

Doppel

**FA. EDEN, VORRATH & PARTNER**

- Physiker und Ingenieure -

Schauenburgerstr. 116

24 118 Kiel

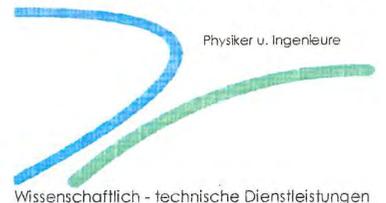
Tel.: 0431/ 5 60 66 66

0431/ 5 60 66 67

Fax: 0431/ 5 60 66 60

E-Mail: [info@E-V-und-Partner.de](mailto:info@E-V-und-Partner.de)

EDEN, VORRATH & PARTNER



**KFKI-Projekt**

**616-84020-MTK-0607**

**ERFASSUNG VON SEDIMENTEN GERINGER DICHTE**

**Bearbeiter:**

**H. EDEN, D. VORRATH, V. MÜLLER**

**Projektleitung:**

**Dr.-Ing. J. Behrens (BfG)**

**Abschlußbericht August 1998**

E 33602 Lit.  
KFKI-P 053



**FA. EDEN, VORRATH & PARTNER**

- Physiker und Ingenieure-

Schauenburgerstr. 116

24 118 Kiel

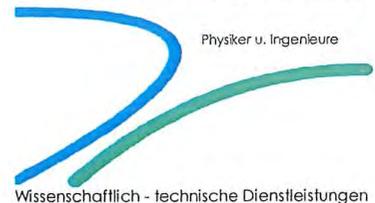
Tel.: 0431/ 5 60 66 66

0431/ 5 60 66 67

Fax: 0431/ 5 60 66 60

E-Mail: [info@E-V-und-Partner.de](mailto:info@E-V-und-Partner.de)

EDEN, VORRATH & PARTNER



## **KFKI-Projekt**

**616-84020-MTK-0607**

# **ERFASSUNG VON SEDIMENTEN GERINGER DICHTE**

**Bearbeiter:**

**H. EDEN, D. VORRATH, V. MÜLLER**

**Projektleitung:**

**Dr.-Ing. J. Behrens (BfG)**

**Abschlußbericht August 1998**

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>	
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	3
<b>2</b>	<b>Meßeinsatz im Emdener Außenhafen und Ems</b>	3
2.1	Meßkonzept und Einsatz	3
2.2	Ergebnisse	4
2.2.1	Ortsfeste Meßergebnisse	4
2.2.2	Profilfahrt von der Ems in den Emdener Außenhafen	5
<b>3</b>	<b>Meßeinsatz auf der Untereibe an der Rhinplatte</b>	6
3.1	Meßkonzept und Einsatz	6
3.2	Ergebnisse	6
3.2.1	Ortsfeste Meßergebnisse	6
3.2.2	Profilfahrten zu verschiedenen Tidezeiten	8
<b>4</b>	<b>Zusammenfassende Darstellung und Diskussion</b>	8
<b>5</b>	<b>Schlußfolgerungen und Ausblick</b>	11
	<b>Danksagung</b>	12
	<b>Schriftenverzeichnis</b>	12
	<b>Anhang</b>	
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	A-2

# 1 Einleitung

Bei der hydrographischen Vermessung von Gewässern, in denen komplexe Suspensions- und Sedimentschichtungen vorkommen, kann beim Einsatz herkömmlicher akustischer Verfahren die Tiefenlage der Gewässersohle nachweislich nicht genau detektiert werden. Insbesondere liegt das technische Vermessungsproblem in der notwendig hochgenauen flächendeckenden Detektion der Tiefenlagen und Mächtigkeiten von Materialschichtungen und deren Grenzflächen.

Ziel des Forschungsauftrages ist es, die durch den Einsatz des neuartigen Echolotverfahrens DSLP (Detection of Sediment-Layers and Properties) der Fa. EDEN, VORRATH & PARTNER vorhandenen neuen Möglichkeiten zur Detektion und Beschreibung von Sedimenten geringer Dichte für die wasserbauliche Praxis aufzuzeigen und nachzuweisen. Dazu wurde dieses interdisziplinäre Verbundprojekt von dem Forschungs- und Technologiezentrum (FTZ) Westküste der Christian – Albrechts - Universität Kiel (Schwerpunkt: Sedimentologie), der Fa. DR. GREISER UND PARTNER (Schwerpunkt: Rheologie, Sedimentologie) und der Fa. EDEN, VORRATH & PARTNER (Schwerpunkt: akustische Meßtechnik) gegründet.

Mit dem DSLP-Verfahren, einem Mehrfrequenz-Echolotsystem zur vollständigen, quantitativen Erfassung der Ultraschallwellen und anschließender mathematisch-physikalischer Bewertung der hochaufgelösten Signale, können unter Einbeziehung von physikalischen, geologischen und biochemischen Sedimentparametern neue Erkenntnisse zur Detektion von Sediment-/Suspensions-Schichtungen gewonnen werden. Durch eine genaue Vermessung und Materialcharakterisierung dieser Schichten kann zukünftig eine höhere Planungssicherheit erreicht werden. Darüber hinaus können für die Gewässerunterhaltung die Sedimentvolumina genauer als bisher bestimmt werden.

Die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Projektpartner erweitert die physikalischen Aussagekraft der hydroakustischen Signale auf das Gebiet der Rheologie und Sedimentologie. Den akustisch detektierbaren Sedimenthorizonten können damit sedimentologische und rheologische Eigenschaften zugeordnet werden.

Dieses interdisziplinäre Meßkonzept wurde in dem durch das BMBF finanzierten Vorhaben im Emdener Außenhafen, Ems und Elbe angewandt. An den Meßorten wurden Suspensions- und Sedimentschichtungen nach Abfolge, Tiefenlage und Mächtigkeiten hochgenau detektiert, akustisch klassifiziert, physikalisch nachgewiesen und durch die unabhängige Probennahme und anschließende Laboranalysen verifiziert.

## 2 Meßeinsatz im Emdener Außenhafen und Ems

### 2.1 Meßkonzept und Einsatz

Im Förderzeitraum 1997 wurde planmäßig ein interdisziplinärer Meßeinsatz im Emdener Außenhafen und auf der Ems (vom 28.10. bis 30.10.1997) vorbereitet, durchgeführt und anschließend ausgewertet. Von Bord des Vermessungsschiffes DELPHIN des Niedersächsischen Hafenamtes wurden parallel Echolotmessungen (mit dem Echolotsystem des DSLP) und Beprobungen der Wassersäule sowie des Untergrundes am jeweiligen Meßort durchgeführt. Die Ortung geschah über DGPS. Fünf unterschiedliche Positionen wurden im Emdener Außenhafen und auf der Ems angefahren (Abb.1).

Diese sind wie folgt:

1. Position A: Vor der Westmole
2. Position B: Emdener Fahrwasser (Ems)
3. Position C: Vorhafen Große Seeschleuse

4. Position D: Nesserlander Schleuse

5. Position E: Höhe Rantzelbrücke

Das Meßschiff konnte bis auf den Meßort im Emdrer Fahrwasser am Kai oder an Dalben festgemacht werden, so daß eine Verdriftung des Schiffes verhindert wurde. Auf diese Weise wurde sichergestellt, daß die Kernrohrproben an den Orten der akustischen Messungen genommen wurden. Schwieriger war die Beprobung vom driftenden Schiff im Emdrer Fahrwasser. Dort konnte die Kernrohrprobe lediglich in der Umgebung der akustischen Messungen genommen werden.

Zeitgleich zu den vorhabenspezifischen Messungen wurden von der Firma EDEN, VORRATH & PARTNER auch Längsprofile von der Ems in den Emdrer Außenhafen mit dem DSLP gemessen und ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Messungen [Eden, Vorrath und Müller 1998a, 1998b] wie auch die Ergebnisse der mit dem auf dem Meßschiff Delphin befindlichen kalibrierten Zwei-Frequenz-Echolotsystem durchgeführten Messungen [Eden, Vorrath und Müller 1998a, 1998b] werden hier bei der Bewertung der gewonnenen Daten aus Vergleichsgründen mit verwendet.

## **2.2 Ergebnisse**

Im folgenden werden die Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens und die Zuordnung zu den Materialanalysen dargestellt. Ferner wird ein mit dem DSLP aufgenommenes und ausgewertetes Längsprofil von der Ems in den Emdrer Außenhafen präsentiert.

### **2.2.1 Ortsfeste Meßergebnisse**

Die Ergebnisse des DSLP-Verfahrens sind in Abb. 2 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung sind die aus ihrer akustischen Klassifikation bestimmten Sedimentschichtungen in ihrer detektierten Abfolge an den fünf Meßorten farblich dargestellt.

Mit dem DSLP-Verfahren werden mehrere Suspensions- und Sedimentschichtungen unterschiedlicher Mächtigkeit detektiert. Die orangefarbenen Schichten S1 bis S4 (Abb. 2) sind Schichtungen hochkonzentrierter Suspensionen (Fluid Mud). Bezüglich ihrer akustischen Eigenschaften sind diese Schichten Kontinua von Streupartikeln unterschiedlicher Konzentration. Die über diesen Schichten liegende Grenzschicht zwischen Wassersäule und der hochkonzentrierten Suspensionsschicht (Schicht S1) wird eindeutig und hochauflösend (3 cm) erfaßt. Es wird mit dem DSLP-Verfahren physikalisch nachgewiesen, daß beiderseits dieser Grenzschicht das Kontinuum sich eindeutig in der flüssigen Phase (Fluid) befindet. Der physikalische Nachweis der flüssigen Phase gelingt über die vollständige und alleinige Beschreibung der akustischen Wechselwirkungsprozesse durch Streutheorien. Das bedeutet, daß die einzige physikalische Wechselwirkung zwischen Schallwellen und Materie die Streuung ist. Der Befund, daß sich diese Suspensionsschichten (S1 bis S4) lediglich durch ihre Rückstreuung unterscheiden deutet auf eine Schichtung des Fluid-Mud mit wachsender Konzentration in Richtung Sohle hin. Eine Ausnahme stellt der Meßort in der Ems dar. Dort kann lediglich eine Suspensionschicht (grüne Schicht in Abb. 2) geringerer Konzentration und geringer Mächtigkeit detektiert werden.

Die unter den Suspensionsschichten vorhandene Grenzschicht zur ersten konsolidierten Schicht (Schicht S5 in Abb. 2) wird mit dem DSLP-Verfahren ebenso eindeutig und hochauflösend (3 cm) erfaßt. Der an dieser Grenzschicht vorhandene Übergang von der flüssigen zur festen Phase wird mit dem DSLP-Verfahren durch das erstmalige Auftreten reflektiver Anteile in der Signalcharakteristik

physikalisch nachgewiesen. Die darunter liegenden konsolidierten Sedimentschichten ( Schicht 5 und folgende in Abb. 2) unterscheiden sich signifikant durch ihr unterschiedliches Reflexions- und Streuverhalten. Dieses ist auf Strukturveränderungen in den Schichten zurückzuführen. Die erste konsolidierte Schicht, mit Ausnahme der Messung in der Ems, wird entsprechend ihrer akustischen Klassifikation als schwach konsolidierte Übergangsschicht detektiert.

