# Eine Gammasonde zur Schlickdichte-Bestimmung: ihre Entwicklung, Erprobung und Bewährung im Feldeinsatz

Von H.-U. FANGER, E. BÖSSOW und H. KUHN

## Zusammenfassung

Im Rahmen des KFKI-Projekts "Verhalten von Schlick und Schwebstoffen in Ästuaren" wurde eine fierbare Gammasonde zur Schlickdichte-Bestimmung in Transmissionsgeometrie entwickelt, gebaut, in mehreren Feldeinsätzen im Hamburger Hafen sowie in der Unterweser erprobt und für erste Vermessungsaufgaben verwendet. In Abgrenzung zu anderen Verfahren werden Methode, Merkmale der Sonde und Ergebnisse beschrieben.

## Summary

A submersible gamma probe for determining density based on transmission geometry measurements was developed for off-ship use in the context of the KFKI project "Mud and Suspended Matter in Estuaries". The gamma probe was tested in Hamburg Harbor and in the Lower Weser Estuary. The probe is described, the measurement technique compared with others, and results are presented.

#### Inhalt

1.	Einführung	0
2.	In-situ-Verfahren zur Untersuchung der Gewässersohle 19	0
	2.1 Echolotung	0
	2.2 Radiometrie	1
3.	Radiometrische Dichtemessung 19	2
	3.1 Prinzip	2
	3.2 Wahl des Verfahrens	13
	3.3 Kalibrierbarkeit 19	13
4.	Zum Aufbau der Gammasonde 19	15
	4.1 Mechanische Ausführung und Strahlungsverhältnisse 19	15
	4.2 Sensoren	17
	4.3 Signalverarbeitung	17
5.	Tests und Erprobungen	18
	5.1 Mechanische Eigenschaften 19	8
	5.2 Auflösung und Statistik 19	8
	5.3 Reproduzierbarkeit und Richtigkeit	0
6.	Meßeinsätze	1
	6.1 Unterweser	)1
	6.2 Hamburger Hafen	3
7.	Weiterentwicklung	)4
8	Schriftenverzeichnis 20	6

## 1. Einführung

Die Gewässersohle von Fahrrinnen und Hafenbecken ist sowohl unter dem wichtigen Aspekt der Schiffbarkeit als auch in Zusammenhang mit Transportprozessen wie Umlagerung von Schlickfeldern bzw. Sedimentation und Resuspension von Schwebstoffen ein interessantes Untersuchungsobjekt.

Daher wurde auf Anregung der vom Bundesminister für Forschung und Technologie unterstützten KFKI-Projektgruppe "Schlick und Schwebstoffe in Ästuaren" beim GKSS-Forschungszentrum Geesthacht eine Fiersonde entwickelt und gebaut, mit der in situ vertikale Dichteverteilungen und – daraus ableitbar – die horizontale Ausdehnung sowie die zeitliche Veränderung von Schlickfeldern auf dem Gewässergrund bestimmt werden können. Antrieb zu dieser Entwicklung war die Erfahrung, daß mit der seit langem praktizierten Echolotung vom fahrenden Schiff zwar relativ rasch ein ausgedehnter Überblick über die Grenzfläche Wasser/Boden zu erhalten ist, aber quantitative Aussagen über die Festigkeit bzw. Dichte der Grenzschicht oder darunterliegender Schichten nach derzeitigem Stand der Technik nicht möglich sind.

Es war naheliegend, bei der Entwicklung der Sonde die auf dem Gebiet der Dichtemessung bewährte radiometrische Methode der Gammastrahlungsabsorption bzw. -transmission zu verwenden. Damit unterscheidet sich das hier beschriebene Meßgerät von jüngst auch kommerziell angebotenen Fiersonden, die nach dem Rückstreuprinzip arbeiten. Eigene Wege wurden entsprechend in der mechanischen Konstruktion, im Aufbau der elektronischen Schaltkreise und in der Datenverarbeitung beschritten.

