



Kuratorium für Forschung  
im Küsteningenieurwesen  
Hindenburgufer 247  
24106 Kiel

*Doppel*

13. DEZ. 1999

DR. GREISER UND PARTNER

## "Erfassung von Sedimenten geringer Dichte"

KFKI-Projekt: MTK 0607



Dipl.-Ing. J. Bornholdt und Dr. N. Greiser

Abschlußbericht 30. Juli 1998

33 601 dit.

KFKI-Projekt -Endbericht: 30. Juli 1998

Zuwendungsempfänger: Dr. Greiser und Partner  
Vorhabenbezeichnung: Erfassung von Sedimenten geringer Dichte  
Förderkennzeichen: MTK 0607  
Vorhabenlaufzeit: 01. 07. 1997 bis 31. 12. 1998  
Berichtszeitraum: 01. 07. 1997 bis 30. 06. 1998

#### Danksagung:

Unserem Projektleiter, Herrn Dr.-Ing. Joachim Behrens, danken wir für seine engagierte, motivationsfördernde Begleitung des Forschungsvorhabens.

Beim Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg bedanken wir uns für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung des Meßeinsatzes auf der Rhinplatte. Dieser Dank gilt insbesondere der Besatzung des uns zur Verfügung gestellten Meßschiffes "Twielenfleeth".

Für die im Oktober des vergangenen Jahres durchgeführten Messungen auf der Ems und im Emdener Hafen gilt unser besonderer Dank dem Niedersächsischen Hafenamts Emden.

#### 1. Aufgabenstellung:

Von *Dr. Greiser und Partner* wurde an Sediment- und Suspensionsproben geprüft, welche geologischen und physikalischen Standardparameter zur Unterscheidung der von *Eden, Vorrath & Partner* mit dem *DSL-Verfahren* akustisch detektierten Materialunterschiede und Sediment-(suspensions)schichten am besten geeignet sind. Die dafür erforderlichen Materialuntersuchungen wurden in enger Kooperation mit dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ) der Universität Kiel durchgeführt.

Von *Dr. Greiser und Partner* wurden dazu als neue Methode erstmals auch rheologische Parameter zur Beschreibung der Sedimenteigenschaften eingesetzt.

## 2. Probennahmen und Untersuchungsparameter:

### Probennahmen:

Nach dem Abschluß der Messungen auf der Ems und im Emdener Hafen (28.10. - 30.10.1997) wurde, wie im Projekt vorgesehen, ein Meßeinsatz in der Unterelbe an der Hauptbaggerstelle Rhinplatte (Stromkilometer 669 - 679) durchgeführt. Durch Vorpeilungen des Wasser- und Schiffsamtes Hamburg (WSA- HH) wurde vorher geprüft, ob dort Eintreibungen von Feststoffmaterial zu vermuten waren. Während des Meßeinsatzes am 22.04.1998 waren diese Randbedingungen erfüllt. Vom WSA-HH wurde als Meßschiff die "Twielenfleeth" zur Verfügung gestellt.

Die Sediment(suspensions)beprobungen wurden mit Schwereloten jeweils parallel zur akustischen Sedimentschichtenvermessung durchgeführt. Bereits unmittelbar nach der Probennahme wurden die im Kernrohr optisch voneinander abgrenzbaren Sedimentschichten vermessen. Von diesen Schichten wurde das Material für die späteren Laboranalysen entnommen (nähere Ausführungen zur Probennahmetechnik s. Seite 6).

### Untersuchungsparameter:

Die wichtigsten Untersuchungen waren Fließgrenzen- und Dichtebestimmungen. Da bisher von den Wasser- und Schiffsverwaltungen die Dichte als wesentliches Kriterium für die Schiffbarkeit von Sedimentsuspensionen (Grenzwert  $1,2 \text{ g/cm}^3$ ) herangezogen wird, war erstens zu prüfen, ob entsprechende Meßwerte in einem ursächlichen oder zumindest systematischen Zusammenhang mit der 'Festigkeit' oder 'Zähigkeit' von Sedimentschichten stehen und zweitens, ob rheologische Parameter eine bessere Erklärung der akustischen Detektionsergebnisse geben als die Dichte oder andere in diesem Zusammenhang immer wieder gemessene physikalische und geologische Sedimentparameter. Deshalb wurden auch der Wassergehalt, der organische Sedimentanteil (gemessen als Glühverlust bzw. vom FTZ als organischer Kohlenstoffanteil) und die Korngrößenverteilung in die Materialanalysen einbezogen.

#### Bemerkungen zur Anwendung rheologischer Parameter:

Für die Beschreibung der Festigkeitszustände von Böden dienen u.a. die mit Flügelsonden ermittelten Scherfestigkeitswerte und auch sogenannte Konsistenzzahlen, die nach anderen Standardverfahren der Baugrundphysik errechnet werden. Die DIN 4096 schreibt vor, daß Flügelsonden nur in Böden mit einer "weichen bis steifen Konsistenz" eingesetzt werden dürfen und für "flüssige" und "breiige" Sedimente nicht geeignet sind.

Für flüssige bis breiige 'Böden' gab es bisher keine anerkannten Standardverfahren zur Bestimmung der Festigkeitszustände. Zu dieser 'Bodenklasse' gehören jedoch die meisten kohäsiven (schlickigen) Gewässersedimente. Diese Lücke in der Gewässersedimente-Physik wird nunmehr durch die von *Dr. Greiser und Partner* entwickelten Meßverfahren geschlossen.

Sie basieren auf Methoden, die bereits in der industriellen Nahrungsmittel-, Arzneimittel- und Kosmetikherstellung etabliert und weltweit wissenschaftlich anerkannt sind und für die deshalb auch kein grundsätzlicher Forschungsbedarf mehr besteht.

Zu beweisen war im Rahmen dieses Projektes lediglich ihre Anwendbarkeit auf Sedimente und Sedimentsuspensionen.

An dieser Stelle sei deshalb als Ergebnis schon vorweggenommen, daß sowohl die Meßergebnisse für das Sedimentmaterial aus dem Emdener Hafen als auch die Ergebnisse von der Rhinplatte zeigen, daß Sedimentschichten gleicher Dichte erhebliche Festigkeitsunterschiede aufweisen können. Diese sind nur mit rheologischen Verfahren exakt meßbar.

### 3. Wissenschaftlich - technische Ergebnisse:

#### Rheologische Eigenschaften und Dichte der Sedimente:

Wie bereits im Zwischenbericht vom 15.01.1998 ausgeführt, gilt für alle Sedimentschichten des Emdener Hafens, daß diese nach dem Überschreiten eines Schubspannungsgrenzwertes fließfähig werden (s. Abbildung 1).

Sie besitzen eine Fließgrenze:

Diese Fließgrenze darf nicht mit der wassergehaltsabhängigen Fließgrenze<sub>WL</sub> (DIN 18122, Teil 1) verwechselt werden. Sie ist im Gegensatz dazu eine kräfteabhängige Fließgrenze und stellt den Schubspannungsgrenzwert dar, ab dem ein vorher fester Stoff viskose Eigenschaften annimmt.

Steigert man die Krafteinwirkung noch weiter, so nimmt der Verflüssigungsgrad weiter zu bzw. die Zähigkeit (Viskosität) der Sedimente nimmt stetig weiter ab. Diese Eigenschaft bezeichnet man in der Rheologie als strukturviskoses Verhalten.

Zusätzlich zum strukturviskosen Verhalten besitzt z.B. der Emdener Hafenschlick thixotrope Eigenschaften. Thixotropie bedeutet, daß eine Substanz nach Ende der Scherkrafteinwirkung ihre ursprüngliche Festigkeit nur zeitverzögert zurückgewinnt.

Der Wechsel in den flüssigen und 'festen' Zustand ist reversibel, beliebig oft wiederholbar und nur mit rheologischen Verfahren exakt meßbar.

Eine feste Korrelation zwischen den rheologischen Meßgrößen und der Sedimentdichte gibt es nach den bisherigen Meßergebnissen nicht (s. Abbildung 7 auf S. 10 der Anlage 2 "Zwischenbericht Emden"). Die in Emden vorgefundenen Sedimente mit Dichtewerten von  $1,21 \text{ g/cm}^3$  -  $1,36 \text{ g/cm}^3$  zeigen hinsichtlich ihrer Festigkeit die ganze Bandbreite von 'sehr weichem' Schlick bis hin zum bereits 'stichfesten Schlickboden'. Erst dort beginnt der Meßbereich herkömmlicher Feldflügelsonden (Meßgenauigkeit lt. DIN ca. 200 Pa; Meßwerte s. Tabelle 1 auf S. 11 der Anlage 2).

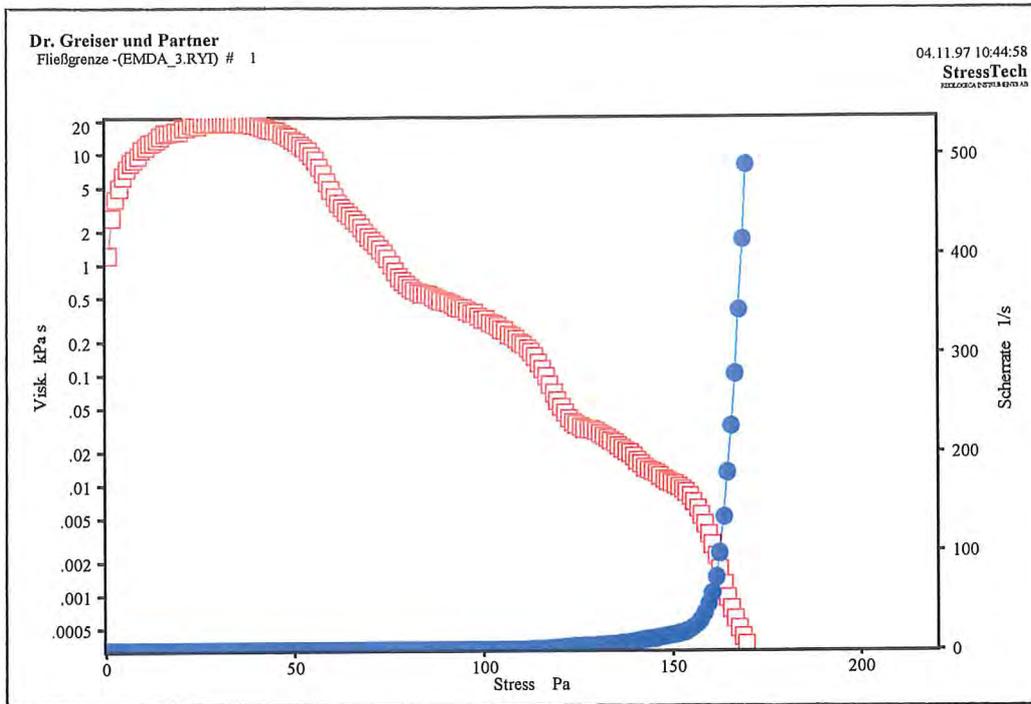


Abbildung 1:

Dargestellt ist die Änderung der Viskosität (rote Kurve) einer Emden Hafenschlickprobe bei steigender Schubspannung ('Stress').

An diesem für Schlick typischen Kurvenverlauf kann man entnehmen, daß mit steigender Schubspannung die Viskosität ebenfalls zunimmt, wobei die Scherrate (blaue Kurve) nur geringfügig ansteigt. Mit weiterem Anstieg der Schubspannung verläuft die Zunahme der Viskosität langsamer bis zu einem Bereich nahezu konstanter Viskosität. Dieser Bereich erstreckt sich bei gering konsolidiertem Schlick über nur wenige Pascal (Pa), bei stark verfestigten Schlickten jedoch teilweise über mehrere hundert Pa. Dieser Schubspannungsbereich markiert den Zustand der elastischen Verformung.

Wird dieser Grenzbereich überschritten - der entsprechende Grenzwert ist die Fließgrenze - verringert sich die Viskosität des Schlicks zunehmend, die Scherrate steigt parallel dazu jedoch nur geringfügig an. Das bedeutet: Der Schlick verflüssigt sich zunehmend. Vollends wie eine Flüssigkeit verhält er sich ab dem Schubspannungswert, bei dem Scherrate stark zunimmt.

Die Naßdichten der Rhinplatten-Sedimente waren aufgrund der stark variierenden Sand- und Schlickanteile deutlich höher als die Dichten des Emden Hafenschlicks. An der Rhinplatte ergaben sich dadurch auch wesentlich höhere Schwankungen der Dichtewerte im Tiefenprofil (s. Tabelle 1 der Anlage 1). Der Dichte-Mittelwert aus allen getrennt analysierten Sedimentschichten betrug an jedem Probenort ca.  $1,5 \text{ g/cm}^3$ . Der Mittelwert für die Dichte der Emden Hafensedimente lag dagegen, wie

bereits erwähnt, je nach Probenort zwischen 1,21 und 1,36 g/cm<sup>3</sup> und die Einzelwerte unterschieden sich im Tiefenprofil kaum.

