2 \pm 19 \text{ N/m}^2$ . FÄr die Nautische Sohle der WSV-WasserstraÄen wird eine undrÄnirte Scherfestigkeit  $c_u = 120 \text{ N/m}^2$  zu Grunde gelegt. Über korrelative Beziehungen (siehe [1]) lÄsst sich abhÄngig von der KorngrÖBenverteilung bei einem Siebdurchgang von  $< 0,02 \text{ mm}$  Korndurchmesser und der undrÄnirter Scherfestigkeit bei  $c_u = 120 \text{ N/m}^2$  die dazugehÄrige revierspezifische Grenzdichte ableiten. Der Zusammenhang zwischen Dichte  $\rho$  und undrÄnirter Scherfestigkeit  $c_u$  weist jedoch teilweise Streuungen auf, weil Schlick auf Grund seiner thixotropen Eigenschaften bei gleicher Dichte unterschiedliche Festigkeiten annehmen kann.



**Bild 6** Korrelationen zwischen undrÄnirter Scherfestigkeit  $c_u$  und Dichte  $\rho$  [1]

Eine Alternative zur undrÄnierten Scherfestigkeit  $c_u$  stellt die Viskosität  $\eta$  als rheologischer Parameter dar (siehe [24]). 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 und besitzt eine Strukturfestigkeit (siehe Bild 5).

## 5 Untersuchungsmethoden/ Motivation

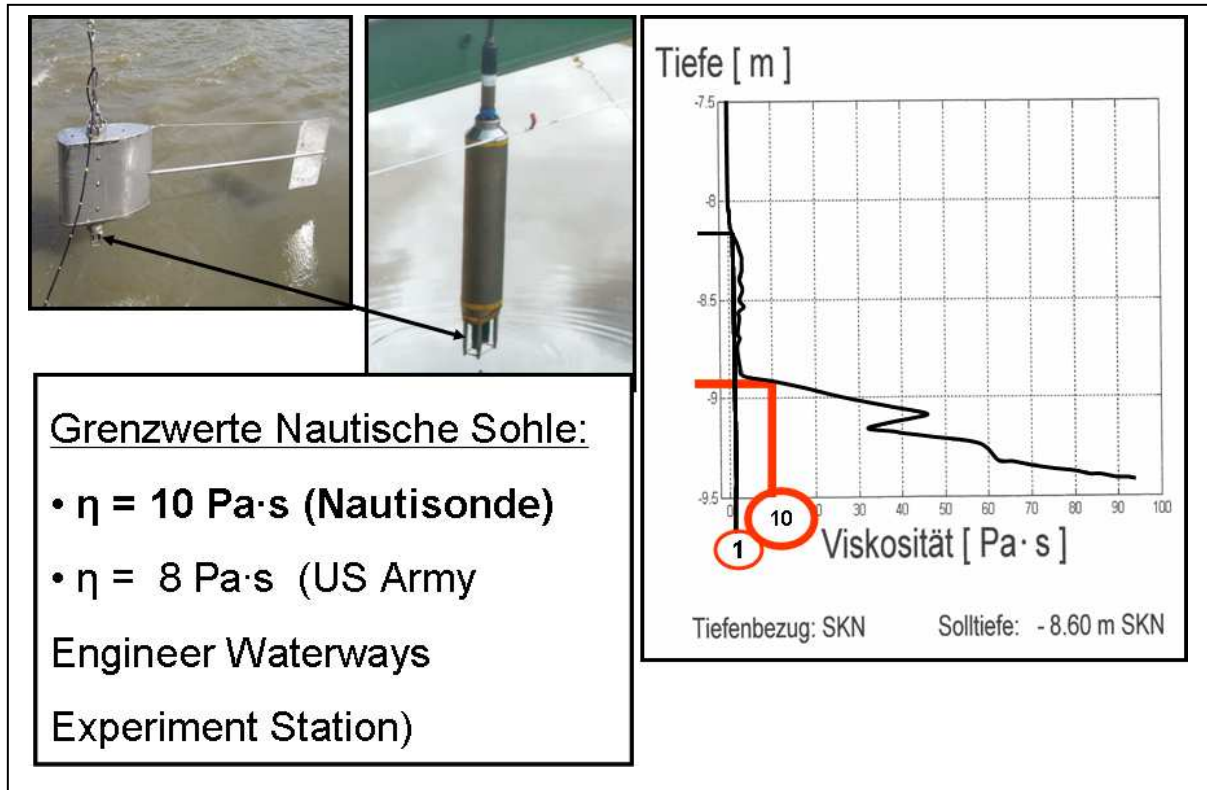
Mit den bei Beginn des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens vorhandenen Messverfahren waren in den suspensionsartigen Schlickten (Fluid Mud) keine befriedigenden Aussagen zur Nautischen Sohle möglich. Deshalb sind sowohl verbesserte und effizientere Echolotverfahren als auch rheologische sowie geotechnische Untersuchungsverfahren erforderlich. Im Ergebnis einer Marktrecherche wurden neu am Markt angebotene punktuell messende rheologische Verfahren und linienförmig messende Mehr - Frequenzecholotverfahren in mehreren Untersuchungskampagnen in tidebeeinflussten Schlickrevieren eingesetzt und die Untersuchungsverfahren sowie Messergebnisse miteinander verglichen. Zur Verifizierung und Optimierung der Grenzwerte für die Festlegung der Nautischen Sohle sowie für die Übergangsbereiche vom Wasser zur Schlicksuspension (Fluid Mud) und Schlicksuspension (Fluid Mud) zur festen Schlicksohle (siehe Bild 3) wurden Fahrversuche durchgeführt. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst. Weitere Einzelheiten können den im Literaturanhang angegebenen Gutachten entnommen werden.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Geotechnische und rheologische Vergleichsuntersuchungen an Schlick aus dem Blexer Bogen in Klappschuten (siehe [3] und [4])