Eine weitergehende Klassifizierung der erkannten Suspensions- und Sedimentschichten ist über entsprechende physikalische und sedimentologische Parameter möglich, für die die sedimentologischen und rheologischen Ergebnisse der Kernrohrprobenuntersuchungen herangezogen werden. Diese wurden durch die Fa. DR. GREISER UND PARTNER und das FTZ Westküste durchgeführt.

Aus Verständnisgründen werden diese Ergebnisse hier kurz wiedergegeben. Für die detaillierte Darstellung wird auf die Teilberichte der beiden Partner in dem Verbundprojekt verwiesen .

Die im Emden Hafen detektierten Suspensions-/Sedimentschichten besitzen elastoviskose Eigenschaften. Mit Angabe der Werte für Dichte und Fließgrenze (Übergang vom elastisch/plastischen Verhalten zu einem fluiden Verhalten) werden diese Schichten rheologisch klassifiziert. Der Fluid Mud (unkonsolidiert) unterscheidet sich in der Dichte und in der Fließgrenze signifikant von den darunterliegenden konsolidierten Sedimentschichten (konsolidierter Fluid Mud). Die Fließgrenze des unkonsolidierten Fluid Mud ist um den Faktor 50 bis 600 geringer als in der angrenzenden konsolidierten Sedimentschicht. Die tieferliegenden konsolidierten Sedimentschichten weisen kaum Dichteunterschiede auf. Die Werte ihrer Fließgrenze steigen mit zunehmender Tiefe jedoch deutlich an. Die sedimentologischen Parameter Korngrößenverteilung, Wassergehalt und Glühverlust zeigen für alle Sedimentschichten nahezu identische Werte. Allein die Werte der Fließgrenze liefern für die durch Probennahme erkannten Sedimentschichten ein eindeutiges und reproduzierbares Materialunterscheidungskriterium [Bornholdt und Greiser, 1998].

Der Vergleich der Ergebnisse der Kernrohrprobenuntersuchungen mit der akustischen Schichtklassifikation (Abb. 3 bis Abb. 5) zeigt die Übereinstimmung der Sedimentschichtabfolgen und –mächtigkeiten einschließlich deren Charakterisierung. (Der besseren Übersicht wegen wurden die Farbstufen für die Schichten der Kernproben ähnlich wie bei den akustischen Schichtabfolgen gewählt.)

Die Mächtigkeiten der Fluid Mud Schicht in den einzelnen Kernproben ist weitaus geringer als die mit dem DSLP-Verfahren nachgewiesenen Fluid Mud Mächtigkeiten. Die Ursache liegt in der Technik und Methodik der Probennahme [Ricklefs und Reimers, 1998].

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt weiterhin, daß mit dem DSLP-Verfahren Schichten detektiert und aufgelöst werden können, die sich nicht durch Dichtesprünge erklären lassen. Diese Schichten unterscheiden sich hier signifikant nur in ihren rheologischen Eigenschaften..

### **2.2.2 Profilfahrt von der Ems in den Emden Außenhafen**

Die Abb. 7 zeigt das Ergebnis des DSLP-Verfahrens für ein Längsprofil (Abb. 6) von der Ems in den Emden Außenhafen hinein. Dargestellt sind vier Materialschichtungen und ihre Tiefenlagen. Die erste Schicht A wird als hochkonzentrierte Suspension akustisch klassifiziert. Die Lage ihrer Grenzflächen wird über das gesamte Profil mit einer Tiefenauflösung von 3 cm bestimmt und physikalisch nachgewiesen. Darunter befinden sich die konsolidierten Sedimentschichten (drei wurden ausgewertet), wobei die Schicht B als schwach konsolidiertes Sediment akustisch klassifiziert und physikalisch nachgewiesen wird. Die Tiefenauflösung des DSLP-Verfahrens für die Lage dieser Grenzflächen beträgt ebenfalls 3 cm.

### **3 Meßeinsatz auf der Unterelbe an der Rhinplatte**

#### **3.1 Meßkonzept und Einsatz**

Nach erfolgreichem ersten Meßeinsatz im Emdener Außenhafen und Ems wurde wie vorgesehen im zweiten Förderabschnitt im April 1998 ein weiterer, interdisziplinärer Meßeinsatz auf der Unterelbe an der Rhinplatte (Stromkilometer 669 bis 679) in enger Zusammenarbeit mit dem WSA-Hamburg vorbereitet, am 22.4. durchgeführt und anschließend ausgewertet. Die Sediment- und Sedimenttransportverhältnisse unterscheiden sich signifikant vom ersten Untersuchungsgebiet der Ems bzw. Emdener Außenhafen. Auf der Rhinplatte befinden sich vorwiegend sandhaltige Sedimente, während im Emdener Bereich vorwiegend schlammige Sedimente vorkommen. Die Echolotmessungen (mit dem Echolotsystem des DSLP) wurden von Bord des Vermessungsschiffes Twielenfleth des WSA-Hamburg durchgeführt und parallel zu diesen Echolotmessungen am jeweiligen Meßort Beprobungen der Wassersäule und des Untergrundes zur Sedimentcharakterisierung durchgeführt. Aufgrund der Tidendynamik wurde geplant, daß die Messungen um den Kenterpunkt Flut durchgeführt werden sollten, um ein möglichst lotrechtes Fieren der Kernrohre durch die Wassersäule zu gewährleisten.

Die im Anschluß an die akustischen Messungen vorgenommenen Kernrohbeprobungen stellten sich als schwierig heraus. Das Meßschiff mußte für die Probennahme im Strom über einen Zeitraum von ca. 10 Minuten auf Position gehalten werden. Eine genaue Positionierung des Schiffes bei der Probennahme konnte allerdings nicht gewährleistet werden, so daß die Kernprobenorte lediglich in der Umgebung der akustischen Meßorte lagen (die maximale Abweichung betrug 20 m). Ferner konnte ab der zweiten angefahrenen Position aufgrund des beginnenden Ebbstromes nicht verhindert werden, daß das Kernrohr schräg in das Sediment gefiert wurde.

Zeitgleich zu den vorhabenspezifischen Messungen wurden von der Firma EDEN, VORRATH & PARTNER auch Längsprofile mit dem DSLP gemessen und ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Messungen werden hier bei der Bewertung der gewonnenen Daten aus Vergleichsgründen mit verwendet.

#### **3.2 Ergebnisse**

##### **3.2.1 Ortsfeste Meßergebnisse**

Die Ergebnisse des DSLP-Verfahrens sind in Abb. 8 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung sind die aus ihrer akustischen Klassifikation bestimmten Sedimentschichtungen in ihrer detektierten Abfolge an den vier Meßorten farblich dargestellt.

Mit dem DSLP-Verfahren werden mehrere Suspensions- und Sedimentschichtungen unterschiedlicher Mächtigkeit detektiert. Die orangefarbenen Schichten S1 und S2 (Abb. 8) sind Schichtungen hochkonzentrierter Suspensionen. Bei Position 3 und 4 gibt es eine zusätzliche Suspensionsschicht S0 (gelbe Schicht), die sich signifikant von den unteren Suspensionsschichtungen S1 und S2 unterscheidet. Die Schicht S0 weist im Gegensatz zu den anderen keine signifikante obere Grenzfläche aus. Es handelt sich hierbei um einen Tiefenbereich höherkonzentrierter Suspension. Die Schichten S0, S1 und S2 werden als Kontinua von Streupartikeln akustisch klassifiziert. Der Befund, daß sich die Suspensionsschichten hier lediglich durch ihre Rückstreuintensität unterscheiden, deutet auf eine Konzentrationsschichtung mit wachsender Konzentration in Richtung Sohle hin. Die obere Grenzfläche der Schicht S1 (Grenzschicht zwischen Wassersäule und hochkonzentrierter Suspensionsschicht) wird physikalisch eindeutig detektiert und hochauflösend (Tiefenauflösung 3 cm) erfaßt. Es wird mit dem DSLP-Verfahren physikalisch nachgewiesen, daß sich beiderseits dieser Grenzschicht das Kontinuum in der flüssigen Phase (Fluid) befindet. Der physikalische Nachweis der

flüssigen Phase gelingt über die vollständige und alleinige Beschreibung der akustischen Wechselwirkungsprozesse durch Streutheorien.

Die unter den Suspensionsschichten vorhandene Grenzschicht zur ersten konsolidierten Sohle (Grenze zwischen den Schichten S2 und S3) wird mit dem DSLP-Verfahren ebenso eindeutig und hochauflösend (3 cm) erfaßt. Der an dieser Grenzschicht vorhandene Phasenübergang von „flüssig“ zu „fest“ wird mit dem DSLP-Verfahren durch das erstmalige Auftreten reflektiver Anteile in der Signalcharakteristik physikalisch nachgewiesen. Die darunter liegenden konsolidierten Sedimentschichten (Schicht 3 und folgende) unterscheiden sich signifikant durch ihr unterschiedliches Reflexions- und Streuverhalten. Dieses ist auf Strukturveränderungen in den Schichten zurückzuführen. Die erste konsolidierte Schicht wird entsprechend ihrer akustischen Klassifikation als feste konsolidierte Schicht detektiert. Unterhalb der Schicht S4 sind ausschließlich Reflexionen an den Grenzflächen weiterer Schichten meßbar.

Eine weitergehende Klassifizierung der erkannten Suspensions- und Sedimentschichten ist über entsprechende physikalische und sedimentologische Parameter möglich, für die die sedimentologischen und rheologischen Ergebnisse der Kernrohrprobenuntersuchungen herangezogen werden. Diese wurden durch die Fa. DR. GREISER UND PARTNER und das FTZ Westküste durchgeführt .

Aus Verständnisgründen werden diese Ergebnisse hier kurz wiedergegeben. Für die detaillierte Darstellung wird auf die Teilberichte der beiden Partner in dem Verbundprojekt verwiesen [Dr. Greiser und Partner und FTZ-Westküste].

Die an der Rhinplatte vorhandene hochkonzentrierte Suspension unterscheidet sich signifikant in der Dichte und der Fließgrenze vom darunterliegenden konsolidiertem Sediment. Im Gegensatz zu den Suspensionsschichten in Emden zeigt diese Schicht kein ausgeprägtes elastoviskoses Verhalten und kann als Sandsuspension hoher Konzentration mit eindeutig fluiden Eigenschaften angesprochen werden. Das darunter liegende konsolidierte Sediment zeigt bei einer größeren Dichte, als in Emden gefunden, einen inhomogenen Schichtaufbau sowie ebenfalls ein elastoviskoses Verhalten.

Aufgrund der Probennahmenproblematik, die unter Kapitel 3.1 bereits beschrieben wurde, ist ein direkter Vergleich der Mächtigkeiten der einzelnen Schichten, wie in Emden, nur bedingt möglich, weil nicht gewährleistet werden konnte, daß Meßort und Probenort identisch sind. Zusätzlich muß berücksichtigt werden, daß eine Kernrohrprobe ein punktuelleres Ergebnis liefert, während die akustischen Messungen ein flächen- und tiefenintegriertes Ergebnis liefern.