Zur Sicherstellung reproduzierbarer rheologischer Meßergebnisse wurden die in den Rhinplatten-Kernen vorgefundenen Material-Inhomogenitäten unmittelbar vor den Messungen durch Umrühren wieder aufgehoben. Im Naturzustand dieser Sedimente ist allerdings, begünstigt durch den geringen Anteil köhäsiven organischen Materials, davon auszugehen, daß dort wo Sand dominiert, die Sedimentschichten fester sind, als es die nach dem künstlichen Homogenisieren gewonnenen Meßwerte anzeigen. Die in der Tabelle 1 angegebenen Fließgrenzen markieren den Zustand der "geringsten Festigkeit" der Sedimentschichten an der Rhinplatte (s. Abbildung 1 - 4 der Anlage 1). Sie gelten dort nur für weitgehend homogene Sand-Schlickgemische mit den in der Tabelle 1 angegebenen Korngrößenverteilungen.

Unter dieser Voraussetzung zeigen die Meßwerte, daß an allen Meßorten mit zunehmender Tiefe auch die Fließgrenzen zunehmen. Eine Ausnahme bilden lediglich die erste und zweite Sedimentschicht am Probenort A: Dort war die zweite Schicht gegenüber der ersten etwas dünnflüssiger. Die Unterschiede sind allerdings sehr gering. Die Ursache dafür dürfte der etwas höhere Wassergehalt in der zweiten Sedimentschicht sein. Thixotropie wurde ebenfalls festgestellt. Einen optischen Eindruck von dem an der Rhinplatte vorgefundenen Sedimentmaterial geben die Abbildungen 1 - 3 im Anhang 1.

#### **Rheologische Eigenschaften und Dichte der Sedimentsuspensionen:**

Um die Festigkeitszustände der in Emden vorhandenen Sedimentsuspensionen messen zu können, mußten rheologische Meßverfahrens-Varianten eingesetzt werden, die gegenüber Flügelsonden mindestens eine um den Faktor 500 höhere Meßempfindlichkeit und Meßgenauigkeit aufweisen.

Nur dadurch konnte nachgewiesen werden, daß die im Emden Hafen vorhandene Sedimentsuspension noch um den Faktor 60 - 500 weniger

'fest' ist als die oberste Schicht der 'festen Sohle' (s. Tabelle 1, S. 11, Anlage 2).

In allen an der Rhinplatte genommenen Sedimentkernen, war oberhalb der optisch erkennbar festen Sedimentschichten ebenfalls eine Feststoff-suspension vorhanden. Ein großer Teil der Feststoffe sedimentierte jedoch während der Probennahme bereits innerhalb weniger Minuten. Im Kernrohr blieb aber eine optisch klar erkennbare Grenze zwischen dem frisch sedimentiertem Material und dem festen Sediment bestehen (die Suspension wurde nach einer Standzeit der Kernrohre von ca. 1h durch Absaugen zusammen mit dem überstehenden Wasser in ein Probengefäß überführt und vor den Laboranalysen wurden sedimentierte Suspensionspartikel wieder mit dem überstehenden Wasser vermischt).

Diese Beobachtungen unmittelbar nach den Probennahmen zeigen einen deutlichen Unterschied zu den in Emden vorhandenen Suspensionen: Die Suspensionen an der Rhinplatte sind im Gegensatz zu den bis 4 m mächtigen "Fluid-Mud"-Schichten des Emders Außenhafens instabil. Zugleich fiel auf, daß diese Suspensionen (an allen Probenorten) wesentlich dünnflüssiger waren als die Suspensionsproben aus dem Emders Hafen.

Diese Beobachtung wird durch die rheologischen Meßergebnisse bestätigt: Die Rhinplatten-Suspensionen besitzen im Gegensatz zu den Emders Proben keine Fließgrenze. Sie verhalten sich wie eine Newton'sche Flüssigkeit. Ihre Viskositätswerte betragen 1,8 mPa\*s bis 2,2 mPa\*s. Die Messungen wurden bei 25°C durchgeführt.

Zum Vergleich: Reines Wasser hat bei 0°C eine Viskosität von 1,79 mPa\*s, bei 20°C eine Viskosität von 1,00 mPa\*s und bei 100°C nur noch eine Viskosität von 0,28 mPa\*s.

Die Viskosität der Rhinplatten-Suspensionsproben liegt somit nur wenig oberhalb der von Wasser .

Bei dieser Einschätzung ist allerdings zu bedenken, daß bedingt durch den Strömungsstillstand im Rohr, die relativ lange Probennahmezeit und die Standzeit vor der Kernmaterialentnahme an Bord, quasi künstliche Kenterpunkte erzeugt wurden. Die dabei durch unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten herbeigeführte Trennung der Sand- und Schlickpartikel ('differential settling') ergibt Schichtungsverhältnisse im Kernrohr, die nicht mehr als naturnah bezeichnet werden können, sobald an der Rhinplatte Resuspension und advektiver Feststofftransport dominieren.

Es ist dann davon auszugehen, daß die Sandanteile der Rhinplatten-Sedimentsuspension noch deutlicher über denen der Suspensionsproben aus dem Emden Hafen liegen als es die Meßergebnisse in der Tabelle 1 im Anhang 1 und in der Tabelle 1 im Anhang 2 (Zwischenbericht Emden) zeigen.

Um eine Vorstellung davon zu erhalten, welchen Zustand die Sedimentsuspensionen an der Rhinplatte zu Stillwasserzeiten annehmen können, wurde auch die in der Tabelle 1 (Anhang 1) mit B-2 bezeichnete durch die Probennahme künstlich erzeugte 'Kenterpunkt-Suspension' rheologisch untersucht. Daraus wird deutlich, daß durch Sedimentation an der Rhinplatte aus einer Suspension mit wasserähnlichem Fließverhalten in kurzer Zeit ein Sedimentsuspensionskörper entstehen kann, der eine meßbare Fließgrenze aufweist. Sie beträgt in diesem Fall 5,1 Pa und liegt damit oberhalb der Werte für die im Emden Hafen vorhandene Fluid Mud-Schicht (0,4 Pa - 1,4 Pa).

Einen Überblick über die Schichtenabfolge in den Kernrohrproben von der Rhinplatte geben die Abbildungen 4 - 7 im Anhang 1. Die entsprechenden Darstellungen für die Kernproben aus der Ems und dem Emden Hafen sind im Anhang 2 vorhanden (s. dort Abbildungen 1 - 4).

#### 4. Schlußfolgerungen:

Die Meßergebnisse von der Rhinplatte bestätigen die folgenden, bereits aus den Untersuchungsergebnissen im Emden Hafen abgeleiteten Aussagen:

##### Meßbarkeit von Festigkeitszuständen:

- o Dichtewerte sind kein verlässliches Unterscheidungskriterium für den Festigkeitszustand von Sedimenten oder die Zähigkeit (Viskosität) von Sedimentsuspensionen.
- o Für die Messung der Festigkeitszustände von kohäsiven Gewässersedimenten (Schlämme, Schlicke, Schlick/Sandgemische) sind herkömmliche Verfahren der Baugrundphysik, wie z.B. Flügelsondersondierungen, nicht geeignet.
- o Die von *Dr. Greiser und Partner* entwickelten rheologischen Meßverfahren liefern dagegen physikalische Parameter, mit denen die Festigkeitszustände und dynamischen Festigkeitszustandsänderungen von kohäsiven Sedimenten und Sedimentsuspensionen exakt quantifiziert und beschrieben werden können.
- o Eine wichtige rheologische Tatsache ist die Erkenntnis, daß alle im Rahmen dieses Projektes untersuchten kohäsiven Sedimente eine Fließgrenze besitzen: Bei ausreichender Krafteinwirkung verhalten sie sich wie eine Flüssigkeit.
- o Die Emden Sedimentsuspensionen wiesen um den Faktor 50 bis 600 geringere Fließgrenzenwerte auf als die unmittelbar angrenzende oberste Schicht der 'festen Sohle'.
- o Die Rhinplatten-Suspensionen haben keine Fließgrenze. Es sind Newton'sche Flüssigkeiten mit wasserähnlichen Zähigkeitswerten. Die obersten Schichten der 'festen Sohle' sind unter den auf Seite 6 genannten Randbedingungen von vergleichbarer Festigkeit wie die Emden Oberflächensedimente.

**Bedeutung für die Praxis:**

- o Dichtesondierungen von Sedimentsuspensionen bieten keinen verlässlichen Anhaltspunkt für die Beurteilung ihrer Zähigkeit und damit z.B. auch ihrer Schiffbarkeit.
- o Die Dichtewerte von Sedimenten stehen in keinem ursächlichen Zusammenhang mit deren Festigkeit (Zähigkeit, Viskosität, Fließgrenze).
- o Vormalig feste kohäsive Sedimente oder Sedimentsuspensionen setzen beim Vorhandensein einer Fließgrenze, einmal in Bewegung gebracht, Schiffen oder Baggergeräten einen deutlich geringeren Widerstand entgegen als im unberührten Zustand.
- o Mit den in diesem Projekt eingesetzten rheologischen Meßverfahren wird die Effektivität von Baggertechniken, Baggerguttransport- und Deponiertechniken und auch die Schiffbarkeit von Sedimentsuspensionen anhand exakter physikalischer Parameter berechenbar.

Die im Emden Außenhafen vorgefundene Sedimentsuspensionschicht liefert, da ihre Schiffbarkeit bereits seit Jahren empirisch nachgewiesen ist, die ersten exakten rheologischen Meßwerte zur Beurteilung der Schiffbarkeit von Sedimentsuspensionen in anderen Gewässerabschnitten der Ems bzw. anderen Flüssen, Häfen und Binnengewässern.

Bezüglich des Elbabschnitts Rhinplatte ist für die dort vorhandenen Sedimentsuspensionen von Folgendem auszugehen: Wenn die während der Stillwasserzeiten entstandenen, mit herkömmlichen Probennahmetechniken allerdings nicht exakt erfaßbaren, sohl-nahen Sedimentsuspensionschichten schiffbar sind, dann ist das gleiche Feststoffmaterial, wenn es durch Strömung in einem größeren Wasservolumen verteilt wird, erst recht schiffbar.

## 5. Ausblick:

### Ökonomische Aspekte

- o Anhand rheologischer Materialparameter können Baggereinsätze für die Gewässerunterhaltung optimiert und damit auch unnötige Ausgaben für die Baggerung von eigentlich schiffbarem Feststoffmaterial vermieden werden.

### Feststofftransportverhalten

- o Die räumliche Ausdehnung und die Zähigkeit von Sedimentsuspensionen sind wahrscheinlich an der Rhinplatte je nach dem momentanen Überwiegen von Erosion, Sedimentation oder advektivem Transport im Tideverlauf starken Variationen unterworfen. Über längere Zeiträume stabile Suspensionsschichtungen scheint es dort deshalb nicht zu geben.

Der inhomogene Aufbau der darunterliegenden festen Sedimentschichten ist ebenfalls ein Indikator für diese vermutete hohe Transportdynamik des Sedimentmaterials an der Rhinplatte: In überwiegend feinkörnigen Kernabschnitten waren Sandeinlagerungen vorhanden und in Schichten, die überwiegend aus Sand bestanden, gab es diskrete Einlagerungen von Schlick.

Zum routinemäßigen Nachweis der Schiffbarkeit der an der Rhinplatte oder auch in der Ems vorhandenen Sedimentsuspensionen müssen deshalb insitu-Viskositätsmessungen durchgeführt werden.

Erste flächenhafte Einschätzungen der Schiffbarkeit von Sedimentmaterial und deren Variabilität im Tide(strömungs)verlauf oder Konsolidierungsprozeß sind vor dem Hintergrund der Erfahrungen im Emden Hafen bereits mit der in diesem Projekt erfolgreich praktizierten Verfahrenskombination aus rheologischer Sedimentprobenanalyse und dem *DSLIP-Verfahren* der Firma *Eden, Vorrath & Partner* möglich.

#### **Richtlinien für Sedimentuntersuchungen und Baugrund**

- o Die Anwendbarkeit bisheriger Vorschriften zur Sediment- und Baugrundklassifizierung sollte mit rheologischen Meßverfahren überprüft werden. Bestehende Verfahrenslücken und Parameterdefizite der Baugrund- und Sedimentphysik sollten mit Hilfe der Rheologie geschlossen werden.

#### **6. Stand des Vorhabens im Vergleich zur Planung:**

Der Bearbeitungsstand entspricht dem für das Projekt festgelegten Zeit- und Arbeitsplan. Die Inanspruchnahme der Fördermittel ist planmäßig und erfolgt auftragsgemäß.