Um rheologische und geotechnische Untersuchungsergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden im Juni 1999 Vergleichsmessungen in mit Schlick aus dem Blexer Bogen gefllten Schuten unter gleichen Randbedingungen durchgeführt (siehe [3]). Dabei kamen die bisher verwendeten geotechnischen Untersuchungsverfahren und neu konzipierte rheologische ViskositÄtssonden zum Einsatz. Aus den sog. Schutenversuchen erwies sich die „Nautisonde“ von Consulting Dr. Dasch (siehe Bild 7) u. a. wegen der feinen Auflösung als eine gute Alternative zur bisher in der Praxis eingesetzten Dichte- (Isotopen-) sonde. Mit den Messpaddeln der Nautisonde wird eine Scherbeanspruchung im Schlick erzeugt und gemessen. Diese Scherbeanspruchung ist übertragbar auf eine Schiffsdurchfahrt 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

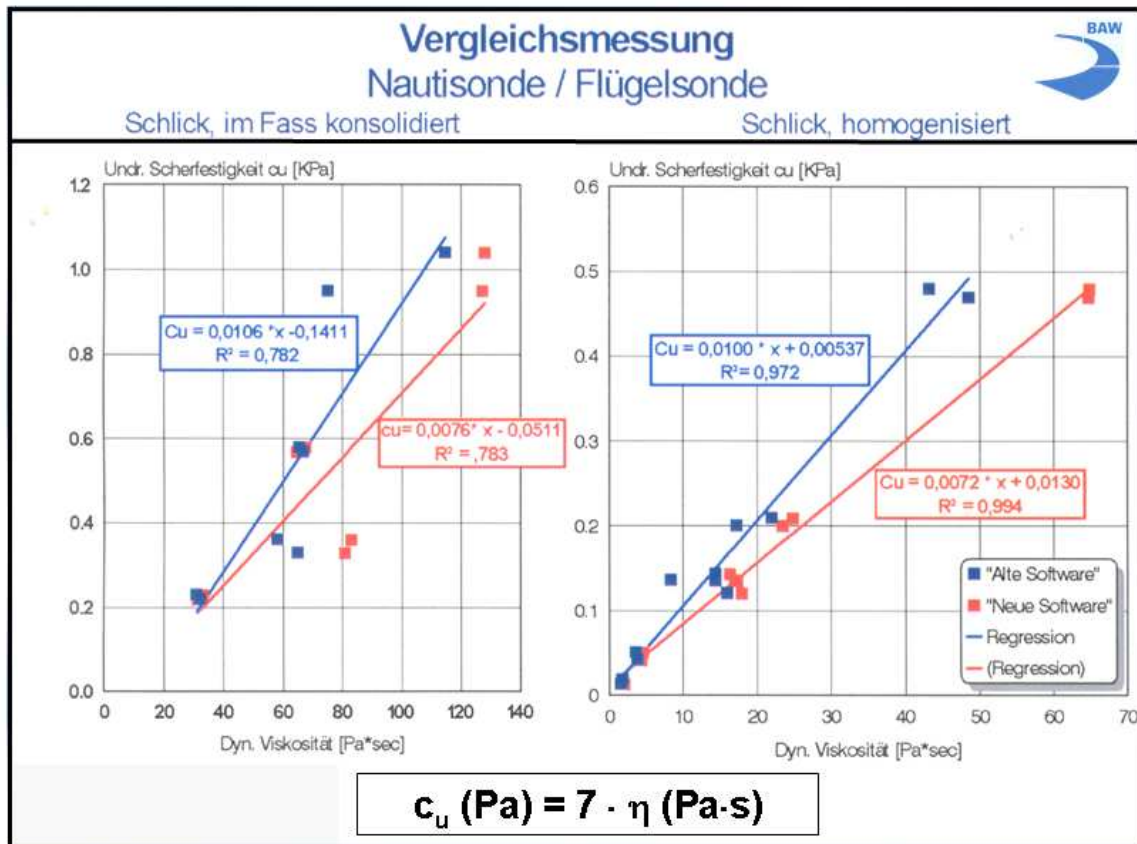
Rotations - Rheometern. Über korrelative Beziehungen ergibt sich der rheologische Parameter Viskosität  $\eta$  in Pa·s.