Betrachtet man die sedimentologischen und rheologischen Analysen, so sind drei Schichtklassen erkennbar, eine oberste Schicht, die sich durch eine geringe Dichte und eine geringe Fließgrenze auszeichnet und unter der eine Schichtklasse mit einer höheren Dichte (mittlere Dichte um  $1,5 \text{ g/cm}^3$ ) und einer deutlich ansteigenden Fließgrenze liegt. Die letzte Schichtklasse, die durch Beprobung noch erreicht wurde, ist eine sehr feste Sandschicht mit einer Dichte um  $1,7 \text{ g/cm}^3$  und einer Fließgrenze, die aufgrund der sehr hohen Festigkeit nicht mehr bestimmbar war. Innerhalb einer Schichtklasse sind die geologisch angesprochenen Schichten z.T. nur einige wenige Zentimeter mächtig und benachbarte Schichten unterscheiden sich z.T. kaum in den angegebenen Werten (Dichte, Fließgrenze, Korngrößenverteilung etc.). Diese beschriebene Schichtklassenabfolge stimmt mit der akustischen Schichtklassifizierung überein. Inwieweit innerhalb einer Schichtklasse Änderungen der sedimentologischen und rheologischen Eigenschaften bei zudem geringen Schichtmächtigkeiten innerhalb einer Sedimentklasse mit der Änderung akustischer Parameter korrelieren, kann auf Grund der Schwierigkeiten bei der Probennahme nicht validiert werden.

### **3.2.2 Profilmfahrten zu verschiedenen Tidezeiten**

Abb. 9 und Abb. 10 zeigen Ergebnisse von gefahrenen Längsprofilen an der Rhinplatte, die mit dem DSLP-Verfahren aufgenommen und ausgewertet wurden. Das Längsprofil der Abb. 9 ist während der Flutphase ca. eine halbe Stunde vor dem Kenterpunkt Flut aufgenommen worden und das Längsprofil der Abb. 10 am Kenterpunkt Flut (Stauwasser). Die Fahrtzeit und damit Meßzeit betrug pro Längsprofil etwa 15 Minuten.

Die Ergebnisprofile unterscheiden sich signifikant von dem Längsprofil im Emdrer Außenhafen. Durch Einsatz des DSLP-Verfahren zu verschiedenen Zeitpunkten der Tide wird eine starke Dynamik beim Transport (horizontal und vertikal) von Sedimenten detektiert. Die erste Schicht der Abb. 9 und Abb. 10 stellt den Bereich starker Aufkonzentration von erodiertem Sediment dar. Da dieses erodierte Sediment turbulent transportiert wird und die akustischen Messungen Momentaufnahmen zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellen, werden die starken Schwankungen erklärbar. Darunter befindet sich eine hochkonzentrierte Sedimentkonzentration. Hier wird mit dem DSLP-Verfahren eine Grenzfläche nachgewiesen und die Schicht als hochkonzentrierte Suspensionsschicht mit starken Streueigenschaften klassifiziert. Die Ergebnisse der akustischen Klassifikation deuten auf eine hochkonzentrierte Sandsuspension hin, auch aufgrund der detektierten starken vertikalen Transporte um den Kenterpunkt (Abb. 10). Am Kenterpunkt sedimentiert die aufkonzentrierte in die Grenzschicht der hochkonzentrierten Suspension. Dabei kommt es zu einer Mächtigkeitserhöhung der hochkonzentrierten Suspension und zu einer Zunahme der Rückstreuintensität, was auf eine Konzentrationszunahme hindeutet. Dieses Ergebnis konnte durch die Probennahmen an den einzelnen Meßorten verifiziert werden. Unterhalb der Suspension befinden sich die konsolidierten Schichten, die akustisch als Schichten mit hoher Festigkeit (sandiges Sediment) klassifiziert werden.

Die Existenz und der Transport der sandhaltigen Suspensionen ist nicht nur Ursache der akustischen hydrographischen Detektionsproblematik herkömmlicher Technologien, sondern auch Ursache dafür, daß sohnnahe profilierende Strömungsmessungen durch Ausnutzung des Dopplereffektes mittels ADCP/ADP's mit großen Meßfehlern behaftet sind. Der Grund liegt in der unterschiedlichen Transportgeschwindigkeit von Sandpartikeln und der umgebenen Wasserphase. Dies wurde durch zahlreiche Untersuchungen der BAW bestätigt [persönl. Mitteilung Herr Maushake, BAW]

## **4 Zusammenfassende Darstellung und Diskussion**

Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse des DSLP-Verfahrens sind die hydrographischen Meßproblematiken beim Einsatz herkömmlicher akustischer Technologien physikalisch erklärbar. Es konnten durch den DSLP-Einsatz neue Erkenntnisse bzgl. der akustischen Detektion erbracht werden und gleichzeitig die neue DSLP-Methodik erfolgreich verifiziert werden.

Die Detektionserkenntnisse zeigen, daß herkömmliche Echolottechnologien (dies betrifft alle auf dem Markt befindliche Systeme, die letztlich alle auf der gleichen Auswertemethodik beruhen) in Suspensions-Sedimentschichtungen zur Detektion der Tiefenlage der Grenzfläche der konsolidierten Sohle nicht geeignet sind. Dies ist aus der Praxis der Gewässervermessung bekannt und konnte hier voll bestätigt werden.

Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen und die neue DSLP-Methodik, die sich fundamental von der herkömmlichen Methodik unterscheidet, zu verstehen, wird im folgenden auf die Detektionsproblematik am Beispiel der vorliegenden Messungen im Emdrer Hafenbereich und Rhinplatte eingegangen.

Je nach Komplexität der Suspensions-Sedimentschichtung kann die Detektionsproblematik sehr unterschiedlich sein. Ursache der Detektionsproblematik ist die orts- und zeitabhängige unterschiedliche Suspensions- und Sedimentzusammensetzung. Die Schallwelle wird beim Durchgang durch die Materialschichten durch unterschiedliche physikalische Prozesse beeinflusst. Es treten frequenzabhängige und frequenzunabhängige Wechselwirkungen auf. Ein frequenzabhängiger Prozeß ist z.B. die Streuung und ein frequenzunabhängiger Prozeß die Reflexion. Wird z.B. ein Echolot mit zwei unterschiedlichen Frequenzen (z.B. 15 kHz und 210 kHz) in einer Suspensions-Sedimentschichtung eingesetzt, so spalten sich die „Tiefenhorizonte“ der einzelnen Frequenzen auf (siehe Abb. 11 rechts). Das bedeutet, daß je nach eingesetzter Frequenz die charakteristischen Tiefensignale (Tiefenhorizonte) in unterschiedlichen Tiefen liegen können. Die charakteristischen Tiefensignale geben entweder an, wo die jeweilige eingesetzte Frequenz ihre höchste gemessene Schallintensität aufweist, oder es wird ab Überschreitung eines bestimmten Intensitätsschwellwertes ein Tiefensignal aufgezeichnet. Die Wechselwirkung in dem Material oder der Materialschichtung, die eine höhere meßbare Intensität und damit ein „Tiefensignal“ hervorruft, kann aufgrund der frequenzabhängigen Streuung je nach eingesetzter Frequenz an unterschiedlichen Stellen auftreten. Das Meßproblem dabei ist, daß die Tiefenhorizonte nicht mit den realen Sedimentgrenzflächen zusammenfallen. Das bedeutet, daß mit herkömmlichen Echoloten nicht eindeutig gemessen werden kann, wo Material-Grenzflächen liegen und ob es sich um eine Suspension oder um ein konsolidiertes Sediment handelt. Das Detektionsproblem wird selbst dann nicht gelöst, wenn an einem Ort eine feste Frequenz eingesetzt wird, deren Tiefenhorizont zufällig mit dem Grenzübergang zur festen Sohle übereinstimmt. Aufgrund des sich örtlich und zeitlich ständig ändernden Suspensions-Sedimentaufbau, und der Zusammensetzung und Abfolge der Schichten gibt es keine feste Frequenz oder Frequenzkombination, die das Detektionsproblem der festen Sohle in einer komplexen Suspensions-Sedimentschichtung löst.

Das akustische Detektionsproblem wird auch dadurch nicht gelöst, daß die Echo- bzw. Schallintensitäten quantitativ gemessen und ausgewertet und z.B. farbig oder als Graustufen dargestellt werden. Auch eine Veränderung der Schallgeometrie, z.B. durch Schallbündelung etc. führt zu keinen weiteren Lösung der Detektionsproblematik, wie oben dargestellt.

Als repräsentatives Beispiel für die Meßproblematik wird in Abb. 11 eine ortsfeste Vergleichsmessung des DSLP mit einem herkömmlichen kalibrierten Zweifrequenzecholots im Emdener Außenhafen gezeigt. Parallel zu dem Meßeinsatz in Emden mit dem DSLP-Verfahren wurde zusätzlich ein an Bord des Vermessungsschiffes DELPHIN des Niedersächsischen Hafenamtes befindliches handelsübliches Vermessungsecholot mit den Frequenzen 15 und 210 kHz eingesetzt (Abb. 11).

Die Abb. 11 zeigt das Ergebnis der akustischen Klassifikation des DSLP-Verfahrens, die Sedimentschichtmächtigkeiten der Kernprobe und das Meßergebnis eines kalibrierten Zweifrequenzecholotsystems (15 kHz und 210 kHz) am gleichen Ort. Es handelt sich um den ersten Meßort im Emdener Außenhafen, der bzgl. DSLP und der Kernprobenergebnisse in Kapitel 2.2.1 vollständig beschrieben wurde.

Die digitalisierten Tiefenhorizonte von 210 kHz und 15 kHz des herkömmlichen Echolots sind aus der Abb. 11 rechts zu entnehmen. Es handelt sich hier um eine ortsfeste Messung. Die Linien stellen ortsfeste Messungen über eine Zeitdauer von ca. 1 Minute dar.

Der Vergleich zeigt eindrucksvoll die beschriebene Meßproblematik herkömmlicher Technologien. Zur Detektion der Lage der obersten konsolidierten Schicht wurde bisher der „Reflexionshorizont“ einer tiefen Frequenz (z.B. 15 kHz, 33 kHz) des verwendeten Echolotsystems herangezogen, wobei die Fragestellung vielfach auf die Angabe der Frequenz selber reduziert wird. Die Unterscheidung und Abgrenzung von hochkonzentrierten Suspensionen zu schwach konsolidierten Übergangsschichten

und stärker konsolidierten Sedimentschichten ist physikalisch bei diesem Verfahren wie beschrieben nicht eindeutig möglich. Deshalb ist das charakteristische Tiefensignal des Zwei-Frequenz-Vermessungsecholotes an dem Meßort nicht stationär. Es kann sowohl deutlich oberhalb als auch deutlich unterhalb der Tiefenlage der existierenden Grenzschicht der konsolidierten Sohle liegen (Abb. 11 rechts). Die Schwankungen der ortsfesten Messungen des herkömmlichen Vermessungsecholotes liegen hier etwa bei 1,0 m. Die Meßgenauigkeit kann je nach Komplexität der Suspensions-Sedimentschichtung bis zu einigen Metern betragen. Auch kann mit herkömmlichen Vermessungsecholoten keine physikalisch begründete Charakterisierung der Eigenschaft „flüssig“ bzw. „fest“ beiderseits erkannter Grenzflächen erfolgen.