#### **7. Erreichen des Vorhabenziels:**

Die Projektergebnisse haben zu einem erfolgreichen Projektabschluß geführt. Sie können darüberhinaus sofort in der Gewässerausbau- und Gewässerunterhaltungspraxis eingesetzt werden.

#### **8. Änderungen der Zielsetzung:**

Eine Änderung der Zielsetzung war zu keinem Zeitpunkt wünschenswert oder erforderlich.

#### **9. Erfindungen:**

Es wurden keine Erfindungen angemeldet.



DR. GREISER UND PARTNER

## - Anlage 1 -

Tabellen und Abbildungen  
zum Abschlußbericht

**Tabelle 1:**

**Sediment- und Suspensionsparameter-Meßwerte  
für die Probenorte A und B.**

**MEßWERTE DER RHINPLATTE STATIONEN A UND B**

Probenbezeichnung	Naß- dichte	Feststoff- dichte	Wasser- gehalt	Kon- zentration	Glüh- verlust	Fließ- grenze	Visko- sität	Korngrößenverteilung der mineralischen Fraktion in Prozent (Korngrößen in µm)						
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[Pa]	[mPa*s]	0-10	10-20	20-40	40-63	63-100	>100	< 63
A-1 Suspension	-	-	-	27.2		-	2.11	30.36	18.49	25.46	21.05	4.64	0.00	95.36
A-2 1. Bodenschicht	1.51	2.42	42.8	-	2.7	17.1	-	5.15	5.00	18.21	26.69	27.93	17.02	55.05
A-3 2. Bodenschicht	1.52	2.56	44.2	-	3.1	15.1	-	16.78	11.71	22.09	28.23	20.66	0.53	78.81
A-4 3. Bodenschicht	1.55	2.49	41.1	-	2.8	43.1	-	5.07	5.45	16.44	27.86	25.82	19.36	54.82
A-5 4. Bodenschicht	1.47	2.47	46.1	-	3.5	53.1	-	6.70	6.80	19.03	38.34	22.98	6.15	70.87
A-6 5. Bodenschicht	1.36	2.29	52.6	-	5.0	63.1	-	7.86	7.70	20.16	32.57	28.48	3.23	68.29
A-7 6. Bodenschicht	1.71	2.42	29.2	-	1.4	<sup>1</sup> k.M.	-	3.09	2.53	7.00	21.66	31.52	34.20	34.28
Mittelwert der Schicht A-2 bis A-7	1.52	2.44	42.7	-	3.1	38.3	-	7.44	6.53	17.16	29.23	26.23	13.42	60.35
B-1 Suspension	-	-	-	29.5	-	-	2.18	27.95	17.13	23.92	18.15	12.85	0.00	87.15
B-2 Suspension/Bodenschicht	1.21	2.44	70.1	-	6.3	5.1	-	15.73	11.84	24.38	24.21	21.94	1.90	76.16
B-3 1. Bodenschicht	1.48	2.43	45.2	-	3.0	11.1	-	4.93	4.48	12.32	22.20	34.16	21.91	43.93
B-4 2. Bodenschicht	1.53	2.48	41.8	-	2.8	25.1	-	4.61	3.29	10.15	17.32	34.70	29.93	35.37
B-5 3. Bodenschicht	1.62	2.52	36.4	-	2.2	55.1	-	9.94	7.06	13.98	19.74	30.46	18.82	50.73
B-6 4. Bodenschicht	1.50	2.38	42.4	-	3.5	77.0	-	6.59	4.45	10.63	19.73	32.96	25.64	41.40
Mittelwert der Schicht B-3 bis B-6	1.53	2.45	41.5	-	2.9	42.1	-	6.52	4.82	11.77	19.75	33.07	24.08	42.86

Fortsetzung Tabelle 1:

Sediment- und Suspensionsparameter Meßwerte  
für die Probenorte C und D.

MEßWERTE DER RHINPLATTE STATIONEN C UND D

Probenbezeichnung	Naß- dichte	Feststoff- dichte	Wasser- gehalt	Konzen- tration	Glüh- verlust	Fließ- grenze	Visko- sität	Korngrößenverteilung der mineralischen Fraktion in Prozent (Korngrößen in µm)						
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[Pa]	[mPa*s]	0-10	10-20	20-40	40-63	63-100	>100	< 63
C-1 Suspension	-	-	-	14.1	-	-	1.84	14.78	10.51	21.75	29.15	17.48	6.33	76.19
C-2	1.38	2.34	52.1	-	3.9	11.1	-	6.66	5.81	21.32	34.73	29.67	1.81	68.52
C-3	1.41	2.39	50.4	-	3.7	13.1	-	8.59	6.78	16.16	20.35	35.33	12.79	51.88
C-4	1.54	2.41	39.9	-	2.7	25.1	-	5.67	5.07	15.48	22.34	29.76	21.68	48.56
C-5	1.40	2.28	48.9	-	4.2	107.0	-	17.52	12.09	18.02	24.09	21.41	6.87	71.72
C-6	1.61	2.39	34.9	-	2.0	<sup>1</sup> k.M.	-	8.05	6.48	15.83	21.81	22.29	25.54	52.17
C-7	1.72	2.45	29.4	-	1.6	<sup>1</sup> k.M.	-	6.02	4.71	14.08	19.52	32.31	23.36	44.33
Mittelwert der Schicht C-2 bis C-7	1.51	2.38	42.61	-	3.0	39.1	-	8.75	6.82	16.82	23.81	28.46	15.34	56.20
D-1 Suspension	-	-	-	15.1	-	-	1.97	25.34	15.97	20.07	27.81	10.81	0.00	89.19
D-2	1.57	2.49	39.6	-	2.7	29.3	-	5.67	4.78	14.38	23.24	33.11	18.82	48.07
D-3	1.51	2.16	37.3	-	2.8	<sup>2</sup> k.M.	-	13.28	9.48	20.10	22.11	17.22	17.81	64.97
Mittelwert der Schicht D-2 bis D-3	1.54	2.33	38.5	-	2.77	29.3	-	9.48	7.13	17.24	22.68	25.17	18.31	56.52

<sup>1</sup>k.M.: keine Messung, da zu hoher Sandanteil; <sup>2</sup>k.M.: keine Messung, da zu wenig Material



Abbildung 1:

Das linke Foto zeigt das mit einem Greifer am Probenahmeort A an der Rhinplatte geförderte Sedimentmaterial. Ein erster 'Materialtest' verdeutlicht die Kohäsivität und den relativ hohen Schlickanteil des Sedimentes.

Das rechte Foto zeigt die am Probenort A mit dem Sedimentkernrohr des FTZ Büsum gewonnene Sedimentprobe. Es ist erkennbar, daß der obere Teil des Kernrohres mit einer Feststoffsuspension gefüllt ist, die bereits zum Teil sedimentiert ist.

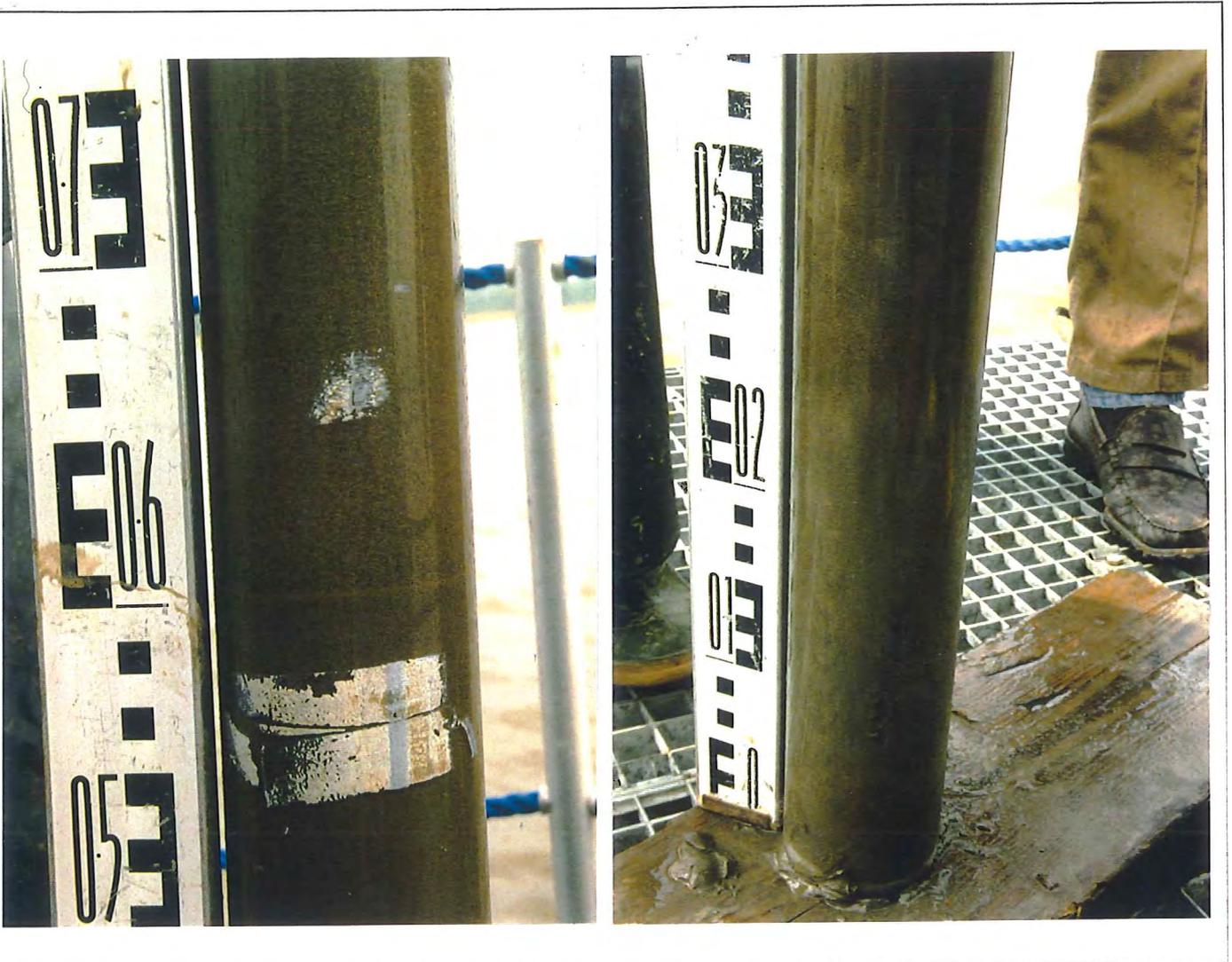


Abbildung 2:

Auf dem linken Bild ist die Grenze zwischen dem noch in Schwebel befindlichen, teilweise bereits sedimentierten Suspensionsmaterial und der obersten Sedimentschicht der Kernrohrprobe vom Ort A (Rhinplatte) zu erkennen.

Das rechte Foto zeigt die tieferliegenden Sedimentschichten am gleichen Probenahmeort. Deutlich erkennbar sind diskrete heller gefärbte Sandeinlagerungen in der ansonsten aus Schlack bestehenden Sedimentmatrix (die Schichtenabfolge ist der Abbildung 4 auf S. 4 dieses Anhangs zu entnehmen),