**Bild 7** Nautisonde

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 (siehe [5]). Es ergab sich ein korrelativer Zusammenhang zwischen der undrännierten Scherfestigkeit  $c_u$  in Pa und der Viskosität  $\eta$  in Pa·s von:

$$c_u \cong 7 \cdot \eta \quad (\text{siehe Bild 8})$$

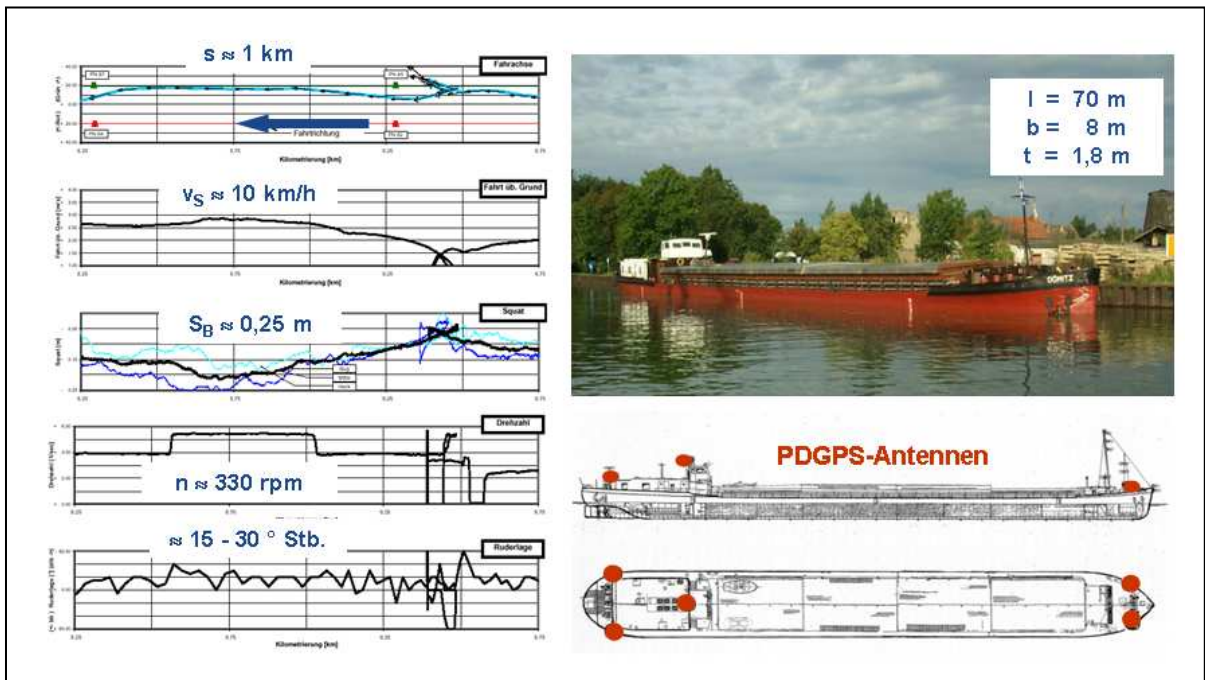


**Bild 8** Korrelativer Zusammenhang zwischen undräierter Scherfestigkeit  $c_u$  und Viskosität  $\eta$  aus Vergleichsuntersuchungen an Schlickern unterschiedlicher Dichte [5]