An der Rhinplatte ist die Meßproblematik allein durch die hochkonzentrierten und transportierten sandhaltigen Suspensionen begründet. Während im Meßgebiet Emden schwach konsolidierte Übergangsschichten vorkommen, ist die Sohle der Rhinplatte sehr fest mit einer mittleren Dichte um  $1,5 \text{ g/cm}^3$  und sehr sandhaltig und stellt somit zum Wasserkörper einen deutlichen Dichtesprung dar. An diesem Grenzübergang zur festen Sohle wird aufgrund des großen Dichtesprungs eine hohe Schallintensität erwartet und damit die eindeutige Lage der festen Sohle vermutet. Die vorhandene, darüberliegende hochkonzentrierte Sandsuspension erzeugt aber selbst bei tiefen Frequenzen eine so hohe Rückstreuintensität, daß sie aufgrund einer Intensitätsauswertung als feste Sohle gedeutet wird und von der festen Sohle nicht unterschieden werden kann.

In der Praxis macht das Vorhandensein der Sandsuspension sich insofern bemerkbar, daß aufgrund der Streuung bzw. Dämpfung entweder überhaupt keine Echo-Signale mehr empfangen werden, oder die oben beschriebene Meßproblematik zutrifft. Die Schwankungsbreite bei der Tiefenmessung beträgt laut Aussagen des WSA Hamburg bis zu 2,5m.

Die spezielle Methodik der Signalanalyse des DSLP-Verfahrens hingegen erlaubt die eindeutige physikalische Klassifikation von Sediment- und Suspensionschichtungen und damit den eindeutigen physikalischen Nachweis des Phasenüberganges von flüssig zu fest. Die Methodik ist unabhängig von den verwendeten Frequenzen und erlaubt die Detektion von Sediment- und Suspensionsschichtungen mit Dichtegradienten unterhalb der Meßgrenze herkömmlicher akustischer Verfahren. Auf Grundlage der Möglichkeit der physikalischen Klassifikation der detektierten Sedimentschichten mit dem DSLP-Verfahren ist, verglichen mit herkömmlichen Systemen, eine höhere Stabilität der Ergebnisse sowie auch eine wesentlich höhere Tiefenauflösung möglich.

Der Einsatz des DSLP im Emden Außenhafen, auf der Ems und an der Rhinplatte zeigten, daß trotz sehr unterschiedlicher Suspensions-Sedimentzusammensetzung der Grenzübergang vom Wasserkörper zu einer hochkonzentrierten Suspension eindeutig bestimmt und der Nachweis der Materialphase „flüssig“ physikalisch eindeutig nachgewiesen werden konnte. Eine Konzentrationsschichtung innerhalb der hochkonzentrierten Suspension konnte in beiden Fällen ebenfalls detektiert werden. Die für die Gewässerpraxis besonders interessierende Tiefenlage des Grenzübergangs zur festen Sohle konnte in beiden Meßeinsätzen mit hoher Tiefenauflösung eindeutig physikalisch nachgewiesen werden.

Die konsolidierten Sedimentschichten im Emden Außenhafen und auf der Ems, die sich nur eindeutig in der Fließfähigkeit unterschieden, konnten nach Tiefenlagen, Abfolge und Mächtigkeiten hochaufgelöst detektiert werden. An der Rhinplatte korrespondiert die akustische Schichtklassifizierung mit der Schichtklassenabfolge der Probennahme. Ein direkter Vergleich der Mächtigkeiten konnte aufgrund der beschriebenen Probennahmeproblematik nicht durchgeführt werden.

Die Messungen und Auswertungen von Längsprofilen im Emdener Außenhafen, auf der Ems und zu verschiedenen Tidezeiten an der Rhinplatte demonstrieren, daß mit dem DSLP-Verfahren die Tiefenlagen und Abfolgen der Grenzflächen von hochkonzentrierten Suspensionen, der Übergang zur festen Sohle und die Sedimentschichtungen flächendeckend und hochaufgelöst detektiert und physikalisch nachgewiesen werden können. Darüber hinaus konnten Hinweise zur Sedimenttransportdynamik erbracht werden.

## **5 Schlußfolgerungen und Ausblick**

Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand leiten sich bezüglich der Detektion und Erfassung von Sedimenten geringer Dichte folgende Schlußfolgerungen für die Praxis ab:

- 1.) Mit dem DSLP-Verfahren wird die Tiefenauflösung, insbesondere bei Sedimenten geringer Dichte, gegenüber herkömmlichen Echolotverfahren deutlich erhöht.
- 2.) Mit dem DSLP-Verfahren können hochkonzentrierte Sedimentsuspensionen (z.B. Fluid Mud) eindeutig, im Sinne von „eindeutig flüssig“, charakterisiert werden sowie ihre Tiefenlagen und Mächtigkeiten räumlich hochauflösend detektiert werden.
- 3.) Mit dem DSLP-Verfahren wird die Tiefenlage der Grenzschicht zwischen Suspension (flüssige Phase) und erster konsolidierter Sohlschicht hochauflösend detektiert.
- 4.) Die rheologischen Parameter sind für die Klassifikation von Sedimenten geringer Dichte die entscheidenden. Mit dem DSLP-Verfahren werden Sedimentschichtungen aufgrund der Detektion von Strukturänderungen im Material aufgelöst, die sich physikalisch allein durch unterschiedliches rheologisches Verhalten ausdrücken.

Für die Beurteilung der Sicherheit der Schifffahrtswege in Gewässern mit komplizierten Sediment- und Suspensionsschichtungen steht nun dadurch eine Methode zur Verfügung, mit der die Tiefen- und Sedimentverhältnisse eindeutig und räumlich hochauflösend bestimmt werden können.

Mit der flächendeckenden Detektion der Abfolgen konsolidierter Sedimentschichten und schwach konsolidierter Übergangsschichten können wasserbauliche Maßnahmen (auch Sanierungsmaßnahmen) präziser geplant und durchgeführt werden. Durch die Korrelation der Ergebnisse von Kernproben mit den akustischen Ergebnissen können auch Profile physikalischer und sedimentologischer Parameter flächendeckend verfolgt werden. Die dafür notwendige Gewinnung von Kernproben kann unter Verwendung der akustischen Ergebnisse effektiver gestaltet werden.

Aussagen über das zeitliche Verhalten und zur Lagestabilität von Sedimentschichten können durch weitere interdisziplinär getragene Untersuchungskonzepte erarbeitet werden.

## Danksagung

Unserem Projektleiter Herrn VDir. Dr. Behrens (BfG) danken wir für das große Engagement für dieses Projekt und für seine konstruktive Projektleitung.

Für die erfolgreiche Zusammenarbeit danken wir der Fa. Dr. Greiser und Partner, dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Christian-Albrechts-Universität Kiel, dem Niedersächsischen Hafenamts Emden und dem WSA Hamburg.

## Schriftenverzeichnis

**Eden, H.:** Zwischenbericht der Fa. EDEN, VORRATH & PARTNER zum BMBF-Vorhaben ‚Erfassung von Sedimenten geringer Dichte‘ (Förderkennzeichen 616-84020-MTK 0607), Kiel, 1998

**Eden, H.; Vorrath, D.; Müller, V.:** „Neue Verfahren zur Volumen- und Eigenschaftsbestimmung von Sedimenten in Gewässern“, DVWK Fachtagung „Topographie von Fließgewässern und Stauräumen – Aufnahme und Auswerteverfahren“, Neubiberg, 2.-3. April 1998; im Druck

**Eden, H., Vorrath, D., Müller, V.:** „DSLPEcholotverfahren – eine neuartige Technologie im Einsatz auf der Ems“, Tagungsband des 13. Hydrographentages der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft, Papenburg, 8.-10. Juni 1998; Stade, 1998b

**Greiser, N; Bornholt, J.:** Abschlußbericht der Fa. DR. GREISER UND PARTNER zum BMBF-Vorhaben ‚Erfassung von Sedimenten geringer Dichte‘ (Förderkennzeichen 616-84020-MTK 0607); Geesthacht; 1998

**Ricklefs, K.; Reimers, Ch.:** Abschlußbericht des FTZ Westküste der Christian-Albrechts-Universität Kiel zum BMBF-Vorhaben ‚Erfassung von Sedimenten geringer Dichte‘ (Förderkennzeichen 616-84020-MTK 0607); Büsum; 1998

# **Anhang**

**zum Abschlußbericht  
des KFKI-Projekts (616-84020-MTK-0607)**

**ERFASSUNG VON SEDIMENTEN GERINGER DICHTE**

**Bearbeiter:**

**Dipl.-Phys. Hendrik Eden (EDEN, VORRATH & PARTNER)**

**Projektleitung:**

**Dr.-Ing. J. Behrens (BfG)**

## Abbildungsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>Abb. 1:</b> Gebiet des Emdener Hafens mit Angabe der Orte, an denen alle Sedimentkernentnahmen und stationären akustischen Vermessungen der Sedimentschichten mit dem DSLP-Echolotsystems der Fa. Eden, Vorrath & Partner durchgeführt wurden.	<b>A-3</b>
<b>Abb. 2:</b> Ergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) an den Meßorten im Emder Außenhafen und Ems	<b>A-4</b>
<b>Abb. 3:</b> Gegenüberstellung der Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schicht-Klassifikation) und der Ergebnisse der Kernprobenanalysen an den Meßorten (Position A und B) im Emder Außenhafen und Ems	<b>A-5</b>
<b>Abb. 4:</b> Gegenüberstellung der Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schicht-klassifikation) und der Ergebnisse der Kernprobenanalysen an den Meßorten (Position C und D) im Emder Außenhafen	<b>A-6</b>
<b>Abb. 5:</b> Gegenüberstellung der Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schicht-klassifikation) und der Ergebnisse der Kernprobenanalysen am Meßort (Position E) im Emder Außenhafen	<b>A-7</b>
<b>Abb. 6:</b> Schematische Darstellung der Profifahrt in den Emder Außenhafen	<b>A-8</b>
<b>Abb. 7:</b> Beispiel einer Sedimentschichtendetektion des DSLP-Verfahrens auf einem Profil von der Ems in den Emder Außenhafen	<b>A-9</b>
<b>Abb. 8:</b> Ergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) an den Meßorten an der Rhinplatte	<b>A-10</b>
<b>Abb. 9:</b> Beispiel einer Sedimentschichtendetektion des DSLP-Verfahrens auf einem Profil an der Rhinplatte beim Hauptstrom Flut	<b>A-11</b>
<b>Abb. 10:</b> Beispiel einer Sedimentschichtendetektion des DSLP-Verfahrens auf einem Profil an der Rhinplatte beim Kenterpunkt Flut	<b>A-12</b>
<b>Abb. 11:</b> Exemplarisches Beispiel einer Gegenüberstellung der ortsfesten Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens (links), der Kernprobe (mitte) und des herkömmlichen kalibrierten Zwei-Frequenz-Vermessungsecholotes (rechts) im Emder Außenhafen	<b>A-13</b>