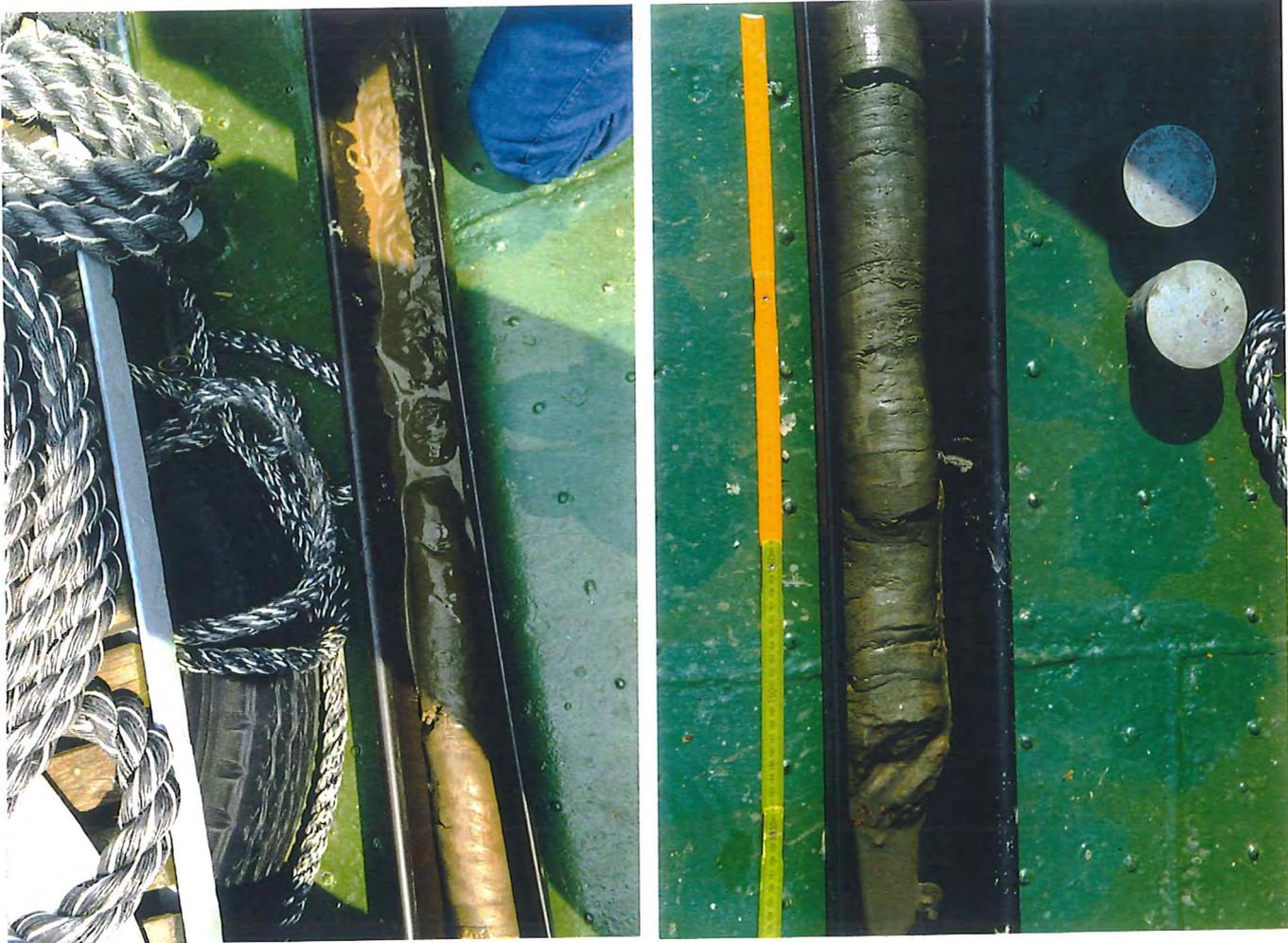


Abbildung 3:

Auf dem linken Foto ist das aus der Kernprobe C erhaltene Sedimentmaterial abgebildet. An diesem Kern wird bereits optisch die Zunahme der Sedimentfestigkeit mit größerer Sedimenttiefe erkennbar.

Das rechte Foto zeigt die entsprechenden Schichtungsverhältnisse am Probenort D.

RHINPLATTE 22. 04. 1998  
 Probe: 12.40; Position 1 (A)

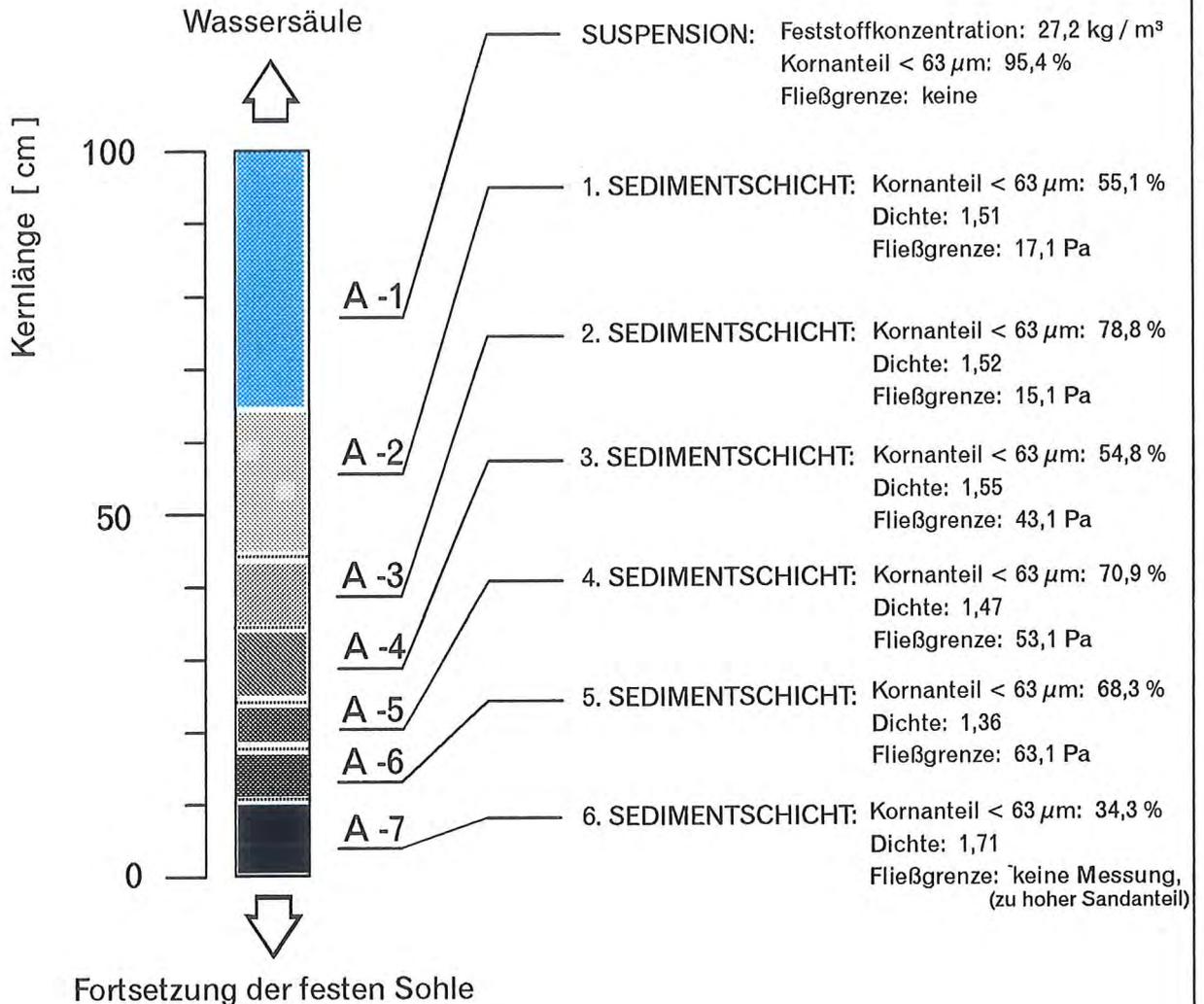


Abbildung 4:

Abfolge der Suspensions- und Sedimentschichten am Probennahmeort A entsprechend der Begutachtung der Kernprobe vor Ort. Desweiteren sind zur Klassifizierung der Feststoffmaterialien die Korngrößenanteile < 63 μm, die Naßdichten (bei der Suspension die Feststoffkonzentration) und die Fließgrenzen angegeben.

RHINPLATTE 22. 04. 1998  
 Probe: 13.00; Position 2 (B)

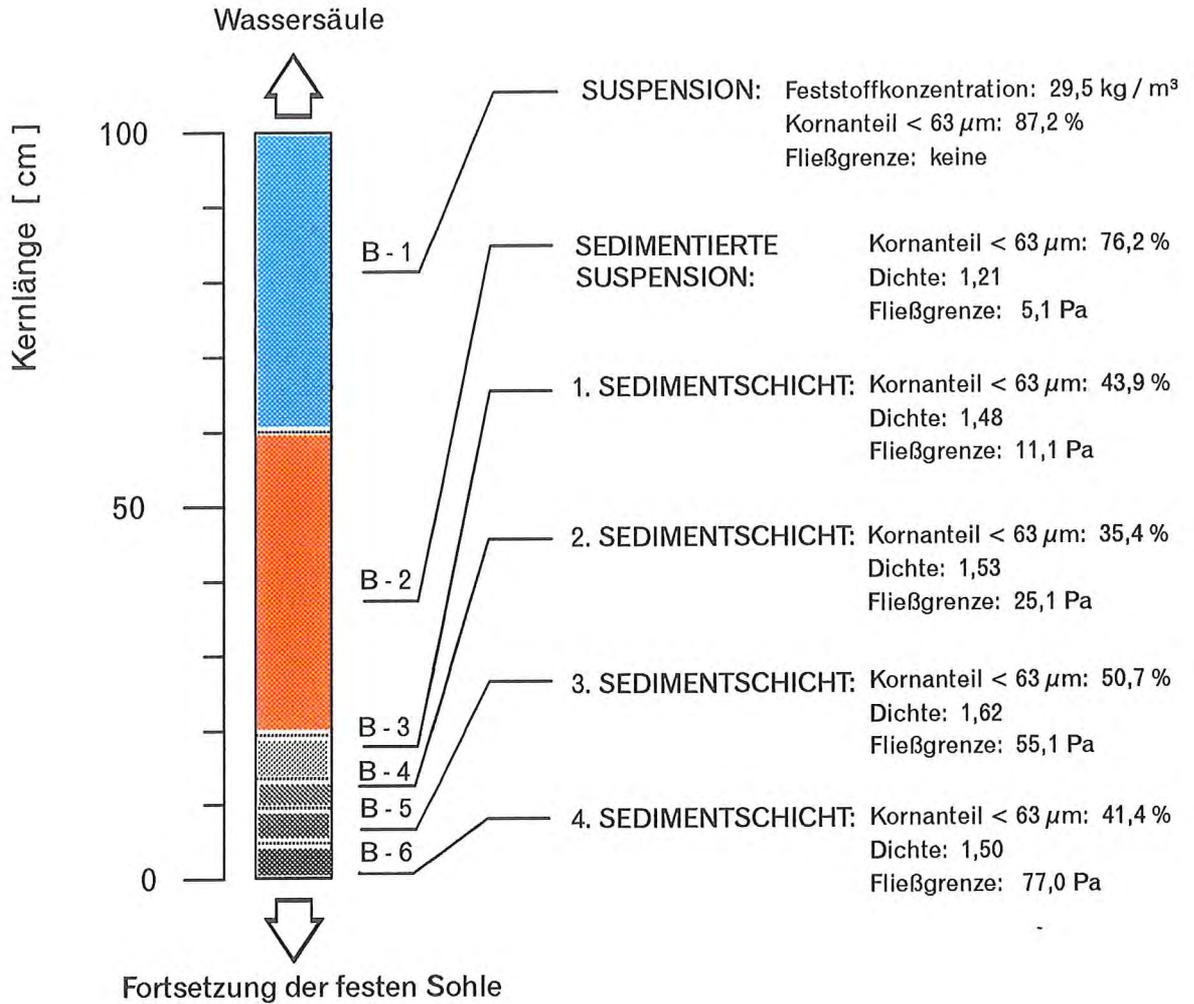


Abbildung 5:

Abfolge der Suspensions- und Sedimentschichten am Probennahmeort B entsprechend der Begutachtung der Kernprobe vor Ort. Desweiteren sind zur Klassifizierung der Feststoffmaterialien die Korngrößenanteile < 63 μm, die Naßdichten (bei der Suspension die Feststoffkonzentration) und die Fließgrenzen angegeben.