## 6.2 Nautische Sohle in der Moderortrinne (siehe [6], [7], [8])

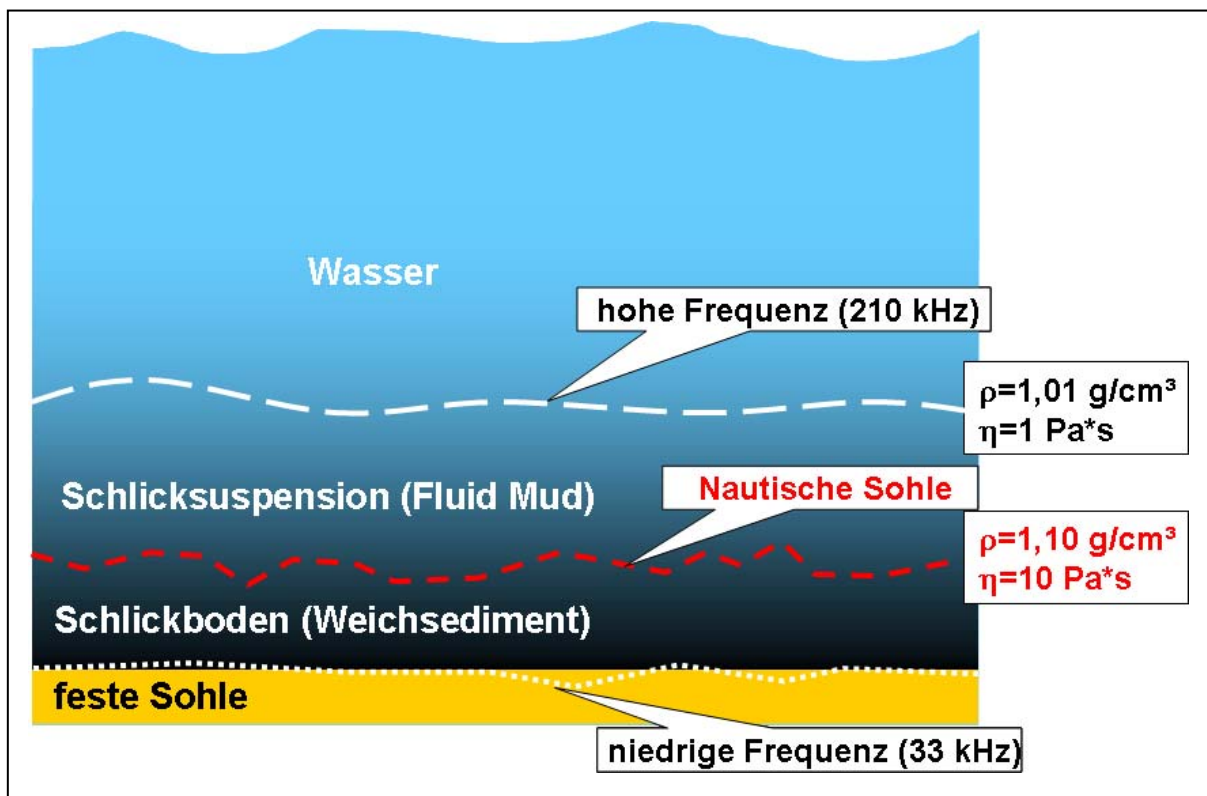
Zur Untersuchung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne wurden im September 1999 Zwei- und Mehr - Frequenzechoverfahren, sowie geotechnische und rheologische Untersuchungsverfahren eingesetzt (siehe [6]). Im Ergebnis der Vergleichsuntersuchungen wurden die einzelnen Untersuchungsverfahren bewertet und Aussagen zur Nautischen Sohle abgeleitet. Aussagen zum Manövrierverhalten von Schiffen mit 2,50 m Tiefgang waren eindeutig nicht möglich.

Im September 2000 wurden in der Moderortrinne deshalb zur Quantifizierung der hydrodynamischen Abhängigkeiten zwischen Schiff und Wasserstraße sowie zur Verifizierung der geotechnischen und rheologischen Grenzwerte zur Ermittlung der Nautischen Sohle in situ - Fahrversuche verbunden mit umfangreichen Messungen durchgeführt (siehe [7] und [8] sowie Bild 9).



**Bild 9** Fahr-dynamische Parameter aus Fahrversuchen in der Moderortrinne [7]

Im Ergebnis wurden Grenzwerte für die Nautische Sohle in der Moderortrinne bei einschiffigem Verkehr mit 2,50 m Tiefgang festgelegt (siehe Bild 10).