#### 2. In-situ-Verfahren zur Untersuchung der Gewässersohle

#### 2.1 Echolotung

Die Echolotung ist eine seit langem praktizierte Methode der Wassertiefenmessung. Bei als bekannt vorausgesetzter Schallgeschwindigkeit im Wasser dient als Maß für die Wassertiefe die halbe Laufzeit zwischen Aussendung und Wiederkehr eines am Boden reflektierten (Ultra-) Schallsignals. Die Stärke der Reflexion ist dabei proportional dem Gradienten des Produkts aus Dichte und Schallgeschwindigkeit; daher sind bei allmählichen Übergängen zwischen Wasser und Sediment, wie sie bei schlickhaltigen Gewässersohlen angetroffen werden, die Echohorizonte oft schlecht definiert. Der Schall dringt in diesem Fall je nach Dämpfung mehr oder weniger tief in die Schlickschicht ein, wobei Frequenzen unter 50 kHz deutlich größere Reichweiten haben als höhere. Auf dieser Tatsache basieren kommerzielle Vermessungsecholote mit typischen Frequenzpaarungen von 15/100 kHz oder 33/210 kHz, mit denen in günstigen Fällen – allerdings nicht streng reproduzierbar – Schlickschichten über hartem Boden im Echogramm sichtbar gemacht werden können (s. a. MÜLLER, ibidem).

Zum Vergleich zwischen Echolotung und Dichtebestimmung über Probennahme wurde bereits 1967 ein aufschlußreiches Experiment in einem großen Schlicktank durchgeführt, dessen Ergebnisse nach HELLEMA (1979) in Abb. 1 wiedergegeben sind. Über 32 Tage nach dem Einfüllen des Schlicks wurde das Konsolidierungsverhalten akustisch und durch Beprobung verfolgt. Wie man deutlich erkennt, ändern sich erstens die Dichteverhältnisse in der gesamten Zeit (vor allem in den ersten fünf Tagen) recht drastisch, und zweitens verlaufen die Echohorizonte keineswegs parallel zu den Dichtehorizonten. Der 30-kHz-Horizont z. B. bewegt sich zwischen den Dichtewerten 1,20 und 1,27 g/ccm, während höherfrequente



Abb. 1. Zeitliche Entwicklung von Echo- und Dichtehorizonten (Isopyknen) bei einem Schlicktank-Experiment nach J. A. HELLEMA (1979)

Reflexionen recht gut der Wasser-/Schlick-Grenze folgen, wenn auch um 10-20 cm zu größeren Tiefen versetzt.

Im Gegensatz zum erfolgreichen Einsatz von niederfrequenten Echoloten in der marinen Sedimentforschung scheint eine quantitative Schlickdickenmessung in Binnengewässern und Tideflüssen wegen der viel größeren Inhomogenität (z. B. durch Gasblasen, Steinchen, größere Komponenten organischen Materials) auch nach JURASCHEK et al. (1981) und BARC-ZEWSKI (1984) kaum möglich zu sein.

## 2.2 Radiometrie

Von den radiometrischen Verfahren zur Untersuchung der Gewässersohle ist in jüngster Zeit eine passive, die vorhandene Eigenstrahlung nutzende Methode zur Unterscheidung von Sedimenten nach ihrem Gehalt an Tonen bzw. zur Bestimmung des Sand-/Schluff-Verhältnisses diskutiert worden (FÜHRBÖTER, 1984). Der Effekt beruht darauf, daß sich Radioisotope (überwiegend K-40) in komplexen Sorptionsprozessen an den Oberflächen der Mineralkörner anlagern und damit vor allem die Tonmineralfraktion mit ihrer spezifisch großen Oberfläche strahlungsaktiv erscheinen lassen. Wenn die Methode zur großflächigen Kartierung eingesetzt werden soll, muß allerdings sichergestellt sein, daß weder lokale Schwankungen des natürlichen Untergrundes (z. B. unterschiedliche Konzentrationen von Uran und deren Zerfallsprodukten im darunterliegenden Gestein) noch anthropogene Einflüsse (z. B. radioaktive Abwässer, Fallout aus früheren Atomwaffentests) die Aussagen verfälschen.