RHINPLATTE 22. 04. 1998  
 Probe: 13.15; Position 3 (C)

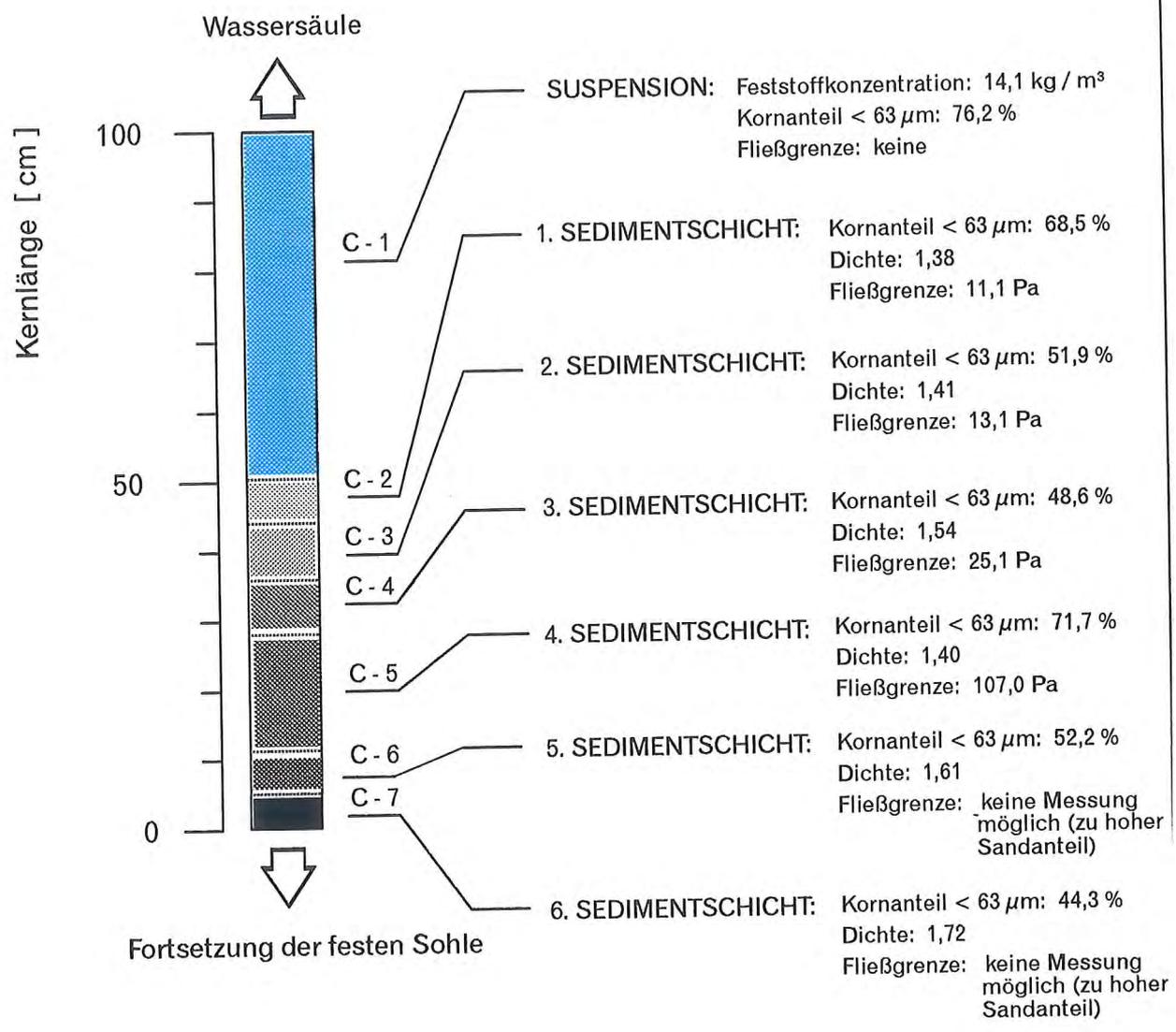
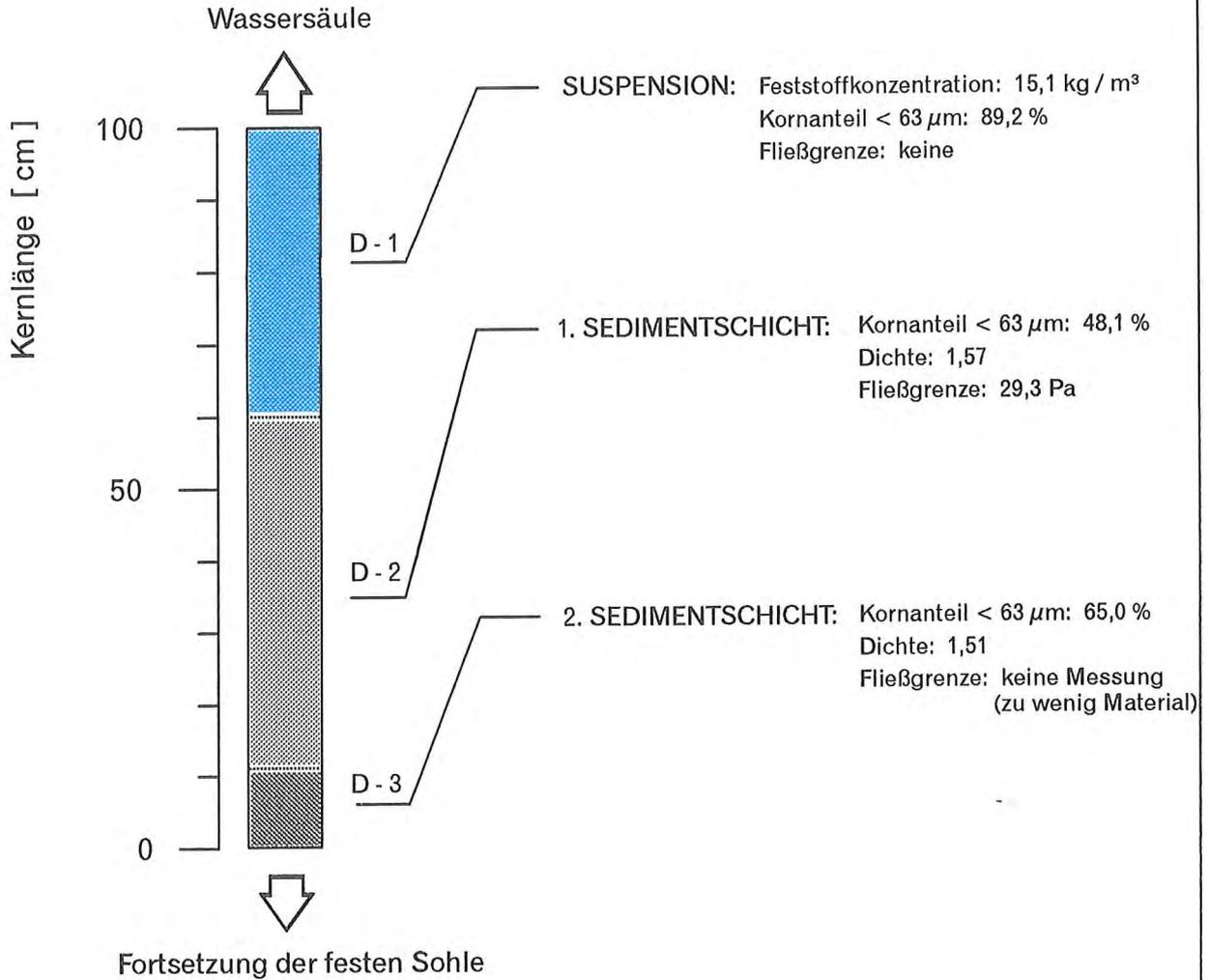


Abbildung 6:

Abfolge der Suspensions- und Sedimentschichten am Probenahmeort C entsprechend der Begutachtung der Kernprobe vor Ort. Desweiteren sind zur Klassifizierung der Feststoffmaterialien die Korngrößenanteile < 63 μm, die Naßdichten (bei der Suspension die Feststoffkonzentration) und die Fließgrenzen angegeben.

RHINPLATTE 22. 04. 1998  
 Probe: 13.40; Position 4 (D)



**Abbildung 7:**

Abfolge der Suspensions- und Sedimentschichten am Probennahmeort D entsprechend der Begutachtung der Kernprobe vor Ort. Desweiteren sind zur Klassifizierung der Feststoffmaterialien die Korngrößenanteile < 63 μm, die Naßdichten (bei der Suspension die Feststoffkonzentration) und die Fließgrenzen angegeben.



DR. GREISER UND PARTNER

## - Anlage 2 -

### "Erfassung von Sedimenten geringer Dichte"

KFKI-Projekt: MTK 0607



Dipl.-Ing. J. Bornholdt und Dr. N. Greiser

Zwischenbericht 15. Januar 1998

<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Fa. Dr. Greiser und Partner
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	Erfassung von Sedimenten geringer Dichte
<b>Förderkennzeichen:</b>	MTK 0607
<b>Vorhabenlaufzeit:</b>	01.07.1997 bis 31.12.1998
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.07.1997 bis 31.12.1997

## 1. 1. Wissenschaftlich - technische Ergebnisse:

Im Berichtszeitraum wurde, wie in der Vorhabenbeschreibung vorgesehen, ein Meßeinsatz im Emdener Hafen und im Emdener Fahrwasser (Ems) vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet. Der Meßeinsatz erfolgte vom 28.10. - 30.10.1997. Das Meßschiff wurde vom Niedersächsischen Hafenamts Emden gestellt. Die Ergebnisse der Sedimentuntersuchungen wurden am 11.12.1997 der KFKI-Projektgruppe vorgestellt. Dies sind im einzelnen:

- Der im Emdener Hafen vorhandene Fluid Mud unterscheidet sich in der Dichte signifikant von dem darunterliegenden Sediment (1,09 - 1,13 g/cm<sup>3</sup> gegenüber 1,22 - 1,32 g/cm<sup>3</sup>). Die rheologischen Meßwertunterschiede sind dagegen sehr viel größer: So ist z.B. die Zähigkeit des Fluid Mud um den Faktor 50 bis 600 geringer als die der daran angrenzenden Sedimentschicht.
- Die tieferliegenden Sedimentschichten weisen untereinander keine signifikanten Dichteunterschiede mehr auf, die Zähigkeitswerte steigen dagegen mit zunehmender Sedimenttiefe deutlich an.
- Darüberhinaus gemessene, für die Sedimentklassifizierung häufig verwendete Parameter wie Größenverteilung der Mineralkörner (Korngrößen), Feststoffdichte, Wassergehalt und Glühverlust (Mengenanteil organischer Sedimentbestandteile) zeigen für alle vom gleichen Probenort stammenden Sedimentschichten, einschließlich Fluid Mud, nahezu identische Meßwerte.

Diese Ergebnisse zeigen:

- Allein die Messungen der Fließeigenschaften liefern für die Sedimentschichten ein eindeutiges und reproduzierbares Materialunterscheidungskriterium.
- Fließeigenschaften sind ein Indikator zur Feststellung des Konsolidierungsgrades von Sedimentschichten.
- Eigene Laborexperimente zeigen, daß die in Emden beprobten konsolidierten Schlickschichten und Fluid Mud nach dem Überschreiten eines Schubspannungsgrenzwertes unter Scherkraftwirkung dünnflüssiger werden. Sie besitzen eine Fließgrenze. Steigert man kontinuierlich die Krafteinwirkung, so nimmt parallel der Verflüssigungsgrad zu bzw. die Zähigkeit (Viskosität) nimmt weiter ab (strukturviskoses Verhalten). Endet die Krafteinwirkung, dann nehmen diese Sedimente mit einer gewissen Zeitverzögerung ihren ursprünglichen Zustand (Zähigkeitswert) wieder an (thixotropes Verhalten). Der Verflüssigungs- und Wiederverfestigungsprozeß ist somit reversibel und beliebig oft reproduzierbar.

Für die praktische Anwendbarkeit bedeutet dies:

⇒ Dichtewerte liefern kein systematisches, eindeutiges Unterscheidungskriterium für den Konsolidierungsgrad. Die Dichte ist wegen der vielen möglichen Festigkeitszustände des gleichen Sedimentes kein verlässlicher Indikator für die Durchfahrbarkeit von Sedimentsuspensionen. Zur genauen Charakterisierung dieser Eigenschaften muß das Fließverhalten bestimmt werden.

⇒ Die gemessenen rheologischen Parameter ermöglichen eine reproduzierbare quantitative Beschreibung des Konsolidierungsgrades von Schlicksedimenten und Fluid Mud.

Die Meßergebnisse des Fließverhaltens zeigen, daß die im Emden Hafen vorgefundenen Schlicke und Fluid Mud einmal in Bewegung gebracht, Schiffen oder Baggergutentnahmegeräten einen geringeren Widerstand entgegensetzen als im unberührten Zustand. Die Meßergebnisse dienen damit der Optimierung von Baggereinsätzen für die Gewässerunterhaltung (Entnahmestrategien und -techniken), und sie liefern erste systematische Indikatorwerte für die Schiffbarkeit von Sedimentsuspensionen.

### **1. 2. Stand des Vorhabens im Vergleich zur Planung:**

Der gegenwärtige Bearbeitungsstand entspricht dem bisherigen Zeit- und Arbeitsplan. Die Inanspruchnahme der Fördermittel ist planmäßig.

### **1. 3. Aussichten für das Erreichen des Vorhabenzieles:**

Die bisher erzielten Ergebnisse bestätigen die guten Aussichten für einen erfolgreichen Projektabschluss.

### **1. 4. Änderungen der Zielsetzung:**

Eine Änderung der Zielsetzung ist weder sinnvoll noch notwendig.

### **1. 5. Erfindungen:**

Es wurden keine Erfindungen angemeldet.

Eine Dokumentation der Meßergebnisse ist diesem Bericht als Anlage beigefügt.

## 1. 1. Projektziele und Aufgaben:

Das Ziel des o.g. Teilprojektes ist die Bestimmung der Fließeigenschaften von Sedimentschichten und ein Vergleich der rheologischen Meßergebnisse mit anderen physikalischen Kenngrößen, wie z. B. Dichte und Wassergehalt sowie Materialparameter wie Korngrößenverteilung und Glühverlust.