**Bild 10** Geotechnische Definitionen zur Nautischen Sohle in der Moderortrinne [8]



### 6.3 Nautische Sohle im Blexer Bogen (siehe [9])

Am 9. und 10. April 2001 erfolgten im Fahrwasser des Blexer Bogens Vergleichsuntersuchungen zwischen dem radiometrischen Dichtemessverfahren mit der Isotopsonde in Verbindung mit dem Zwei - Frequenzecholotverfahren der WSV, dem punktuellen rheologischen Messverfahren der Nautisonde von Consulting Dr. Dasch und dem Sedimentecholot der Fa. Innomar (siehe Bild 11). Neben dem Vergleich der Messverfahren und -ergebnisse waren von den beteiligten Ingenieurbüros Aussagen zur Nautischen Sohle zu machen. Zusätzlich war die Eignung der Messverfahren für Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s und größeren Wassertiefen (> 10 m) nachzuweisen.



**Bild 11** Blexer Bogen, Weser km 62 bis km 64,5 mit eingetragenen Untersuchungsbereichen (Testfelder) [9]

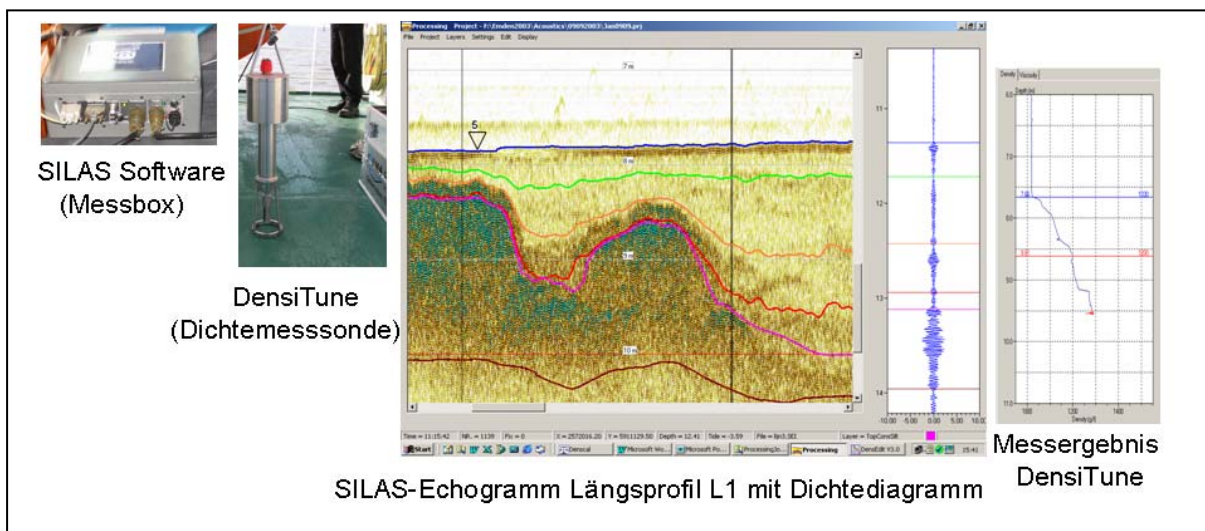
Im Ergebnis war die Nautisonde in Verbindung mit dem linienförmig messenden Sedimentecholot für die Verhältnisse im Blexer Bogen die aussagefähigsten Messverfahren zur Ermittlung der Nautischen Sohle. Alle Messverfahren zeigten an, dass am Gewässergrund des Blexer Bogens im Sinne der geotechnischen Definitionen zur Nautischen Sohle (gemäß Bild 3) „vergleichsweise fester Schlick“ anstand. Die üblicherweise vorhandene Sedimentschichtung (Wasser - Schlicksuspension (Fluid Mud) - Schlickboden (Weichsediment) - feste Sohle) wurde dort nicht festgestellt. Die zum Zeitpunkt der Messungen angetroffenen Schlickverhältnisse waren nach der Definition der Nautischen Sohle nicht schiffbar.

#### 6.4 Nautische Sohle in der Ems km 47,3 bis km 48,1 (siehe [10])

Um den Stand der Technik zur messtechnischen Erfassung der Nautischen Sohle im Rahmen von regulären Fahrwasserpeilungen in der Ems zu beurteilen, wurden vom 08.09. bis 10.09.2003 umfangreiche Vergleichsmessungen durchgeführt. Hierfür wurden vier Systeme ausgewählt, die in den letzten Jahren für diese Aufgabenstellung angepasst oder neu entwickelt wurden. Die Vergleichsuntersuchungen erfolgten in der Ems von km 47,3 bis km 48,1 in Zusammenarbeit zwischen WSA Emden, WSA Cuxhaven, BAW-DH und verschiedenen Ingenieurbüros. Zusätzlich sind während der Vergleichsmessungen punktuell tiefenprofilierende Messsonden zur Erfassung geotechnischer und rheologischer Kenngrößen eingesetzt worden. Um die Ergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren miteinander vergleichen zu können, wurden von der BAW-DH einheitliche Grenzwerte und Definitionen festgelegt, die allen Auswertungen zugrunde zu legen und von allen beteiligten Ingenieurbüros und Firmen darzustellen waren.