Aktive Methoden verwenden eigene Strahlungsquellen und nutzen Effekte entweder der Streuung, Schwächung oder der Erzeugung einer Reaktionsstrahlung aus. Tatsächlich lassen sich durch Verwendung isotopischer Neutronenquellen wie Cf-252 in Sondenanordnungen (z. B. nach MOXHAM, 1975) die Konzentrationen einiger Elemente in Flußsedimenten in situ nachweisen. Allgemeinere Verwendung fanden allerdings Schlepp- und Fiersonden mit eingebauten Gammastrahlungsquellen, um aus der Rückstreuintensität Informationen über Dichte, Porosität oder Materialart zu erhalten. Mit einem über den Meeresboden geschleppten Gerät dieser Art war es nach BECKMANN (1973) möglich, zwischen Sand, Seegras, Beton und Schlick zu unterscheiden. Das britische Forschungszentrum Harwell entwickelte bereits vor geraumer Zeit für die radiometrische Dichtebestimmung Fiersonden, die von holländischen Behörden für den Einsatz im Europort (Rotterdam) übernommen und weiterentwickelt wurden (HEL-LEMA, 1979). Hauptsächlich aus Gründen der Mechanik und der Handhabbarkeit blieb dabei das vom physikalischen Prinzip bessere Verfahren, die Transmissionsmessung, auf der Strecke. Auf diesen Punkt soll im folgenden noch näher eingegangen werden.

#### 3. Radiometrische Dichtemessung

## 3.1 Prinzip

Grundlage der Dichtebestimmung mit Gammastrahlen ist die Tatsache, daß in einem Energiebereich zwischen etwa 0,5 und 1,5 MeV, in dem die sog. Compton-Wechselwirkung vorherrscht, die Wahrscheinlichkeit für Streuprozesse proportional der Anzahl der Elektronen pro Volumeneinheit (Elektronendichte) ist. Diese wiederum ist über den Faktor Z/A mit der Materialdichte  $\varrho$  verknüpft, wobei Z die Ordnungszahl und A das Atomgewicht eines chemischen Elementes im Material bedeuten. Für einen Stoff einheitlicher Zusammensetzung folgt daraus das bekannte exponentielle Schwächungsgesetz für das Verhältnis der Intensitäten mit (I) und ohne (I<sub>0</sub>) streuendes Material im Strahlengang

$$I/I_0 = \exp(-\overline{\mu} \varrho L)$$

Dabei steht µ für den Massenschwächungskoeffizienten und L für die Strahlenweglänge.

Für die Meßtechnik kann der erwähnte Wechselwirkungsprozeß grundsätzlich in Transmissions- oder in Rückstreugeometrie ausgenutzt werden. Im ersten Fall wird die Reststrahlung, also der Strahlungsanteil, der nach Streuung (und Absorption) gemäß dem erwähnten Schwächungsgesetz verbleibt, im zweiten Fall ein durch Streuung in eine andere Richtung umgelenkter Strahlungsanteil mit einem geeigneten Detektor nachgewiesen. Nur beim Trans-



Abb. 2. Streustrahlungsintensität I in Abhängigkeit von der Dichte der Streusubstanz bei wenig gebündelter Strahlung aus einem Radiumpräparat (durchgezogene Kurve) bzw. einer Cobalt-60-Quelle (gestrichelte Linie) nach W. HARTMANN (1979, S. 995)