Im ersten Meßeinsatz dieses Projektes wurden entsprechende Untersuchungen für den Emdener Hafen und dem angrenzenden Fahrwasserbereich der Ems durchgeführt. Vom Niedersächsischen Hafenamts Emden wurde dafür ein Meßschiff zur Verfügung gestellt. Die Lage und Bezeichnung der Meß- und Probenorte kann der Abbildung 1 entnommen werden.

## 1. 2. Ergebnisse:

Die Beprobungen zeigen, daß im Emdener Außenhafen Sedimentschichten vorhanden sind, deren Konsolidierungsgrad mit zunehmender Sedimenttiefe deutlich zunimmt. Die oberste Sedimentschicht ist bereits um den Faktor 50 - 600 stärker verfestigt als die darüber liegende Fluid Mud. Die Dichte des Fluid Mud ist etwas geringer als die Dichte der unmittelbar angrenzenden Sedimentschicht. Zwischen den konsolidierten Sedimentschichten am jeweiligen Probenort sind keine signifikanten Dichteunterschiede mehr vorhanden. Es bestehen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der Mineralkorn-Größenverteilung und im Anteil organischer Feststoffsubstanz (gemessen als Glühverlust). Dagegen unterscheiden sich die Schlickschichten teilweise sehr stark in ihren Fließgrenzen (s. Abbildungen 2 bis 6 sowie Tabelle 1).

Abbildung 7 verdeutlicht, daß tatsächlich auch rechnerisch keine signifikante Korrelation zwischen den Naßdichten der Fluid Mud -Proben besteht und daß dies ebenfalls für die Gesamtheit der Schlickproben gilt. Diese Nicht-Korrelation wäre noch deutlicher, wenn auch die Sedimentproben C-5, D-5 und E-5, deren Fließgrenzen außerhalb des Meßbereiches von ca. 350 Pa lagen, rechnerisch in diese Korrelationsbetrachtung einbezogen werden könnten.

Diese Ergebnisse zeigen, daß für den Emdener Fluid Mud und Hafenschlick allein die Fließeigenschaften ein eindeutiges und meßtechnisch reproduzierbares Materialunterscheidungskriterium liefern.

Die rheologischen Untersuchungen im Labor lassen noch folgende Materialeigenschaften deutlich werden:

Die in Emden beprobten konsolidierten Schlickschichten und Fluid Mud werden nach dem Überschreiten eines Schubspannungsgrenzwertes unter Scherkraftwirkung dünnflüssiger. Sie besitzen eine Fließgrenze. Steigert man kontinuierlich die Krafteinwirkung, so nimmt parallel ihr Verflüssigungsgrad zu bzw. die Zähigkeit (Viskosität) nimmt weiter ab (strukturviskoses Verhalten).

Endet die Krafteinwirkung, dann nehmen diese Sedimente mit einer gewissen Zeitverzögerung ihren ursprünglichen Zustand (Zähigkeitswert) wieder an (thixotropes Verhalten). Der Verflüssigungs- und Wiederverfestigungsprozeß ist somit reversibel und beliebig oft reproduzierbar.

Allein die vollständige Beschreibung der Fließeigenschaften ist ein verlässlicher Indikator zur Feststellung des Konsolidierungsgrades von Schlick und Fluid Mud bzw. allgemein von *kohäsiven Sedimenten*.

### 1. 3. Schlußfolgerungen:

Dichtewerte liefern im Gegensatz zu rheologischen Parametern kein systematisches, eindeutiges Unterscheidungskriterium für den Konsolidierungsgrad.

Die praktische Anwendung dieser Erkenntnis bedeutet z.B., daß die Dichte wegen der vielen möglichen Festigkeitszustände des gleichen Sedimentes kein geeigneter Indikator für die Durchfahrbarkeit von Sedimentsuspensionen ist. Zur genauen Charakterisierung dieser Eigenschaften muß das Fließverhalten bestimmt werden.

Die Meßergebnisse des Fließverhaltens zeigen, daß die im Emdener Hafen vorgefundenen Schlicke und Fluid Mud, wenn sie einmal in Bewegung gebracht sind, Schiffen oder Baggergutentnahmegeräten einen geringeren Widerstand entgegensetzen als im unberührten Zustand.

Diese Erkenntnis kann unmittelbar zur Optimierung von Baggereinsätzen für die Gewässerunterhaltung (Entnahmestrategien und -techniken) umgesetzt werden, und sie liefert, da in Emden bereits für zahlreiche Schiffe der Nachweis der Durchfahrbarkeit des Fluid Mud erbracht wurde, erste Indikatorwerte für die Schiffbarkeit von Sedimentsuspensionen.

Weitere rheologische Meßergebnisse von Sedimentsuspensionen an anderen Orten werden zeigen, inwieweit diese Indikatorwerte Allgemeingültigkeit haben.



DR. GREISER UND PARTNER

# "Erfassung von Sedimenten geringer Dichte"

KFKI-Projekt: MTK 0607

Anlage zum

Zwischenbericht 15. Januar 1998

## Meßeinsatz "Emden" am 29.10.1997

Lage der Meß- und Probenorte:

A: "Vor der Westmole"

B: "Emder Fahrwasser"

C: "Seeschleuse"

D: "Nesserlander Schleuse"

E: "Rantzel-Brücke"

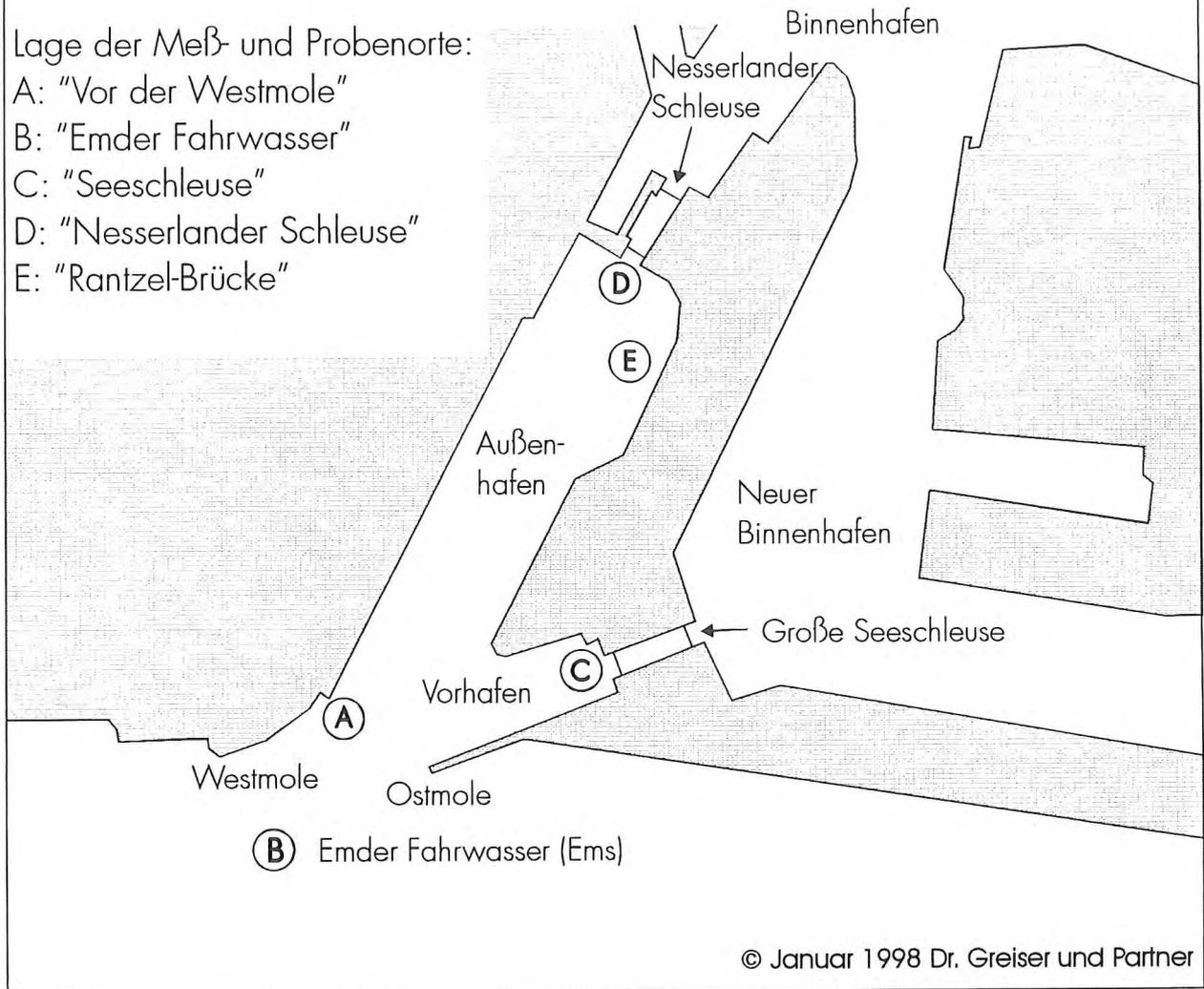


Abbildung 1:

Gebiet des Emdener Hafens mit Angabe der Orte, an denen alle Sedimentkernentnahmen und stationären akustischen Vermessungen der Sedimentschichten mit dem Echolot (DSLIP-Verfahren) der Firma Eden, Vorrath & Partner durchgeführt wurden.

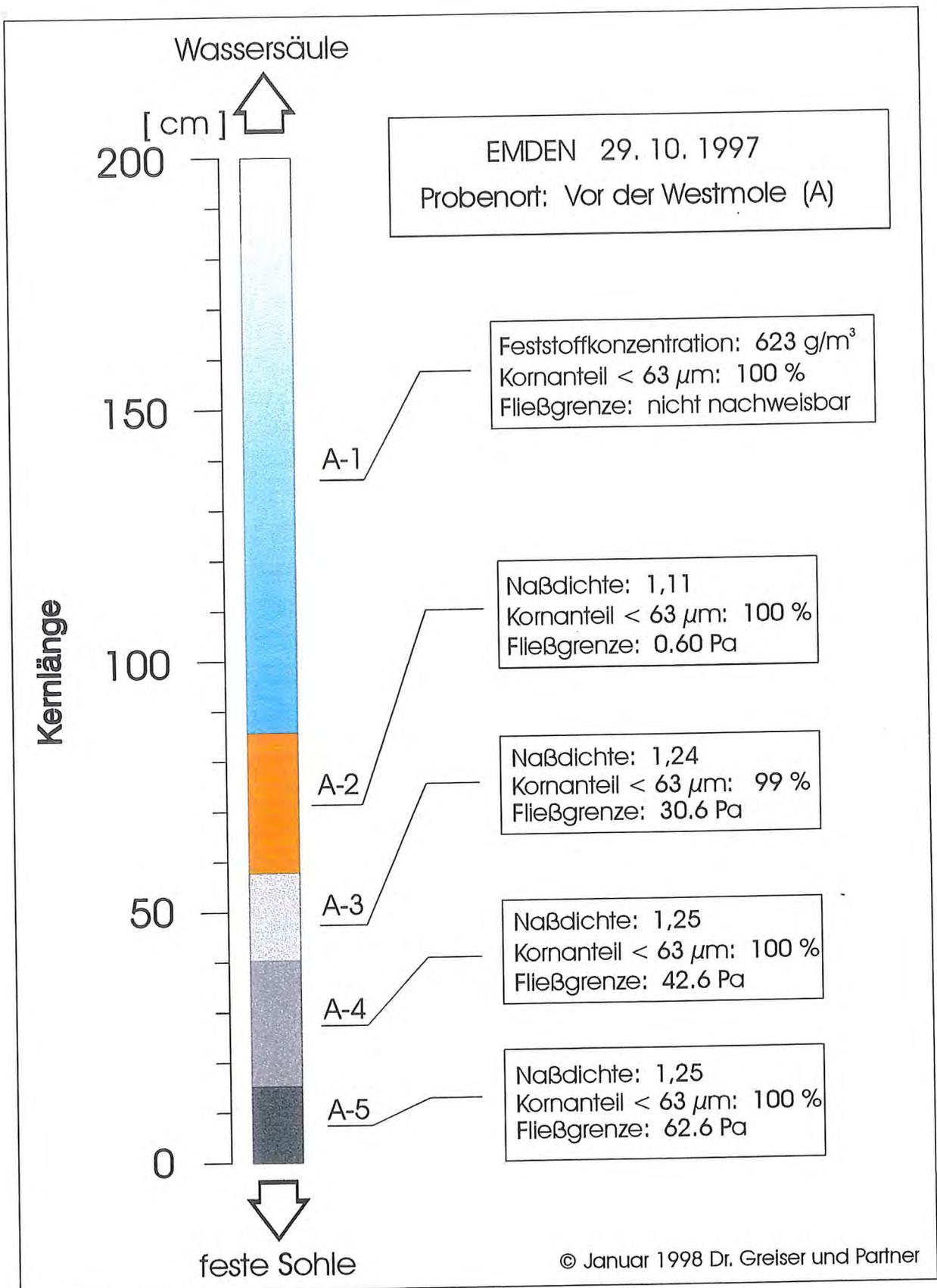


Abbildung 2: Mächtigkeiten und Abfolge der Sedimentschichten des Sedimentkernes am Probenort A "Vor der Westmole" sowie Naßdichte, Anteil der Mineralkörner < 63 μm und Fließgrenzen der einzelnen Sedimentschichten. Die Schicht A-1 ist eine Schwebstoffsuspension. Die Schicht A-2 kann als Fluid Mud bezeichnet werden. Bei den Schichten A-3 bis A-5 handelt es sich um Schlack, dessen Konsolidierungsgrad mit zunehmender Sedimenttiefe ansteigt.