Die Vergleichsuntersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass das linienförmige Verfahren der Fa. General Acoustics und das kombinierte Messverfahren aus punktueller und linienförmiger Messung der Fa. STEMA die geeignetsten Verfahren im Emsrevier sind. Die Ergebnisse wurden in [10] beschrieben und beim WSA Emden in einer Präsentation vorgestellt. Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen wurden außerdem am 7. Dezember 2004 auf dem gemeinsamen Workshop der Hafentechnischen und Deutschen Hydrographischen Gesellschaft vorgestellt [22].

Die Messgeräte und die Software des Detektionsverfahrens der Fa. STEMA (siehe Bild 12) wurden beim WSA Emden in 2005 beschafft. In 2005 und 2006 konnte mit diesem Detektionsverfahren der Baggereinsatz weiter optimiert werden.



**Bild 12** SILAS und DensiTune Verfahren der Fa. STEMA [10]

## **6.5 Nautische Sohle in den Vorhäfen der Schleuse Brunsbüttel (siehe [11], [12])**

In 2003 wurde die Viskosität von Schlick zu verschiedenen Zeitpunkten (Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter) bei unterschiedlichen Biomassenanteilen untersucht. Dabei sollte der Einfluss von Biomasseänderungen auf die Viskosität, Dichte und Scherfestigkeit von Schlick ermittelt werden. Weiterhin sollte geprüft werden, ob die in situ Festigkeit des Schlicks sich jahreszeitbezogen ändert. Im Ergebnis war der biologische Einfluss auf die Sedimentkonsistenz messbar, jedoch ohne nennenswerten Einfluss auf die Eigenschaften des Schlicks im Hinblick auf die Nautische Sohle (siehe [12]).

In den Wasserstraßen und Vorhäfen sind in der Regel unterschiedliche Sandgehalte im Schlick vorhanden. Zunehmender Sandgehalt erhöht die Dichte, die undrained Scherfestigkeit und Viskosität im Schlick und ist somit von besonderem Interesse für die Festlegung der Nautischen Sohle. Sandfreie bzw. -arme Schlicke – wie im Emden Hafen – zeigen geringere Festigkeitsentwicklungen infolge Eigenkonsolidation, lassen sich vergleichsweise einfach und nachhaltig resuspendieren und sind daher im Hinblick auf die Nautische Sohle günstiger zu beurteilen.

Im Rahmen der Nassbaggerarbeiten in den Vorhäfen der Schleuse Brunsbüttel wurden zu verschiedenen Zeitpunkten von 2002 bis 2006 systematisch an repräsentativen Schlickproben die Sandgehalte untersucht. Die Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass abhängig von wasserbaulichen Randbedingungen (z. B. Strömungs-, Abflussbedingungen, Turbulenzen infolge Schifffahrt), Sandanteile zwischen 5 % und 20 % vorhanden sind, die teilweise sogar bis zu 40 % betragen können. Durch die schwankenden und vergleichsweise hohen Sandgehalte kann in diesem Revier auf Baggerungen nicht verzichtet werden.

## **6.6 Sedimentkonditionierung im Emden Fahrwasser zwischen km 44,5 und km 45,0 (siehe [13])**

Im Emden Hafen wird seit Jahren die Sedimentkonditionierungsmethode erfolgreich angewendet (siehe [14], [15]). Dabei wird der auf der Hafensohle anstehende Schlick in den offenen Laderaum eines Laderaumsaugbagger gepumpt, mit Sauerstoff belüftet und über einen geschlossenen Rohrkreislauf wieder auf die Hafensohle zurückgepumpt und dabei wieder in Suspension gebracht. Durch die rheologischen Schlickeigenschaften wird der Schlick verflüssigt und ist für die nautischen Hafenbedingungen durchfahrbar. Über die Zeit nimmt der Schlick jedoch wieder eine feste Bodenstruktur an, so dass der Prozess kontinuierlich zu wiederholen ist. Da der konditionierte Schlick jedoch im Hafenbecken verbleibt, ist keine Baggertgutverbringung erforderlich.

Die Eignung dieses Konditionierungsverfahrens wurde im Jahr 2009 in einem Pilotversuch zwischen dem WSA Emden und der Fa. Sediment Management Consulting GbR durchgeführt. Die BAW war im Rahmen der Ergebnisauswertung einbezogen (siehe [16]).