missionsverfahren kann durch sorgfältige Strahlkollimierung und Energieselektion (Spektroskopie) eine Vermischung beider Effekte vermieden werden, d. h., daß außer der geschwächten Primärstrahlung auch noch Streustrahlung im Transmissionssignal erfaßt wird. Die spektroskopische Trennung ist möglich aufgrund der Winkelabhängigkeit der Energie beim Compton-Streuprozeß. Im Gegensatz dazu lassen sich beim Streuverfahren Streueffekt und Schwächung nicht trennen, da sowohl Primär- wie Sekundärstrahl auf dem Wege zum und vom Ort des Streuereignisses einer Schwächung unterliegen. Die Auswirkung dieses Sachverhaltes ist deutlich in dem Diagramm der Abb. 2 nach HARTMANN (1979) zu erkennen. Die Streuintensität steigt bei kleiner Dichte des umgebenden Materials zunächst mit wachsender Dichte an, weil die Zahl der Streuprozesse pro Volumeneinheit zunimmt, und fällt dann von einer kritischen Dichte an wieder ab, weil nun die Schwächung der dominierende Effekt ist. Die Lage der kritischen Dichte kann durch die Geometrie (Abstand Quelle–Detektor) oder die Energie der Strahlung (s. a. die unterschiedlichen Kurven für Gammastrahlung aus einer Co-60- bzw. einer Ra-Quelle) variiert werden.

## 3.2 Wahl des Verfahrens

Nach den prinzipiellen Unterscheidungsmerkmalen der beiden radiometrischen Methoden der Dichtebestimmung, wie sie im vorangehenden Abschnitt dargelegt wurden, ist es möglich, Argumente für die eine oder andere Meßgeometrie anzuführen:

- Das Rückstreuverfahren (RV) kommt bei Anwendung in einer Fiersonde für Schlickuntersuchungen mit nur einem Rohrkörper aus, in dem Strahlenquelle, Abschirmung, Detektor und Elektronik untergebracht sind. Bei der Transmissionsmethode (TM) müssen Detektor mit Elektronik und Strahlenquelle in zwei getrennten Rohren montiert werden.
- Beim RV hängt das Signal in nichteindeutiger Weise von der Dichte ab; die Doppeldeutigkeit kann allerdings durch Einengung des Meßbereichs und geeignete Wahl der Geometrie vermieden werden.
- Bedingt durch die erforderliche sorgfältige Abschirmung des Detektors vor direkter Strahlung aus der Quelle und dem damit verbundenen größeren Abstand ist beim RV die vertikale Auflösung von Fiersonden signifikant schlechter als bei der TM.
- Das Umfeld, aus dem die Streustrahlung in den Detektor gelangt, ist räumlich sehr eng, bzw. der Nahbereich um die Sonde erhält beim RV eine starke Wichtung. Dies hat zur Folge, daß kleine Inhomogenitäten (z. B. Steinchen, Gasblasen etc.) in diesem Bereich einen größeren Einfluß auf die Dichtemessung haben.
- Da die Intensität der Streustrahlung im Vergleich zur Reststrahlung bei der TM klein ist, verbietet sich beim RV eine Energiediskriminierung von selbst. Die dadurch gegebene Vermischung energie- und von der Ordnungszahl Z der Elemente abhängiger Wechselwirkungsprozesse macht das Streuverfahren grundsätzlich schwerer kalibrierbar.

Insgesamt haben diese Gründe den Ausschlag dafür gegeben, daß bei der in diesem Artikel beschriebenen Entwicklung das Rückstreuverfahren nicht in Betracht gezogen wurde.

## 3.3 Kalibrierbarkeit

Wegen des genannten Z/A-Faktors in der Beziehung zwischen Elektronen- und Materialdichte gibt es eine gewisse Chemismus-Abhängigkeit bei der radiometrischen Dichtebestimmung derart, daß Elemente sehr hoher Ordnungszahl die Strahlung stärker schwächen, als der Die Küste, 42 (1985), 189-207 194

> Dichte des Materials entspräche, und vor allem der Wasserstoff wegen Z = A zur Compton-Streuung rund doppelt so stark beiträgt wie Elemente bis zum Jod. Hinzu kommt, daß neben dem Compton-Streuprozeß zu einem geringeren Grade eine weitere Wechselwirkung, die sehr viel stärker Z-abhängige Photoabsorption, die Strahlung schwächt. Es ist daher keineswegs selbstverständlich, daß für beliebige Materialzusammensetzungen ein einfach kalibrierbarer Zusammenhang zwischen Transmissionssignal und Dichte besteht.