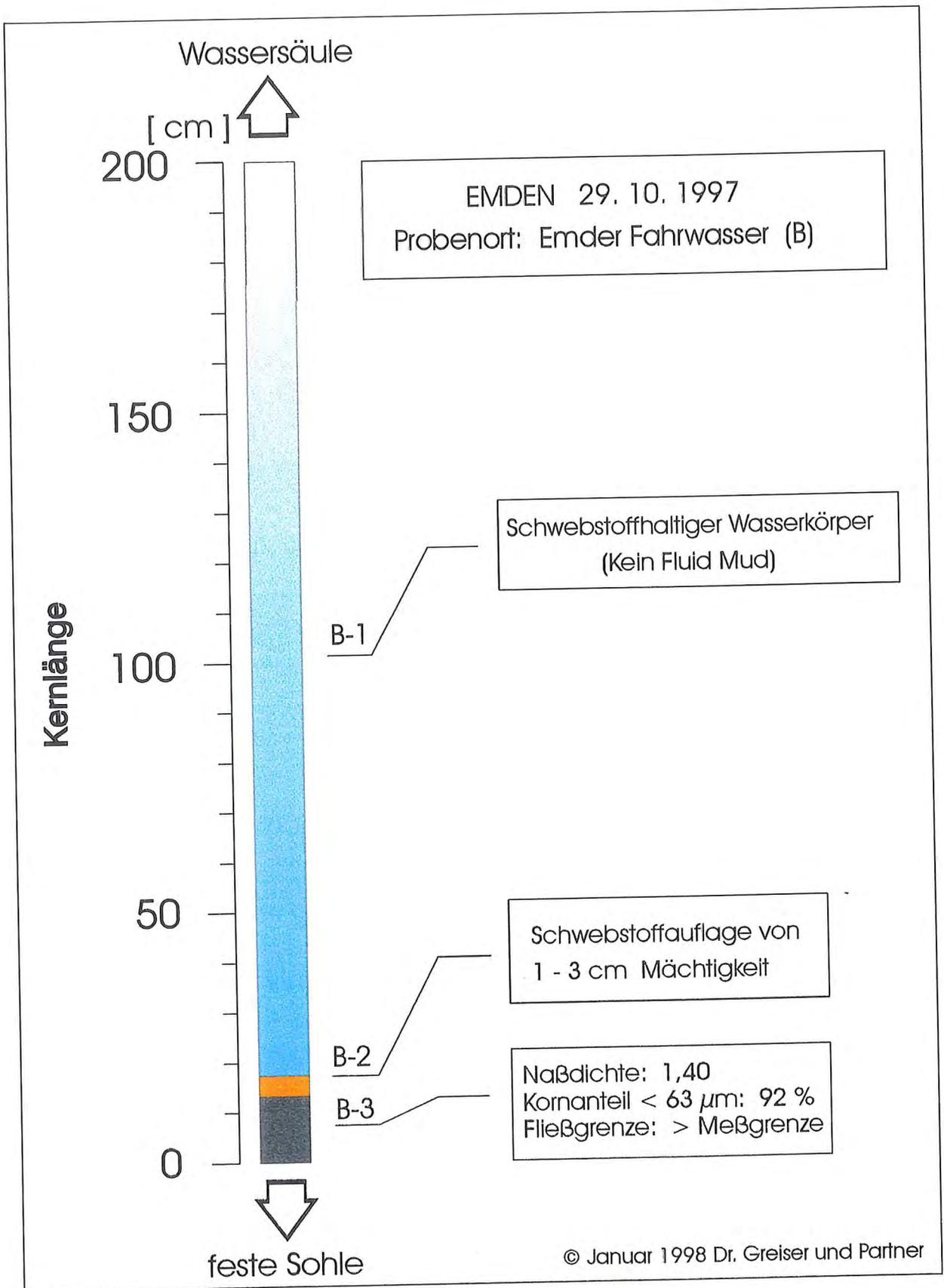


Abbildung 3:  
Sedimentkern vom Probenort B "Emden Fahrwasser". An diesem Probenort fehlt eine ausgeprägte Fluid Mud-Schicht. Bei der Schicht B-2 handelt es sich um sedimentierten Schwebstoff. Die Schicht B-3 besteht aus konsolidiertem Schlick mit Sandeinlagerungen. Die Werte für die Naßdichte, den Kornanteil < 63 µm und die Fließgrenze wurden im Schlick gemessen.

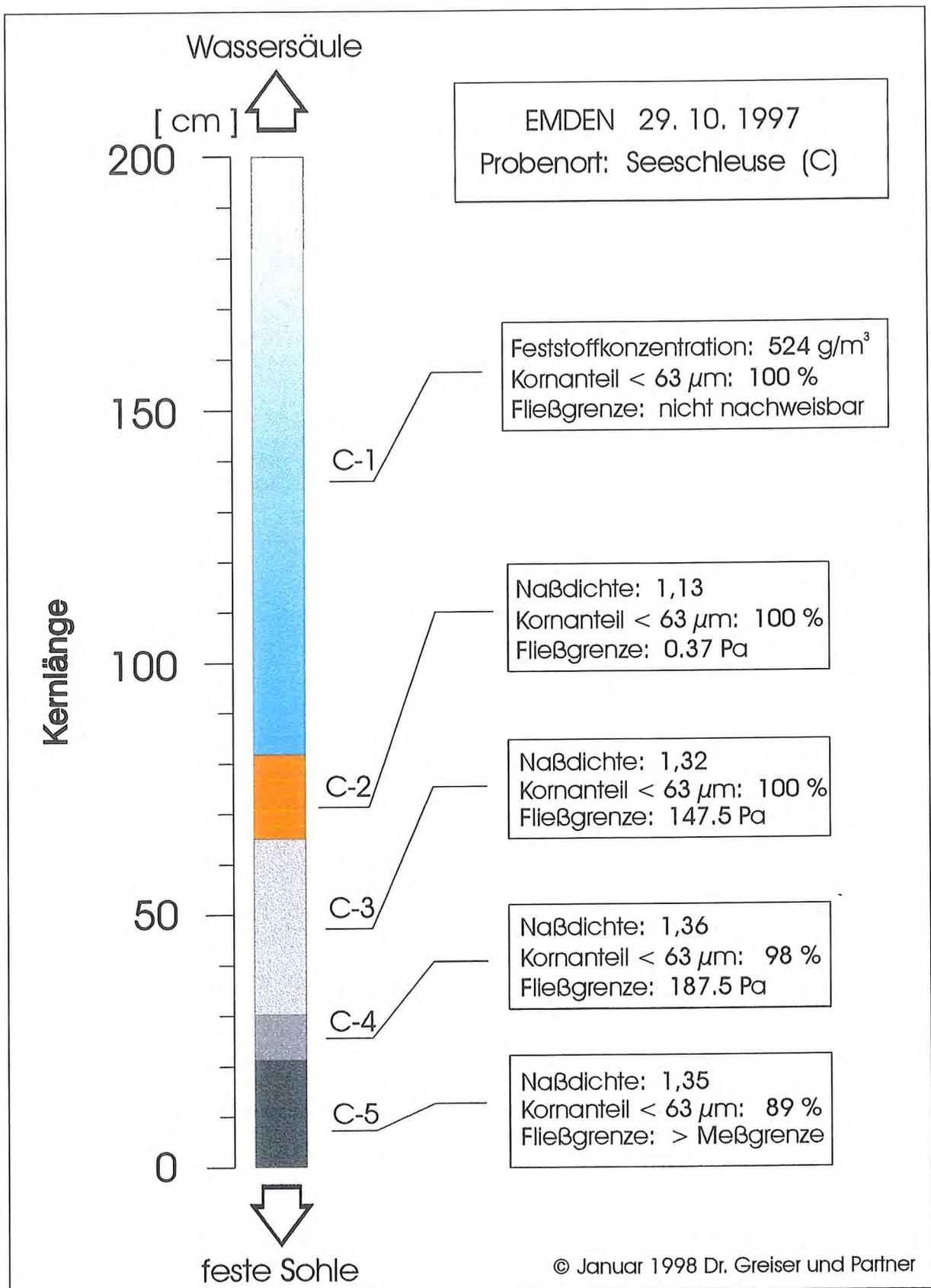


Abbildung 4: Mächtigkeiten und Abfolge der Sedimentschichten des Sedimentkernes am Probenort C "Seeschleuse" sowie Naßdichte, Anteil der Mineralkörner < 63 μm und Fließgrenzen der einzelnen Sedimentschichten. Die Schicht C-1 ist eine Schwebstoffsuspension. Die Schicht C-2 kann als Fluid Mud bezeichnet werden. Bei den Schichten C-3 bis C-5 handelt es sich um Schluff, dessen Konsolidierungsgrad mit zunehmender Sedimenttiefe ansteigt.

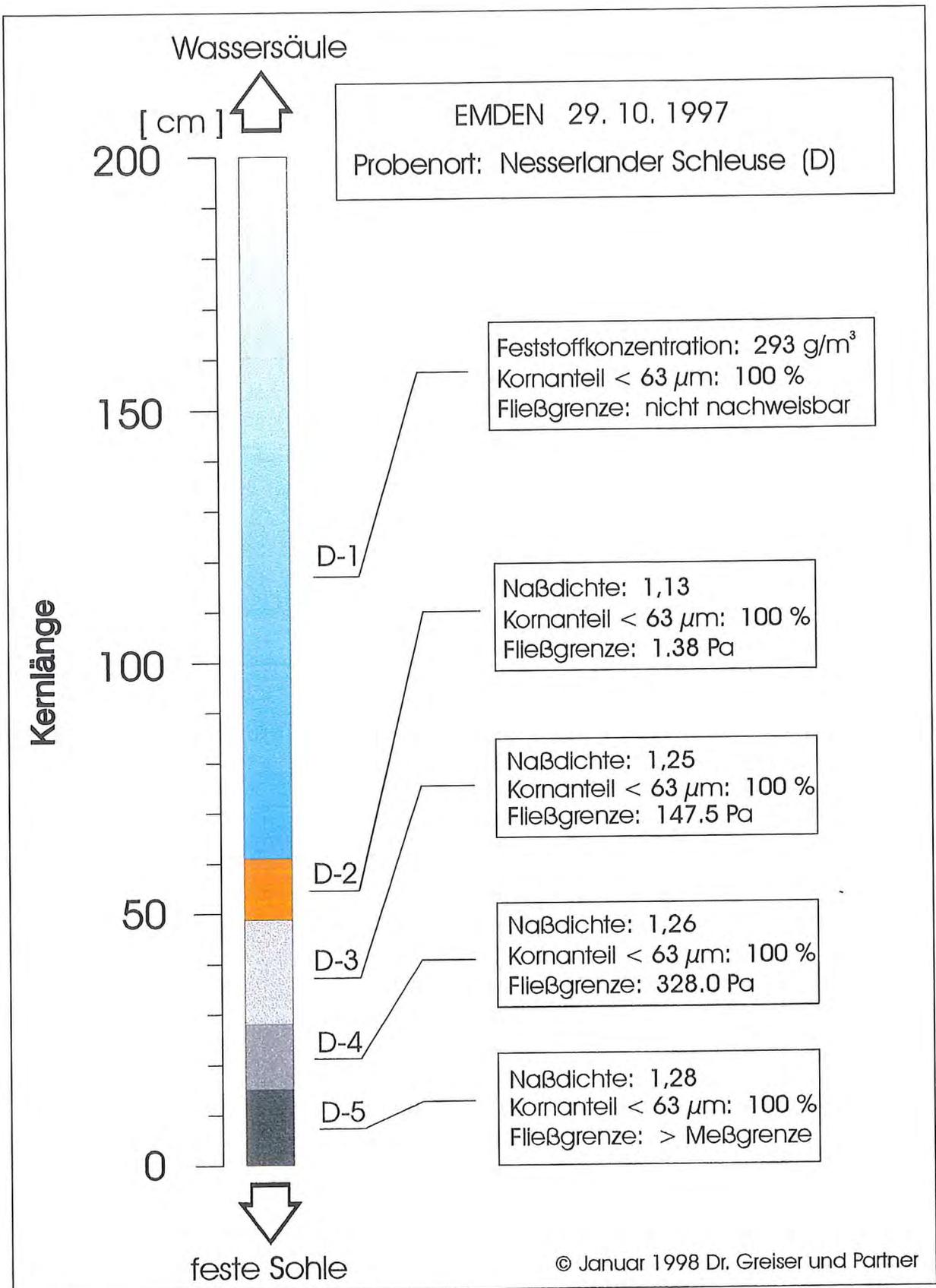


Abbildung 5: Mächtigkeiten und Abfolge der Sedimentschichten des Sedimentkernes am Probenort D "Nesserlander Schleuse" sowie Naßdichte, Anteil der Mineralkörner < 63 μm und Fließgrenzen der einzelnen Sedimentschichten. Die Schicht D-1 ist eine Schwebstoffsuspension. Die Schicht D-2 kann als Fluid Mud bezeichnet werden. Bei den Schichten D-3 bis D-5 handelt es sich um Schlack, dessen Konsolidierungsgrad mit zunehmender Sedimenttiefe ansteigt.