# Meßinsatz "Emden" am 29.10.1997

## Lage der Meß- und Probenorte:

- A: "Vor der Westmole"
- B: "Emder Fahrwasser"
- C: "Seeschleuse"
- D: "Nesserländer Schleuse"
- E: "Rantzel-Brücke"

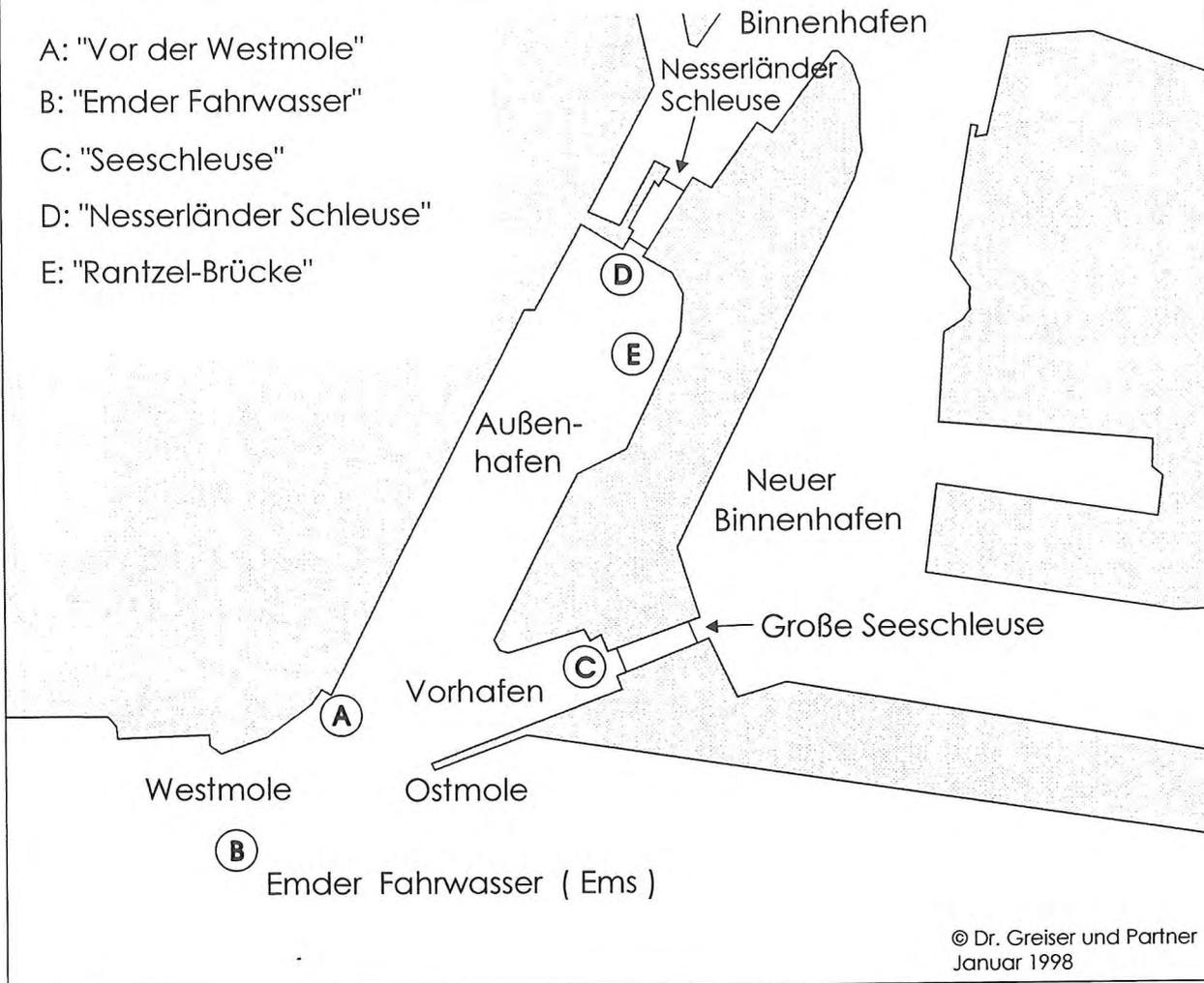


Abb. 1:  
Gebiet des Emdener Hafens mit Angabe der Orte, an denen alle Sedimentkernentnahmen und stationären akustischen Vermessungen der Sedimentschichten mit dem DSLP-Echolot-systems der Firma Eden, Vorrath & Partner durchgeführt wurden.

Abb. 2: Ergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) an den Meßorten im Emdener Außenhafen und Ems

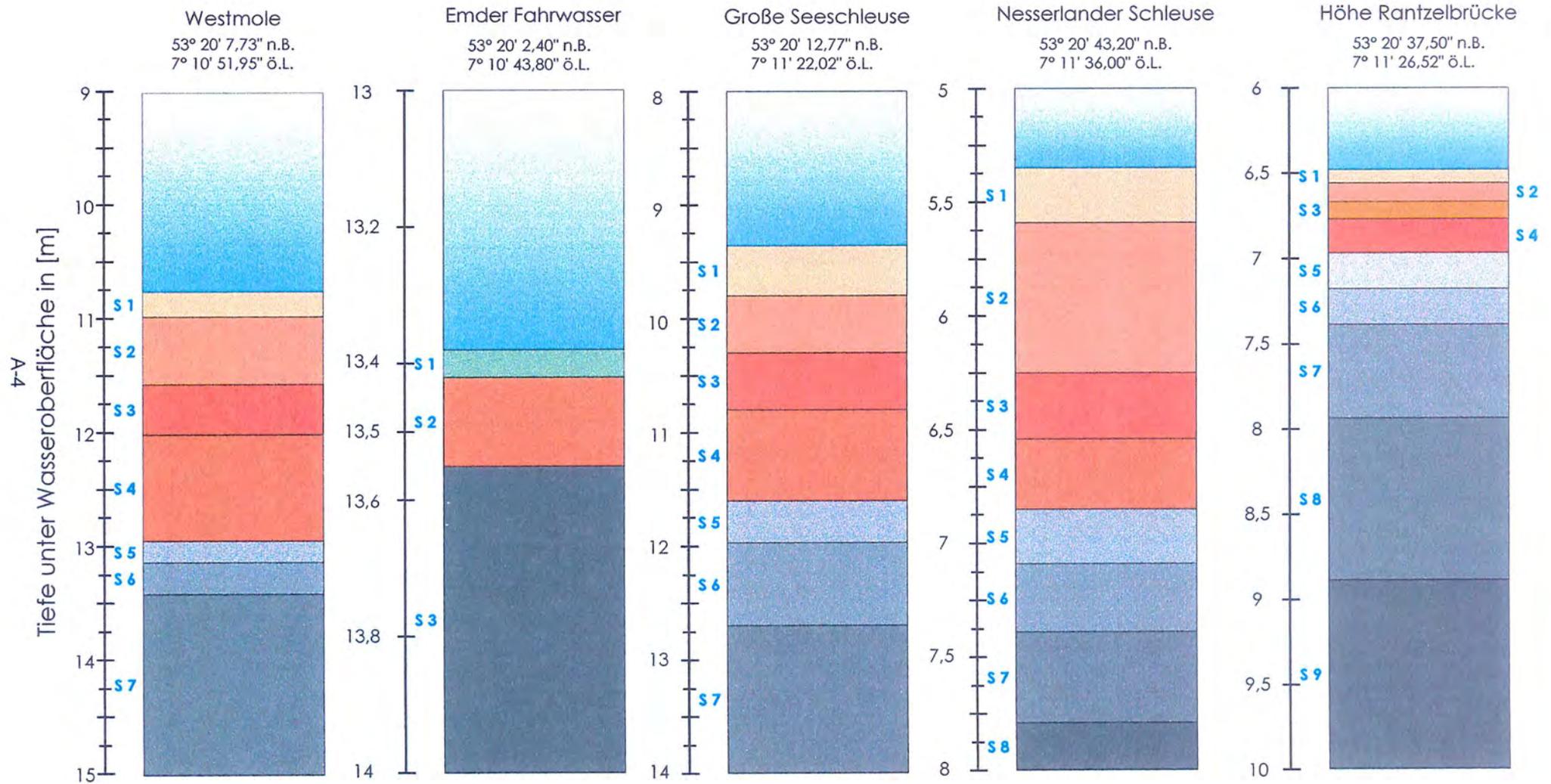


Abb. 3: Gegenüberstellung der Messergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) und der Ergebnisse der Kernprobenanalysen an den Meßorten (Position A und B) im Emdener Außenhafen und Ems