> Andererseits sind aber die Massenschwächungskoeffizienten der Elemente theoretisch und experimentell sehr gut abgesichert; d. h., bei bekannter chemischer Zusammensetzung läßt sich die Schwächung von Gammastrahlung einer bestimmten Energie rechnerisch hinreichend genau vorhersagen. Solche Rechnungen wurden zu Beginn der Entwicklung mit Daten aus dem "Datenpapier Hamburger Hafenschlick" von Strom- und Hafenbau 1981 durchgeführt, wobei eine Variation der Elemente gemäß unterschiedlicher Anteile mineralischer

# Schlamm



Abb. 3. Typische Elementzusammensetzung von Trockenschlick aus dem Hamburger Hafen nach "Strom- und Hafenbau, Hamburg" (1981)

(Feldspat, Quarz, Tone) und organischer Komponenten in Mischungen innerhalb des Dichtebereiches zwischen 1,0 und 1,3 g/ccm berücksichtigt wurde. Eine typische Elementverteilung für diesen Schlick ist in Abb. 3 wiedergegeben. Das Ergebnis der Rechnungen auf der Basis dieser Daten war, daß der Chemismuseinfluß unter 3 ‰ liegt und damit vernachlässigt werden kann.

Später durchgeführte Tankversuche mit der Gammasonde bestätigten diese Prognose offensichtlich: In dem Dichte-Kalibrierungs-Diagramm von Abb. 4 sind für die sicherlich nicht einheitlich zusammengesetzten Schlickproben aus der Unterweser (Nordenham) und der Elbe (Tidekanal und Seehafen 1, Hamburg) keine systematischen Abweichungen von dem erwarteten linearen Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Transmission und der Dichte zu erkennen.



Abb. 4. Experimentelle Beziehung zwischen Schlickdichte q und dem natürlichen Logarithmus der Transmission t, bestimmt durch Messungen an Schlickproben aus Weser und Elbe

4. Zum Aufbau der Gammasonde

## 4.1 Mechanische Ausführung und Strahlungsverhältnisse

Abb. 5 zeigt den konstruktiven Aufbau der Gammasonde. Sie besteht aus einem ca. 3 m langen Rohrkörper, der im einen Schenkel die Strahlenquelle, auf gleicher Höhe im anderen Schenkel einen Szintillationsdetektor enthält. Dabei ist die Quelle in einem Wolfram-Vollzylinder untergebracht, der zugleich als hochwertige Abschirmung und als Kollimator dient. Die Achse der konusförmigen, 25 cm langen Transmissionsmeßstrecke befindet sich etwa 20 cm oberhalb der Spitzen. Zur Gewährleistung der Längenkonstanz der Meßstrecke, die 196



Abb. 5. Konstruktiver Aufbau der GKSS-Gammasonde

mitentscheidend für die Reproduzierbarkeit der Dichtebestimmung ist, wurde zur Versteifung ein flacher Steg in etwa doppelter Höhe angebracht. In den Freiräumen über Detektor und Elektronik bzw. über der Strahlenquelle sind zur zusätzlichen Beschwerung der Sonde Bleigewichte eingesetzt, so daß die Sonde, am Stahldraht gefiert, auch ohne kinetische Energie aus der Fiergeschwindigkeit, nur aufgrund ihres Eigengewichtes, in schlickige Böden einzudringen in der Lage ist.

Über dem Querrohr befindet sich im Abstand von 234 cm oberhalb der Transmissionsmeßstrecke der Drucksensor mit einer Öffnung nach außen; mit dem Signal dieses Sensors, als Vorsichtsmaßnahme zur Vermeidung einer Verstopfung durch Schlick bewußt hoch angebracht, wird die momentane Eintauchtiefe bestimmt. Da starke Schräglagen der Gammasonde zu Fehlmessungen führen könnten und Abweichungen von der vertikalen Lage in jedem Fall für die Berechnung der Tiefendifferenz von Dichtemeßstrecke und Drucksensor berücksichtigt werden müssen, wird auch die Neigung der Sonde in der Rohrebene sowie senkrecht dazu mit zwei Inklinometern gemessen.