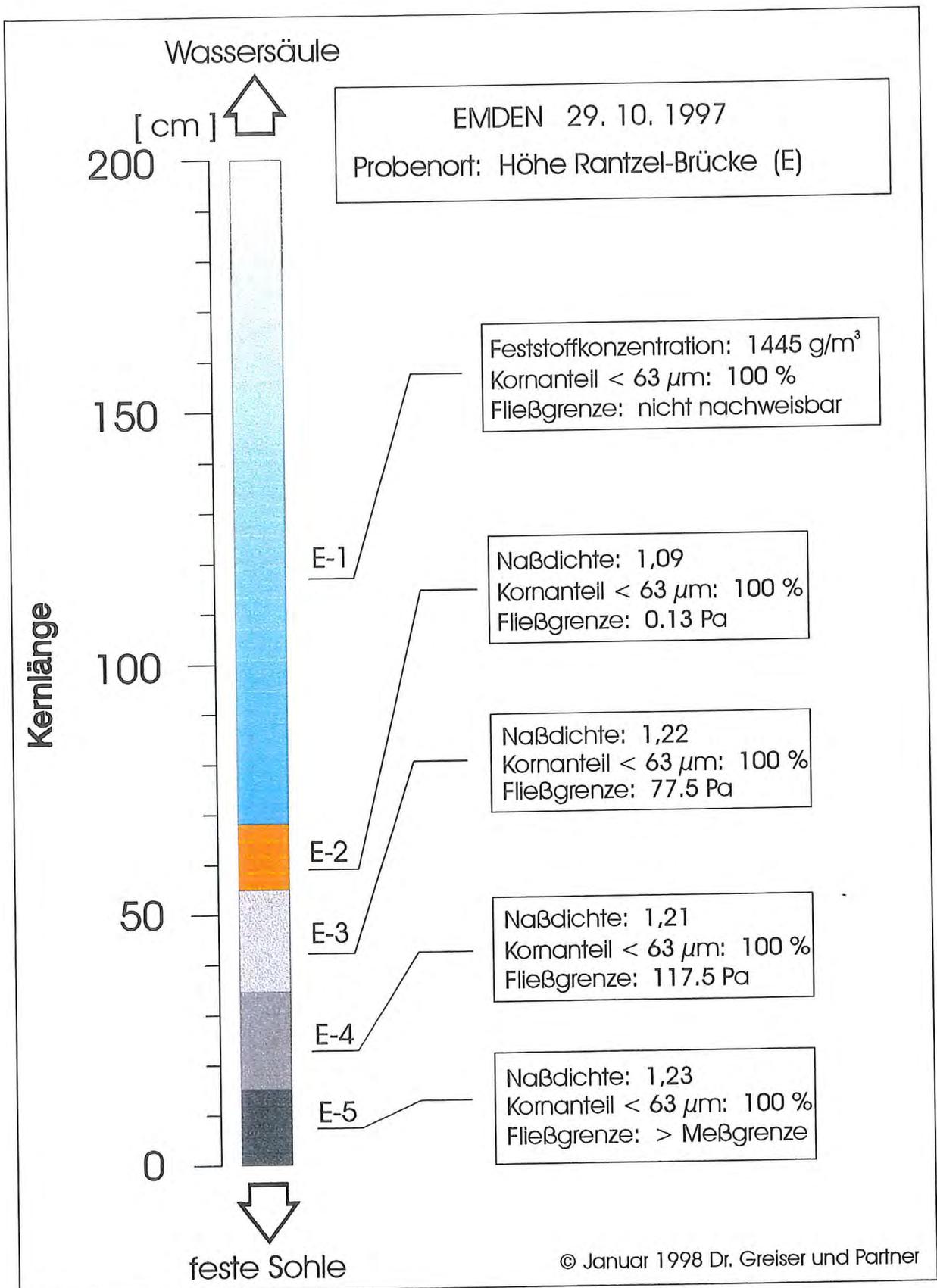
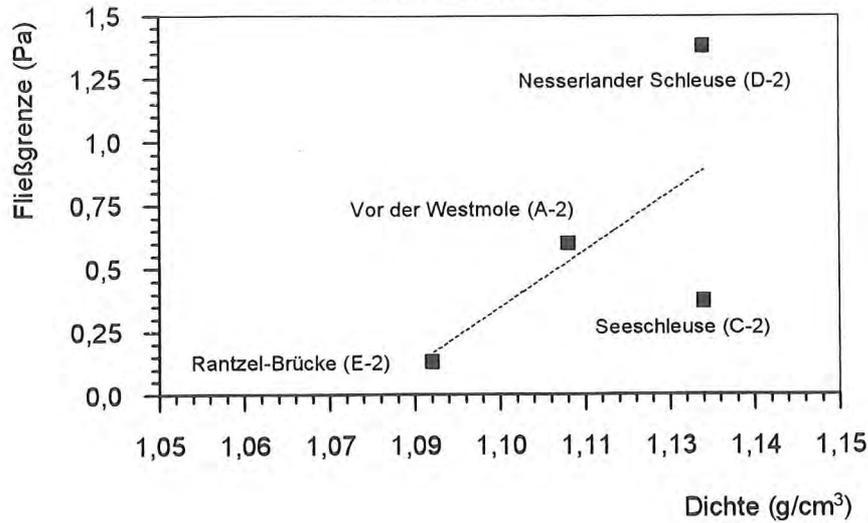


Abbildung 6: Mächtigkeiten und Abfolge der Sedimentschichten des Sedimentkernes am Probenort E "Höhe Rantzel-Brücke" sowie Naßdichte, Anteil der Mineralkörner < 63 µm und Fließgrenzen der einzelnen Sedimentschichten. Die Schicht E-1 ist eine Schwebstoffsuspension. Die Schicht E-2 kann als Fluid Mud bezeichnet werden. Bei den Schichten E-3 bis E-5 handelt es sich um Schlack, dessen Konsolidierungsgrad mit zunehmender Sedimenttiefe ansteigt.

### Fluid Mud-Proben



Lineare Regression: (N = 4)

$$y = a + bx$$

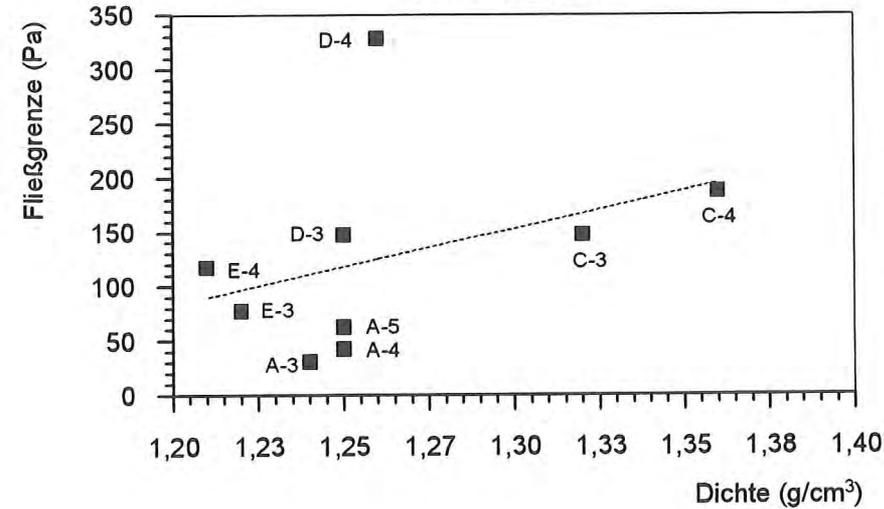
$$a = -19.65$$

$$b = 18.18$$

Korrelationskoeffizient :  $r = 0.643$

Irrtumswahrscheinlichkeit:  $p = 36 \%$

### Schlickproben



Lineare Regression: (N = 9)

$$y = a + bx$$

$$a = -763.68$$

$$b = 705.50$$

Korrelationskoeffizient :  $r = 0.367$

Irrtumswahrscheinlichkeit:  $p = 33 \%$

Abbildung 7:

Korrelationsbeziehung zwischen den Parametern Naßdichte ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) und Fließgrenze (Pa) der im Emdener Hafen gezogenen Fluid Mud- und Sedimentproben. In den gemessenen Dichte- und Fließgrenzenbereichen bestehen keine signifikanten Korrelationen.

Die Buchstaben/Zahlenkombinationen entsprechen den Sedimentschichtenbezeichnungen in den Abbildungen 2 bis 6. Im oberen Bild sind zusätzlich die zu den Probenbezeichnungen A, C, D und E gehörenden Probenorte genannt.

Tabelle 1: Laborergebnisse der Sedimentuntersuchungen.

© Dezember 1997 Dr.Greiser und Partner

Probenbezeichnung Schicht	Naßdichte g/cm <sup>3</sup>	Feststoffdichte g/cm <sup>3</sup>	Wassergehalt %	Konzentration mg/l	Glühverlust %	Fließgrenze Pa	Korngrößenverteilung der mineralischen Fraktion in Prozent						
							0-10 µm	10-20 µm	20-40 µm	40-63 µm	63-100 µm	100-200 µm	< 63 µm
A-1				623	13.62		40.75	24.33	33.58	1.34	0.00	0.00	100.00
A-2	1.11				13.43	0.6	41.72	22.25	35.76	0.27	0.00	0.00	100.00
A-3	1.24	3.01	71.29		12.72	30.6	38.53	29.08	24.93	6.70	0.76	0.00	99.24
A-4	1.25	2.93	70.09		13.06	42.6	44.73	31.48	23.79	0.00	0.00	0.00	100.00
A-5	1.25	2.65	67.61		12.50	62.6	34.60	29.92	35.48	0.00	0.00	0.00	100.00
B	1.40	2.34	50.13		8.40	zu zäh	11.72	20.47	41.91	17.72	7.89	0.29	91.82
C-1				524	14.38		32.05	22.78	34.85	10.32	0.00	0.00	100.00
C-2	1.13				12.63	0.4	31.41	21.49	36.09	11.01	0.00	0.00	100.00
C-3	1.32	2.42	58.35		8.95	147.5	27.81	24.74	47.45	0.00	0.00	0.00	100.00
C-4	1.36	2.52	55.95		8.92	187.5	25.53	26.82	31.19	14.12	2.34	0.00	97.66
C-5	1.35	2.58	57.26		9.24	zu zäh	22.49	26.56	31.31	8.64	11.00	0.00	89.00
D-1				293	17.17		59.87	38.24	1.89	0.00	0.00	0.00	100.00
D-2	1.13				15.84	1.4	62.66	35.68	1.66	0.00	0.00	0.00	100.00
D-3	1.25	2.59	67.33		13.61	147.5	50.03	41.62	8.35	0.00	0.00	0.00	100.00
D-4	1.26	2.44	64.81		13.62	328.0	29.86	29.55	29.52	11.07	0.00	0.00	100.00
D-5	1.28	2.46	63.05		13.51	zu zäh	22.43	26.70	42.62	8.25	0.00	0.00	100.00
E-1				1445	12.32		58.79	35.27	5.94	0.00	0.00	0.00	100.00
E-2	1.09				13.38	0.1	57.96	39.28	2.76	0.00	0.00	0.00	100.00
E-3	1.22	2.55	70.50		13.67	77.6	43.29	37.53	19.18	0.00	0.00	0.00	100.00
E-4	1.21	2.42	70.36		13.91	117.5	34.48	33.37	32.15	0.00	0.00	0.00	100.00
E-5	1.23	2.20	66.09		13.40	zu zäh	29.41	28.98	30.42	10.95	0.24	0.00	99.76