Der Pilotversuch ergab keine eindeutigen und widerspruchsfreien Ergebnisse. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Methode technisch in der Lage ist, junge und alte Sedimente aufzunehmen (zu baggern) und der Gewässersohle in verflüssigter Zustandsform wieder zurückzuführen. Es ist deshalb vorgesehen, auf der Basis dieser Erkenntnisse aus dem Pilotversuch einen optimierten Versuch mit ergänzendem Monitoring durchzuführen (siehe [17]).

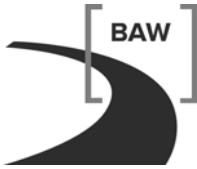
## **7 Schlussfolgerungen**

Die Festlegung der Nautischen Sohle aus geotechnischer Sicht ist von den geotechnischen und rheologischen Eigenschaften im Schlick (Fluid Mud) abhängig. Die bisher festgelegten revierspezifischen Grenzwerte wurden bei Fahrversuchen in der Moderortrinne und Vergleichsuntersuchungen in verschiedenen Schlickrevieren bestätigt. Eine Optimierung bei der Bestimmung der Nautischen Sohle ist jedoch durch die technische Weiterentwicklung der linienförmigen Mehr - Frequenzecholotverfahren und punktuellen Untersuchungsverfahren zu erwarten.

Die Eignung neuer Untersuchungsmethoden sollte durch in situ Vergleichsuntersuchungen mit bereits vorhandenen und bewährten Untersuchungsverfahren erfolgen. Dafür sind Fahrversuche in den jeweiligen Schlickrevieren erforderlich und durch Schlickprobenentnahmen sowie geotechnischen und rheologischen Laborversuchen zu begleiten.

Im Rahmen dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhabens war vorgesehen, das beim WSA Emden für die Ems eingeführte Detektionsverfahren der Fa. STEMA in anderen Schlickrevieren wie z. B. Vorhäfen Brunsbüttel einzusetzen und vergleichende Messungen mit den herkömmlichen WSV – Zwei - Frequenzecholotverfahren durchzuführen. Diese Messungen sollten durch Probenentnahmen und Laborversuche begleitet werden. Ebenfalls war vorgesehen, diese Untersuchungen im unterwasserseitigen Vorhafen der Schleuse Herbrum in Verbindung mit alternativen Echolotverfahren durchzuführen.

Wegen fehlender Kapazitäten in den Wasser- und Schifffahrtsämtern und fehlender Schlickvorkommen an den geplanten Messterminen wurden die Messungen und Untersuchungen mehrfach verschoben und bisher nicht durchgeführt. Deshalb erfolgten in den Jahren 2007 bis 2009 keine nennenswerten Arbeiten im Rahmen des FuE-Projektes.



Da der zeitliche Umfang und feste Termine für weiterführende Untersuchungen nicht festgelegt werden können, wird das FuE-Vorhaben mit dem derzeitigen Bearbeitungsstand abgeschlossen.

Bundesanstalt für Wasserbau

Hamburg, den 08. März 2011

Im Auftrag

Bearbeiter

(Dipl.- Ing. Eißfeldt)

(Dipl.- Ing. Liebetruht)