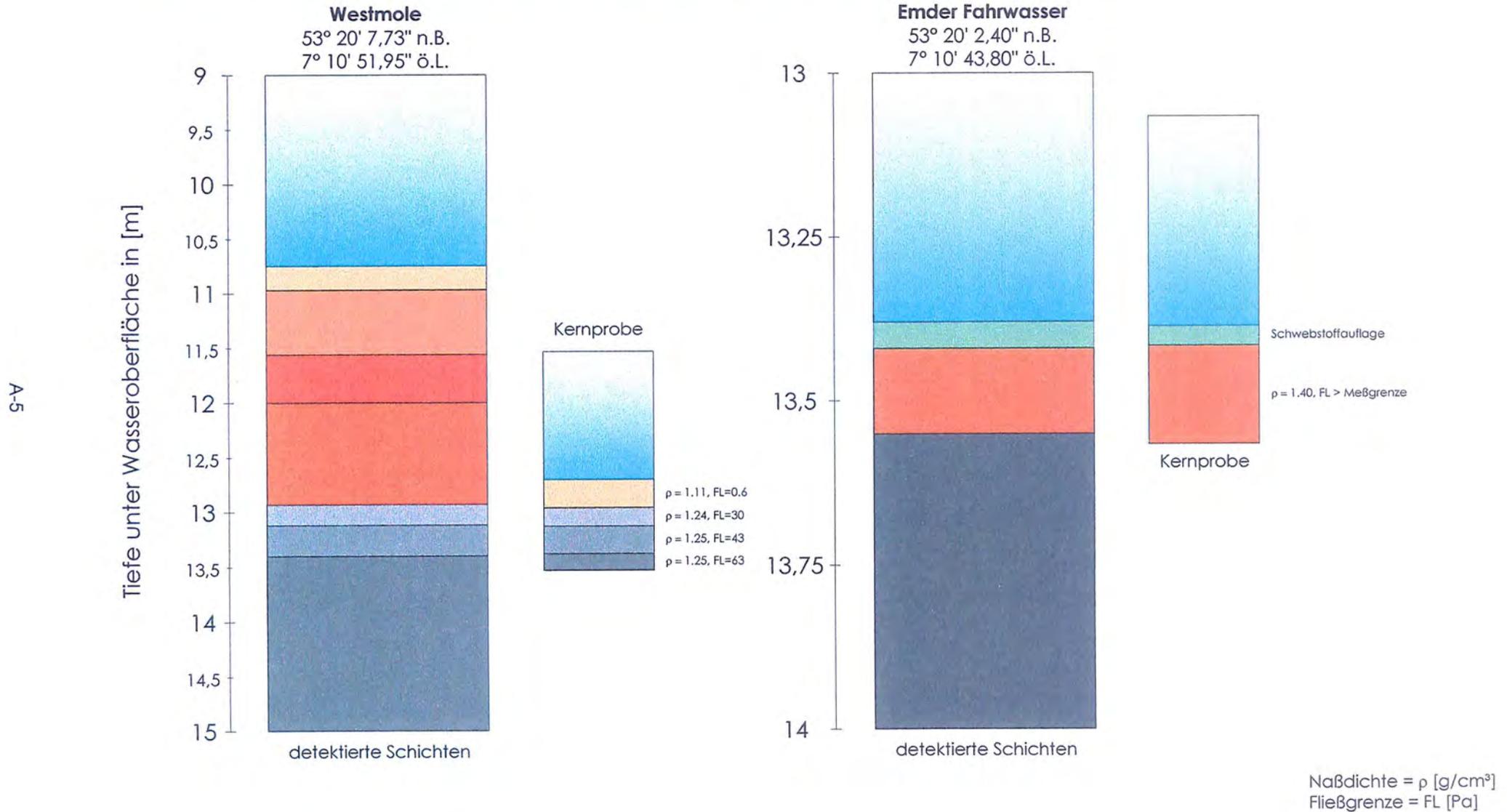


Abb. 4: Gegenüberstellung der Messergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) und der Ergebnisse der Kernprobenanalysen an den Meßorten (Position C und D) im Emden Außenhafen

A-6

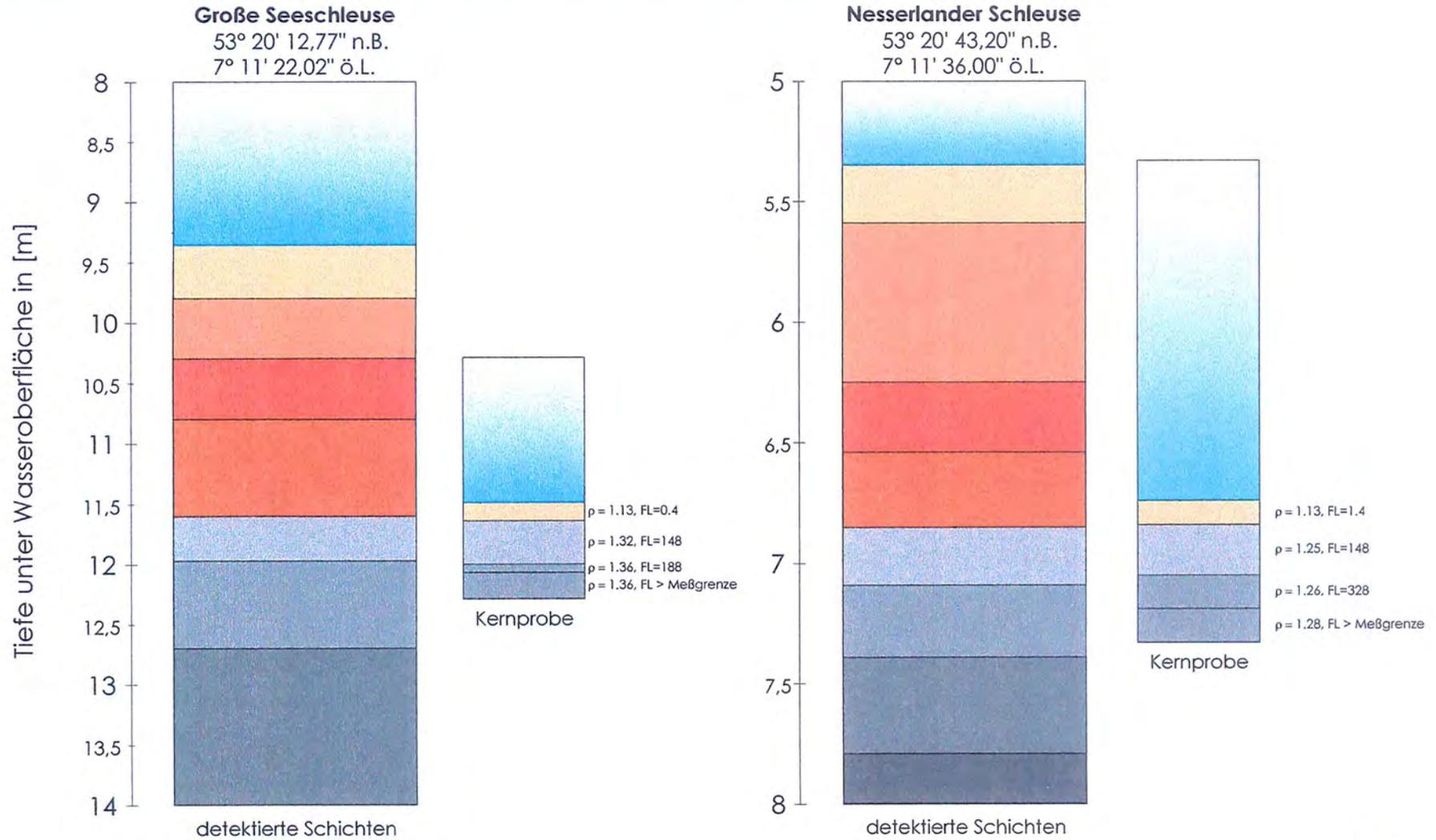
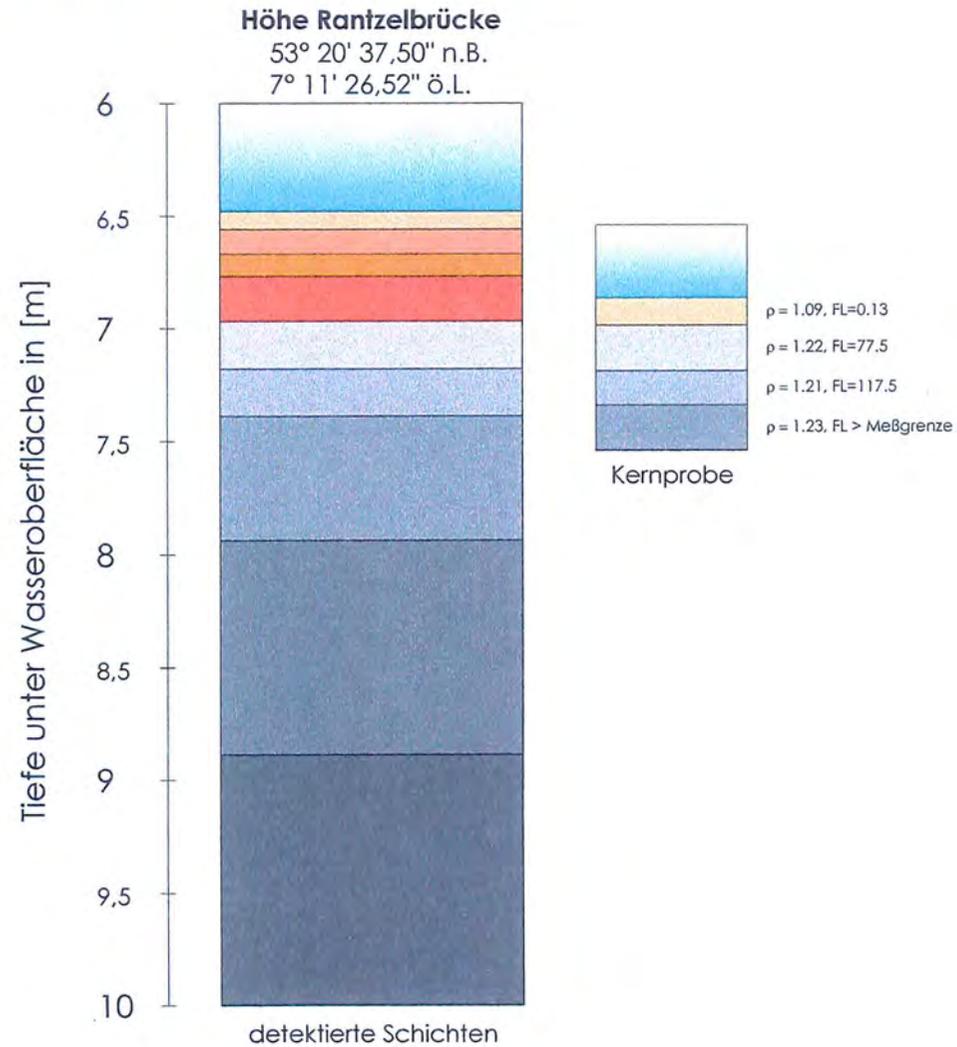


Abb. 5: Gegenüberstellung der Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) und der Ergebnisse der Kernprobenanalysen am Meßort (Position E) im Emdener Außenhafen

A-7



Naßdichte =  $\rho$  [g/cm³]  
 Fließgrenze = FL [Pa]

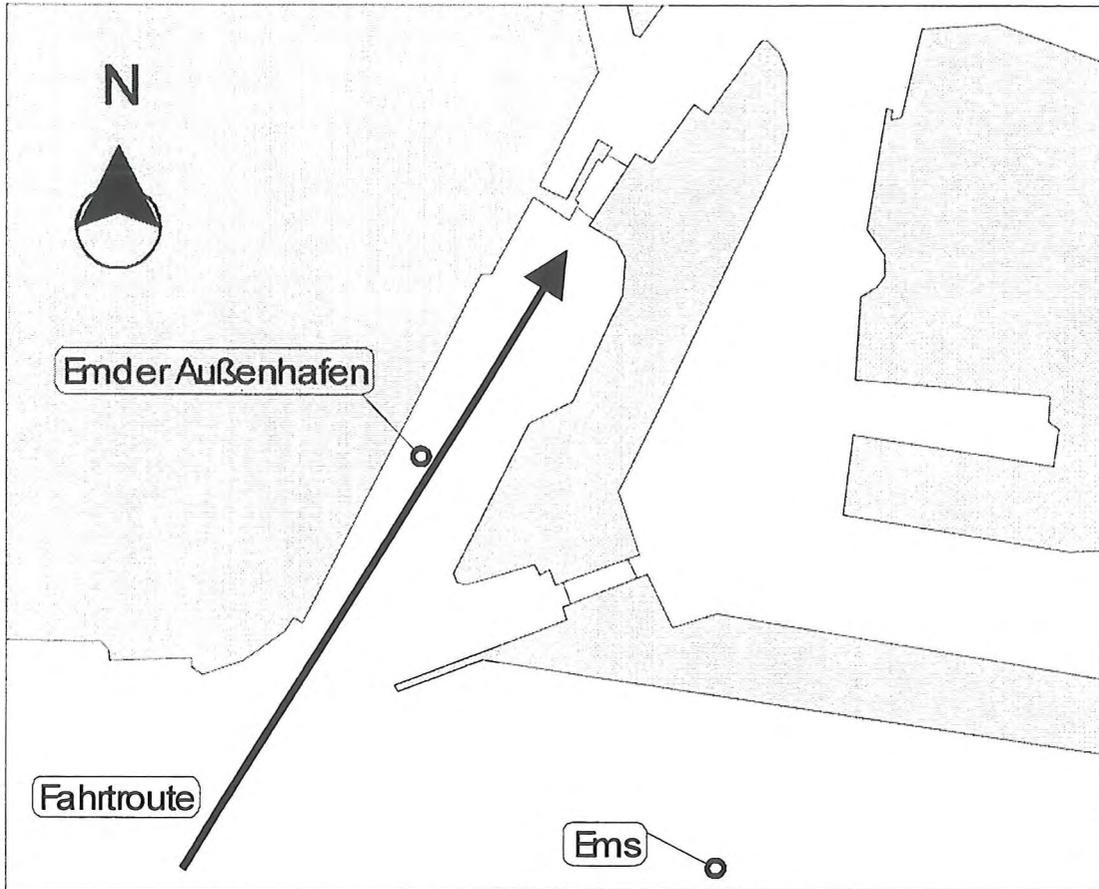


Abb. 6: Schematische Darstellung der Profilfahrt in den Emden Außenhafen

Abb. 7: Beispiel einer Sedimentschichtendetektion auf einem Profil von der Ems in den Emdener Außenhafen