Als Strahlenquelle wird ein 0,37-GBq-Cs-137-Präparat mit der Gammaenergie von 662 keV und einer Halbwertszeit von 30,17 Jahren verwendet. An Luft beträgt die Äquivalentdosisleistung in 10 cm Abstand vom Quellrohr ca. 25  $\mu$ Sv/h, in Strahlrichtung direkt hinter dem Detektor ca. 100  $\mu$ Sv/h. Für den Transport wurde eine am Quersteg fixierbare, asymmetrische, ringförmige Abschirmung aus Edelstahl gefertigt. In längeren Meßpausen kann die Sonde in einem Bleibehälter oder in einer mit Wasser gefüllten Tonne gefahrlos gelagert werden.

#### 4.2 Sensoren

Als Strahlendetektor in der Transmissionsmeßstrecke ist ein NaJ-(Tl-)Kristall für einen Temperaturbereich zwischen -20° und 100°C sowie für eine Stoßfestigkeit bis 10 g eingebaut. Zur Wandlung der im Kristall durch die Gammastrahlung erzeugten Lichtblitze (Szintillationen) in elektrische Ströme und zu deren millionenfacher Verstärkung dient ein Photomultiplier (Sekundärelektronenvervielfacher), auf den der Kristall mit einem optischen Kitt montiert ist.

Für die Tiefenmessung wird ein Präzisionsdruckaufnehmer verwendet, der ein Stromsignal nach dem DMS-(Dehnmeßstreifen-)Verfahren erzeugt. Der Gesamtmeßbereich ist 5 bar abs. bei einer Genauigkeit von 0,1 % v. E., also  $\pm$  5 cm WS. Nach dem Prinzip eines elektromagnetisch kompensierten Pendels arbeiten die in der Sonde eingesetzten Zweiachsen-Neigungswinkelgeber (Inklinometer). Ihre Genauigkeit ist unter 0,5° bis zu 10°, unter 2,0° bis zu 90° Schräglage.

## 4.3 Signalverarbeitung

Bei der hier beschriebenen Version eines Vorprototyps der Gammasonde, die im Rahmen der in Kapitel 7 beschriebenen Weiterentwicklung gerade bezüglich der Datenübertragung und Signalverarbeitung merkliche Änderungen erfahren hat, wird die Spannungsversorgung und die Analogsignalübertragung über mehradrige Kabel bewerkstelligt.

Die aus dem Szintillationsdetektor der Sonde zum Bordgerät übermittelten Impulse mit energie-proportionalen Amplituden werden in einem Einkanaldiskriminator sortiert, so daß nur die dem Photopeak entsprechenden Ereignisse als Zählrate im Takt von <sup>1</sup>/<sub>10</sub> s erfaßt und einem Mikroprozessor zugeführt werden. Nach jedem dieser kurzen Meßintervalle wird die Zählrate über eine einprogrammierte Kalibrierfunktion mit manuell änderbaren Konstanten in Dichtewerte umgerechnet und über DA-Wandler als analoge Größe auf einem xy-Schreiber als Funktion der Tiefe aufgetragen. Die der Tiefe entsprechende Analoggröße wird mit vorwählbarer Nullpunktsunterdrückung nach angepaßter Verzögerungszeit aus der Differenz der Druckwerte des erwähnten Sondensensors und eines zweiten Sensors im Bordgerät abgeleitet, um auch Luftdruckschwankungen zu berücksichtigen. Der Neigungswinkel aus dem Inklinometer erscheint in digitaler Anzeige und steht für Aufzeichnungen auch analog zur Verfügung. Erst in der späteren Version wird auch die Tiefenkorrektur über den Neigungswinkel vom Rechner übernommen.