## Literatur

- [1] Rechlin, D. Bestimmung der Nautischen Tiefe in Hauptschlickgebieten.  
HANSA – Schifffahrt-Schiffbau-Hafen-133. Jahrgang, 1996 Nr. 7
- [2] PIANC 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)
- [3] Eißfeldt, F.P. Nautische Sohle im Blexer Bogen, Geotechnische und rheologische Vergleichsuntersuchungen, BAW 99513773, Febr. 2000, unveröffentlicht
- [4] Pietsch, M. Vergleichsuntersuchungen an Schlick – Schutenversuche Blexer Bogen – BAW Laborbericht 016 vom 18. August 1999, unveröffentlicht
- [5] Pietsch, M. Festigkeitsuntersuchungen am Schlick - Vergleich der Messungen mit der Nautisonde und der undrännierten Scherfestigkeit ermittelt mit der Laborflügelsonde, BAW Laborbericht 017 vom 02. November 2000, unveröffentlicht
- [6] Liebethuth, F. Moderortrinne - Stellungnahme zu den Untersuchungen zur Nautischen Sohle am 14. und 15. September 1999, BAW 99513777, März 2000, unveröffentlicht
- [7] Uliczka, K. Moderortrinne - 1. Teilgutachten zur Ermittlung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne, Fahrversuche zur Schiffsdynamik, BAW 0050210007 vom Juli 2001, unveröffentlicht  
Maushake, Ch.
- [8] Liebethuth, F. Moderortrinne - 2. Teilgutachten zur Ermittlung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne - Geotechnische Stellungnahme zu den Fahrversuchen am 5. und 6. September 2000, BAW 99513777 vom 07. März 2002, unveröffentlicht
- [9] Liebethuth, F. Ermittlung der Nautischen Sohle im Schlick Blexer Bogen – Weser km 62 bis km 64,5; BAW 99513773 vom 27. Mai 2002, unveröffentlicht
- [10] Liebethuth, F. Ermittlung der Nautischen Sohle – Ems km 47,3 bis km 48,1 - Stellungnahme zu den geotechnischen, rheologischen und Echolot - Vergleichsuntersuchungen vom 08. bis 10. Sept. 2003, BAW 0250110107 vom März 2004, unveröffentlicht
- [11] Liebethuth, F. Vorhäfen Schleuse Brunsbüttel - Stellungnahme zu den Untersuchungen zur Nautischen Sohle am 12. und 13. März 2001, BAW 99513773 vom Nov. 2001, unveröffentlicht
- [12] Greiser, N. Bestimmung der Viskosität von Schlick im Schleusenhafen von Brunsbüttel bei unterschiedlichen Biomasseanteilen, Dr. Greiser und Partner, Abschlussbericht vom 01. September 2005  
Lindner, M.
- [13] Greiser, N. Konditionierung konsolidierter Sedimente in der Ems zwischen km 44,5 und km 45,0 zur Verbesserung der nautischen Eigenschaften – Ergebnisse der Baggertests und Begleituntersuchungen - vom 30. März 2010  
Wurpts, R.
- [14] Wurpts, R. 15 Jahre Erfahrung mit fluid mud – Bestimmung der nautischen Sohle durch rheologische Parameter, Teil 1 in HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen – 140 Jahrgang – 2003 – Nr.9
- [15] Wurpts, R. 15 Jahre Erfahrung mit fluid mud – Bestimmung der nautischen Sohle durch rheologische Parameter, Teil 2 in HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen – 140 Jahrgang – 2003 – Nr.10

- [16] Liebethuth, F.           Stellungnahme der BAW zum Bericht der Fa. Sediment Management Consulting GbR - Konditionierung konsolidierter Sedimente in der Ems zwischen km 44,5 und km 45,0 zur Verbesserung der nautischen Eigenschaften – vom 01. Juli 2010
- [17] Krebs, M.               Stellungnahme des WSA Emden und der WSD Nordwest zum Pilotversuch im Emden Fahrwasser mit Unterstützung der Fa. Sediment Management Consulting GbR vom 28. Oktober 2010  
Meyer, H.
- [18] Eißfeldt, F.P.;        Geotechnische und rheologische Untersuchungen zur Nautischen Sohle im Revier der Außenweser. Vortrag beim Sprechtag des Fachausschusses „Nassbaggertechnik“ der HTG in Bremerhaven am 28. November 2000  
Pietsch, M.
- [19] Eißfeldt, F.P.;        Geotechnische und rheologische Untersuchungen zur Nautischen Sohle im Revier der Außenweser, HANSA – Schifffahrt – Schiffbau - Hafen, 138. Jahrgang, 2001 Nr. 6  
Pietsch, M.
- [20] Liebethuth, F.        Problematik der Nautischen Tiefe in Fahrwassern mit Schlickuntergrund - Empfehlungen für die Praxis. BAW-Kolloquium - Geophysikalische Verfahren zur Baugrunderkundung unter der Gewässersohle, Hannover am 06. Mai 2003
- [21] Liebethuth, F.        Untersuchungen zur Nautischen Sohle, Mitteilungsblatt der BAW Nr. 86 vom  
Eißfeldt, F.P.            Dezember 2003
- [22] Liebethuth, F.        Vergleichsuntersuchungen zur Sedimenterkundung in der Ems. Vortrag beim  
1. Gemeinsamen Workshop der HTG und der DHyG in Hamburg am 07.  
Dezember 2004
- [23] Uliczka, K.            On the behavior of sea-going ships in muddy fairway areas – modell investi-  
gations and field measurements. Vortrag beim Workshop on the behaviour of  
Liebethuth, F.            ships in muddy navigation areas, Ghent University & Flanders Hydraulics  
Research, Antwerpen, Belgien am 29. April 2005
- [24] Dasch, W.             Isovisken als Beurteilungsparameter – Über rheologische Untersuchungen  
Wurpts, R.               im Emden Außenhafen, HANSA - Schifffahrt – Schiffbau – Hafen, 136 Jahr-  
gang-1999-Nr.9