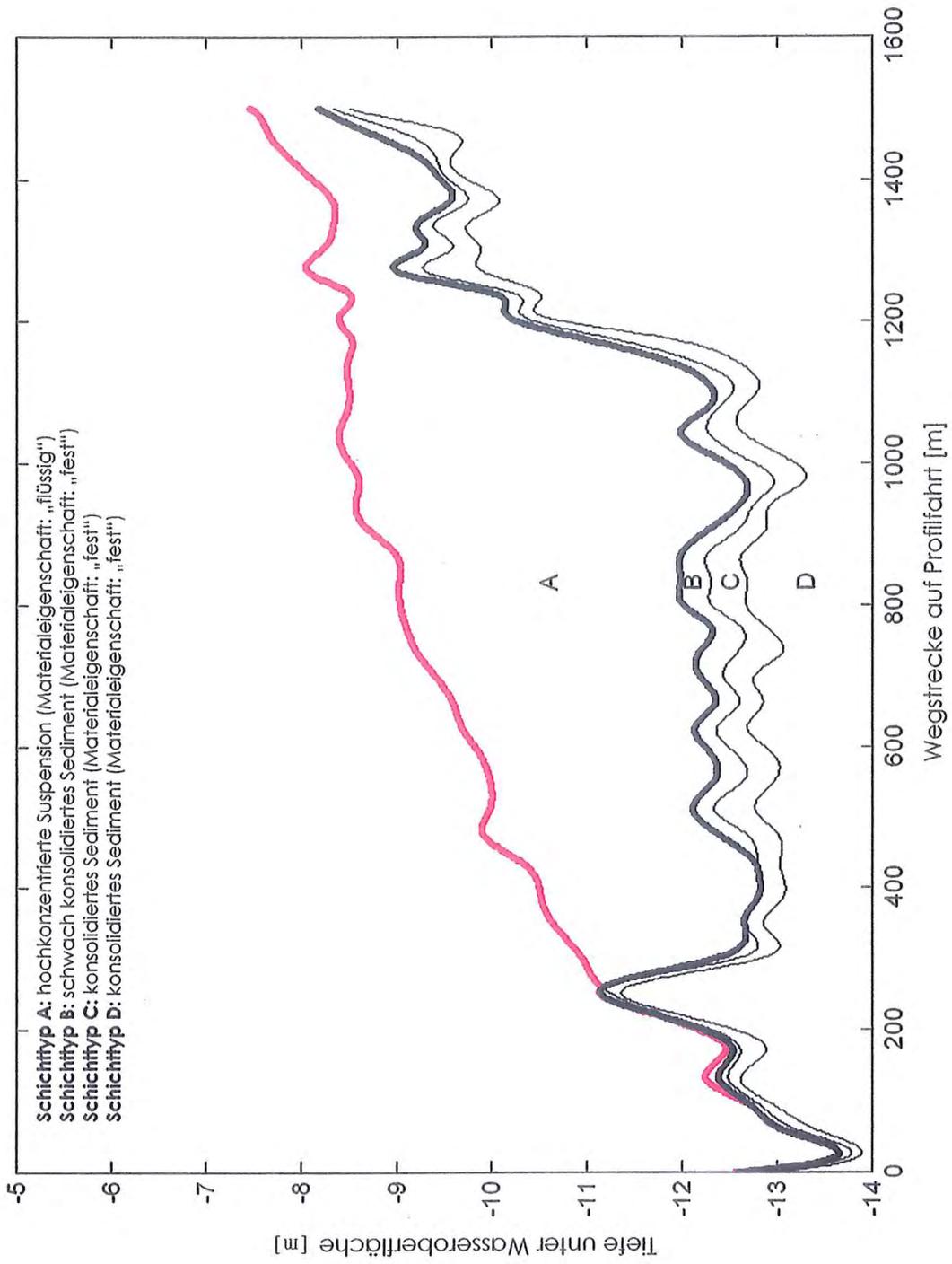
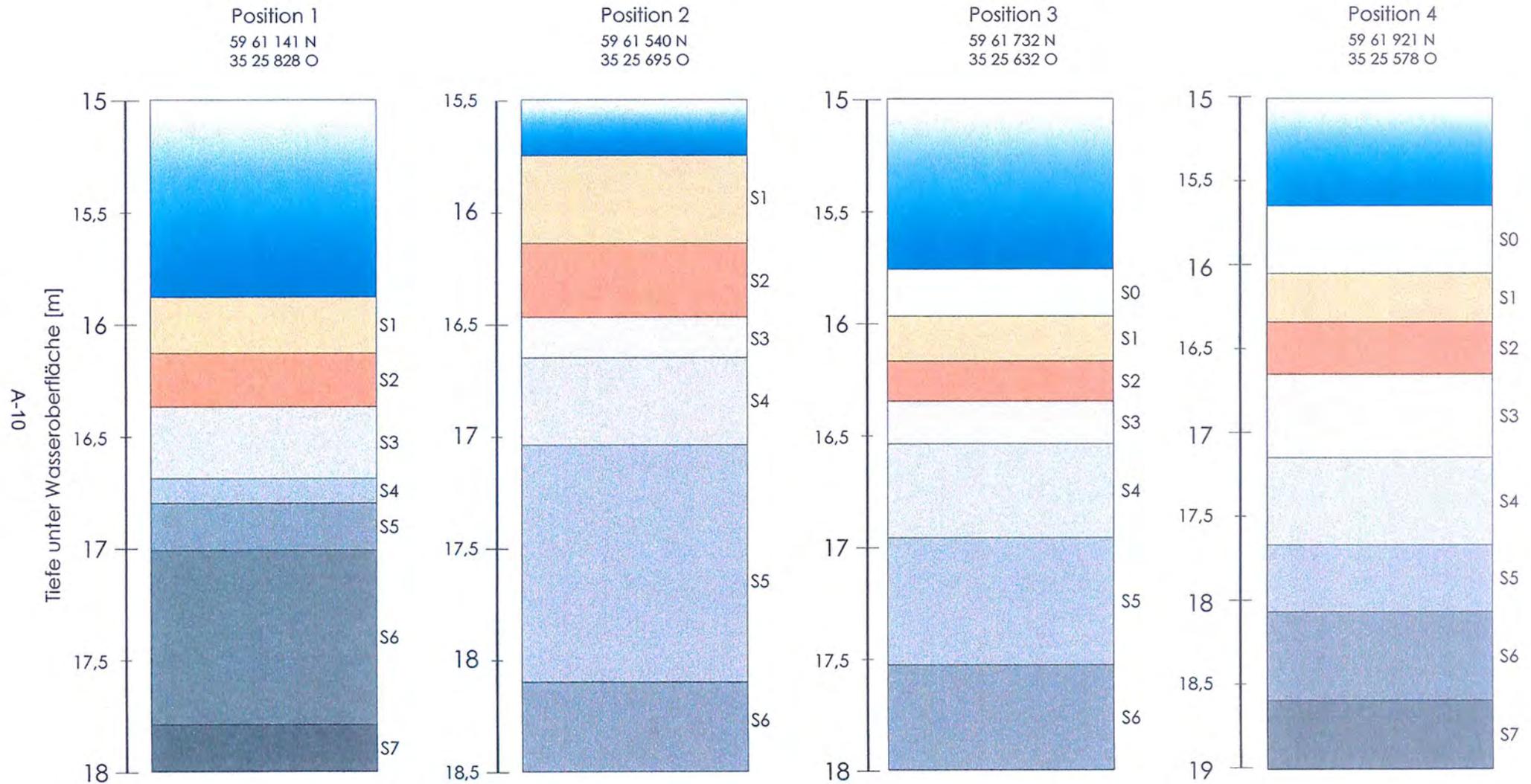
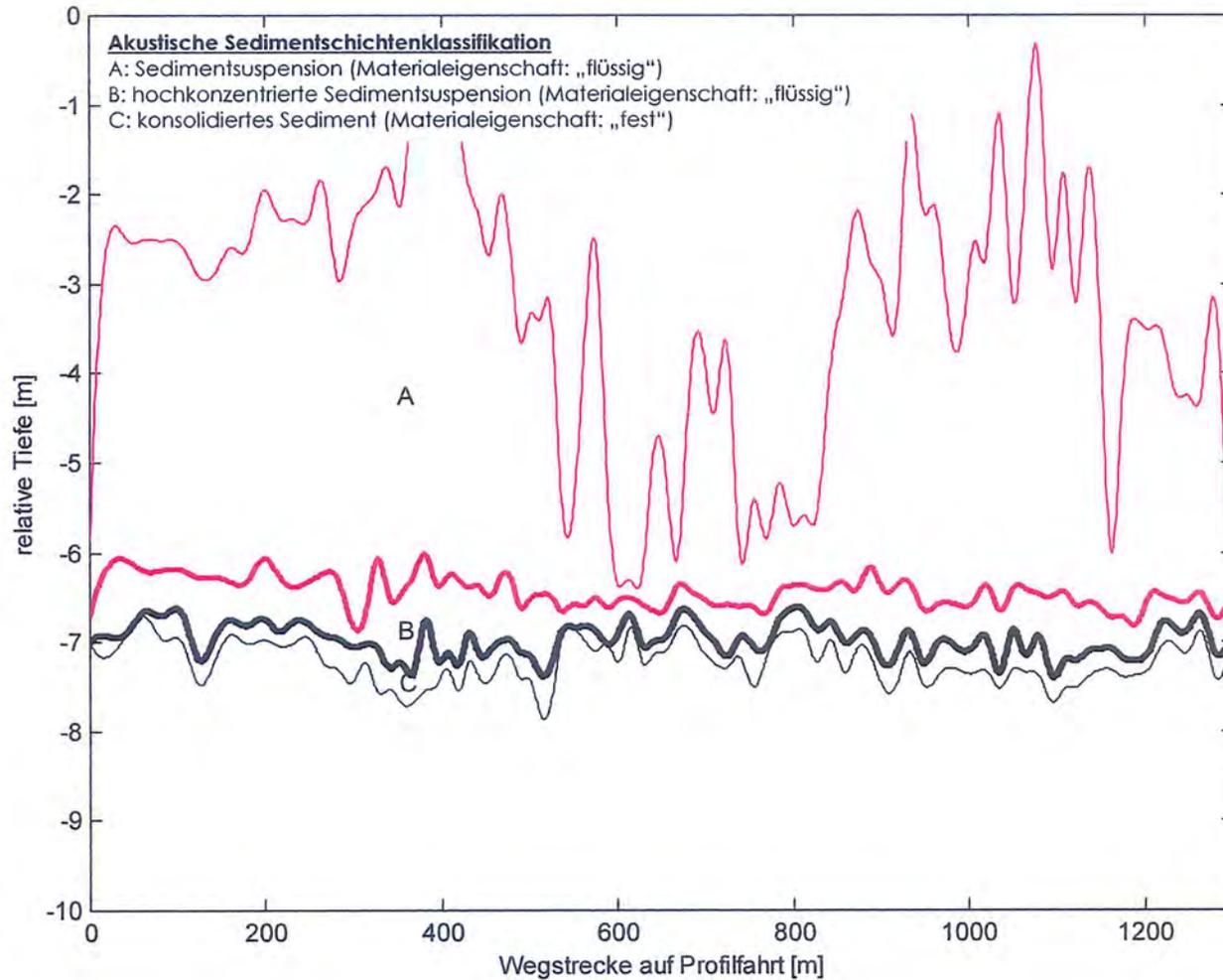