Wegen der erwähnten Einkanaldiskriminierung ist die Stabilität der Verstärkung für die Reproduzierbarkeit der Dichtemessungen von großer Bedeutung. Sie wird durch eine auf die Multiplier-Spannung einwirkende Zweikanal-Stabilisierungsschaltung auf zuverlässige Weise erreicht. – Weitere Einzelheiten können in diesem Rahmen nicht erläutert werden.

## 5. Tests und Erprobungen

## 5.1 Mechanische Eigenschaften

Da der Schenkelrohrdurchmesser der Sonde durch Detektorkristallmaße und Ausdehnung des Abschirm-Kollimators der Quelle festgelegt war, mußte durch optimale Beschwerung ein günstiges Eindringverhalten errreicht werden. Entsprechende Vorversuche mit Einzelrohren im Schlicktank ergaben dabei Richtwerte von ca. 30 kg pro Rohr mit einem Durchmesser von 70 mm, die sich bei In-situ-Tests mit dem H-förmigen Sondenkörper voll bestätigten. Die maximale Eindringtiefe ist allerdings stark von der individuellen Schichtung des Sediments abhängig. Vereinzelt wurden Dichtehorizonte über 1,60 g/ccm gemessen, mitunter kam die Sonde bei einem Endwert von 1,10 g/ccm zum Stillstand. Im Tonnenhof von Bremerhaven z. B. versank die Sonde in ihrer vollen Länge (über 3 m) im Schlick, während an anderen Stellen mit dünner Schlickschicht über hartem Grund die Spitze sehr rasch nicht weiter eindringen konnte, obwohl die 20 cm oberhalb gelegene Meßstrecke noch Dichtewerte unterhalb 1,20 g/ccm anzeigte.

Die Schräglage der Sonde, die in Hafenbecken mit wenig Strömung ohnehin vernachlässigbar klein ist, hat sich auch in Gebieten mit stärkerer Strömung, wie in der Unterweser bei Nordenham, als unproblematisch erwiesen, so daß auf dafür vorbereitete Fairings und Stabilisierungsflossen verzichtet werden konnte.

Vor dem Einsatz war die Gammasonde in einem Drucktank der GUSI beim GKSS-Forschungszentrum bei 3-4 bar Überdruck auf Dichtigkeit geprüft worden.

#### 5.2 Auflösung und Statistik

Obwohl Fiersondenmessungen in der Schichtauflösung nicht mit Röntgenaufnahmen von Sedimentkernen konkurrieren können (sieht man von möglichen Problemen bei der Kernentnahme einmal ab), interessiert die erreichbare Trenngenauigkeit generell. Leider setzt ein entsprechender In-situ-Versuch zur Ermittlung dieser Kenngröße einen geeigneten, gutuntersuchten Gewässergrund voraus. Da diese Voraussetzung bisher nicht gegeben war, wurde in einem einfachen Tankversuch eine Sedimentschichtung durch ein Stufenprofil aus Aluminium simuliert. Die Dicke einer Stufe in Relation zur gesamten Transmissionsstrecke (25 cm) gibt dabei den Wichtungsfaktor zur Dichte 2,70 g/ccm, mit dem das Aluminium zur mittleren Dichte beiträgt. – Das Ergebnis ist in Abb. 6 dargestellt. Die gestrichelte Kurve stellt den Sollwert, die durchgezogene, fluktuierende Kurve den Meßwert dar. Obwohl das Experiment einen ungefähren Eindruck von der Auflösung gibt, darf das Ergebnis nur bedingt quantitativ beurteilt werden; denn eine 1 cm dicke Stufe aus Aluminium in Wasser beispiels-



Abb. 6. Sondentest mit einem Stufenprofil aus Aluminium. Die gestrichelte Treppenkurve entspricht der rechnerisch über die anteiligen Transmissionswege in Aluminium und Wasser gemittelten Dichte, die durchgezogene Kurve den Meßwerten der für Schlick kalibrierten Sonde. Fiergeschwindigkeit war 1 cm/s

weise kann strahlengeometrisch nicht äquivalent zu einer homogenen Sedimentschicht der Dichte 1,068 g/ccm sein. Wie man erkennt, liegen die Meßwerte bei den untersten Stufen systematisch etwas zu tief. Dies ist in Kleinwinkel-Streueffekten um das Profil herum begründet.