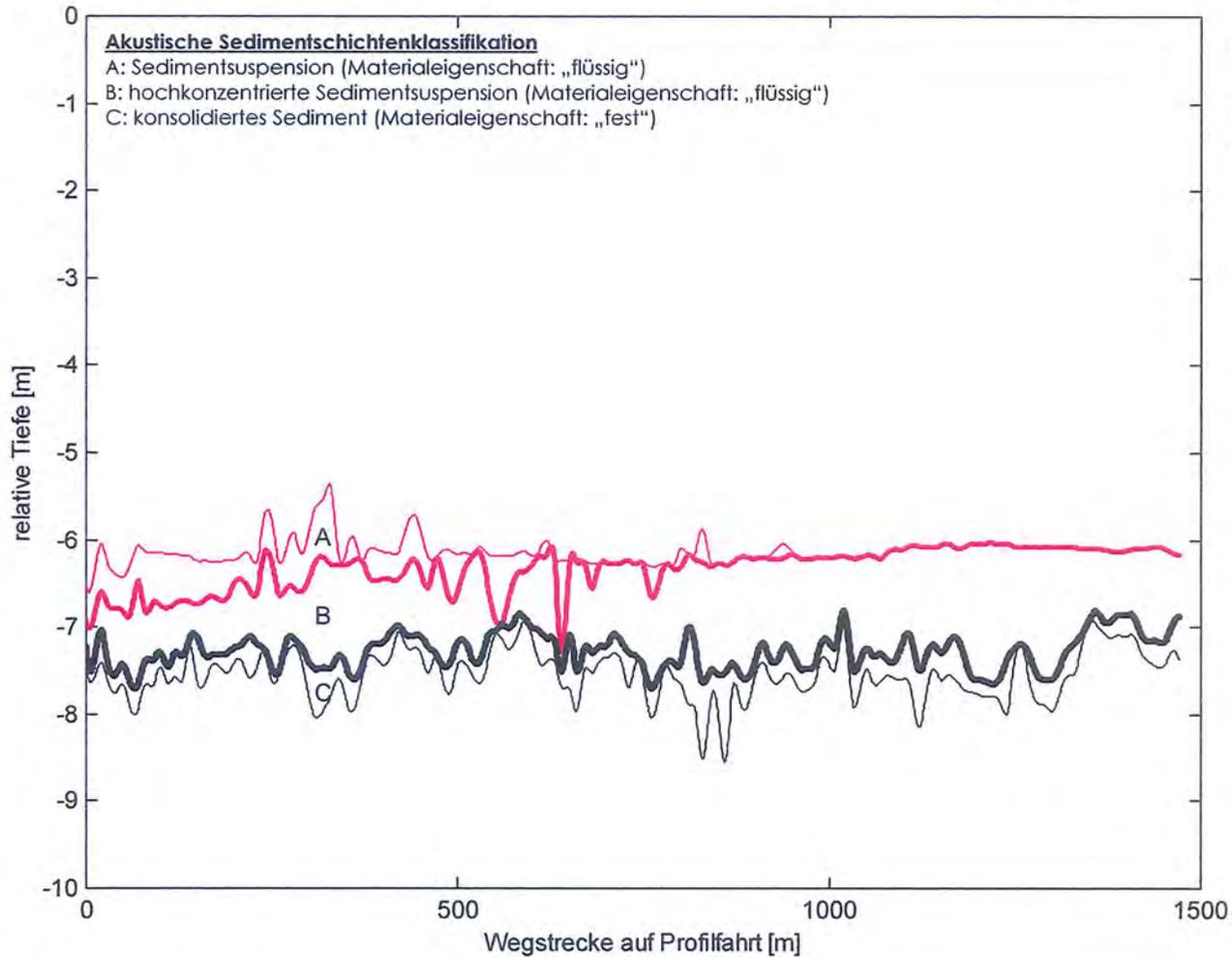
Abb. 8: Ergebnisse des DSLP-Verfahrens (akustische Schichtklassifikation) an den Meßorten an der Rhinplatte



**Sedimentologische und rheologische Zuordnung:**

Schichtklasse K1 = akust. Schicht A und B: Fluid  
 Schichtklasse K2 = akust. Schicht C: elastoviskoses Sediment,  
 Dichte ca. 1,5 g/cm<sup>3</sup>, Fließgrenze nachweisbar

Abb. 9: Beispiel einer Sedimentschichtendetektion des DSLP-Verfahrens auf einem Profil an der Rhinplatte beim Hauptstrom Flut

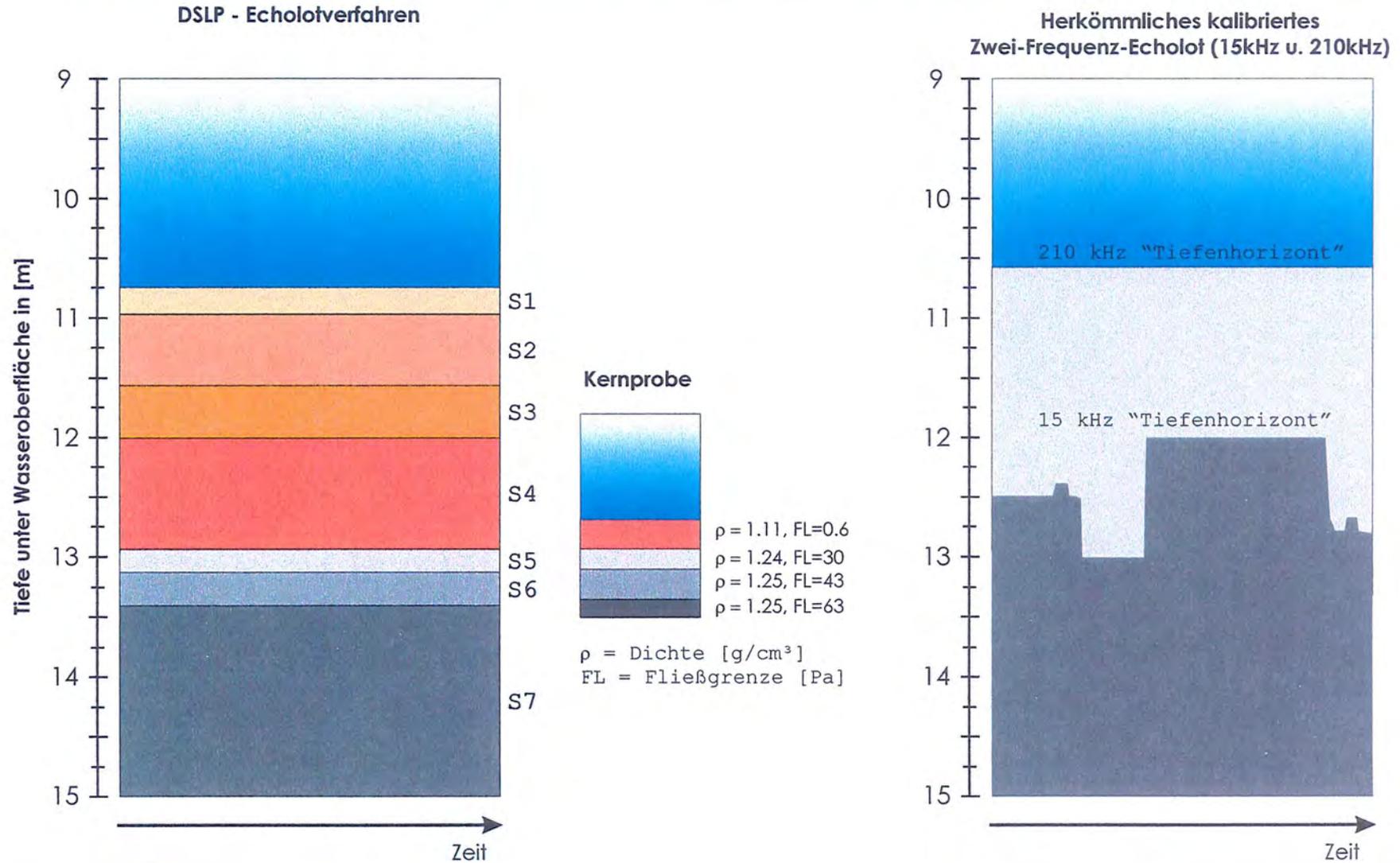


**Sedimentologische und rheologische Zuordnung:**

Schichtklasse K1 = akust. Schicht A und B: Fluid  
 Schichtklasse K2 = akust. Schicht C: elastoviskoses  
 Sediment, Dichte ca. 1,5 g/cm<sup>3</sup>, Fließgrenze nachweisbar

Abb. 10: Beispiel einer Sedimentschichtendetektion des DSLP-Verfahrens auf einem Profil an der Rhinplatte beim Kenterpunkt Flut

Abb. 11: Exemplarisches Beispiel einer Gegenüberstellung der ortsfesten Meßergebnisse des DSLP-Verfahrens (links), der Kernprobe (mitte) und des herkömmlichen kalibrierten Zwei-Frequenz-Echolotsystems (rechts) im Emdener Außenhafen



A-13