Ein weiterer Effekt, der die Vertikalauflösung bei Fiermessungen in der Praxis beeinflußt, ist die zeitliche Meßintervallgröße von <sup>1</sup>/<sub>10</sub> s. Bei empfehlenswerten Fiergeschwindigkeiten von 30–50 cm/s ergibt sich daraus ein vertikaler Meßpunktabstand von 3–5 cm.

Die Länge des Meßintervalls von <sup>1</sup>/10 s ist ein Kompromiß, der durch die gerade noch zulässige statistische Fluktuation der Zählrate und damit des Dichtewertes sowie durch die geforderte Vertikalauflösung bei vorgegebener Fiergeschwindigkeit bestimmt wird, wenn die Intensität der Strahlenquelle, also die Aktivität des Präparates, festgelegt ist. Obwohl höhere Aktivitäten im Prinzip denkbar sind, müßte dann das elektronische Impulsverarbeitungssystem auf höhere Zählraten ausgelegt werden, und es wären Auflagen bezüglich des Strahlenschutzes zu erwarten. Bei der jetzigen Auslegung der Gammasonde entspricht die Standardabweichung einer Einzelmessung 0,015 g/ccm, die bei der interpolierenden Glättung eines Fierprofils hinreichende Präzision gewährleistet.

## 5.3 Reproduzierbarkeit und Richtigkeit

Eine relativ abstrakte Meßmethode wird zumindest nach der Reproduzierbarkeit ihrer Ergebnisse beurteilt, wenn andere Möglichkeiten einer Überprüfung fehlen. Die Tankversuche mit Schlick, die das theoretisch erwartete Ergebnis einer guten Kalibrierbarkeit für Proben ganz verschiedener Herkunft lieferten, hatten zwar die prinzipielle Eignung erwiesen, aber damit nicht völlig die Möglichkeit von Artefakten bei der Messung von Fierprofilen in natura ausschließen können. So haben erste Versuche, die mitunter eine Inversion der üblichen Dichteschichtung zeigten, Spekulationen über mögliche Kompressionseffekte beim Eindringen der Gammasonde in die oberste Schlickzone oder aber "Auskolkungseffekte" in tieferen Schichten durch rasche Kippbewegungen ausgelöst. Die Kompressionshypothese kann durch eine einfache Überlegung, die vom Verdrängungsvolumen der Sonde und dem anteiligen zusätzlichen Material in der Transmissionstrecke ausgeht, leicht als bedeutungslos widerlegt werden. Die Effekte durch Kippbewegungen sind noch nicht abschließend untersucht; da aber der Neigungswinkel bei jeder Fierung fortlaufend mitregistriert wird, können "verdächtige" Profilabschnitte erkannt und u. U. in einer Wiederholungsmessung bestätigt oder verworfen werden. Als ein Beispiel für die Reproduzierbarkeit sind in Abb. 7 drei in kurzen Zeitabständen nacheinander gewonnene vertikale Dichteprofile vom Tonnenhof des WSA Bremerhaven dargestellt. Die Diagramme lassen durch den Vergleich gut erkennen, welche Strukturen echt und welche durch statistische Fluktuationen bedingt sind.



Abb. 7. Reproduzierbarkeit von Dichteprofilmessungen anhand von drei nacheinander gewonnenen Profilen im Tonnenhof des WSA Bremerhaven

Als besonders schwierig hat sich im Verlaufe der Erprobung die Überprüfbarkeit der radiometrischen Dichtebestimmung durch andere Methoden herausgestellt. Eine Übereinstimmung mit den Verfahren der Echolotung war aus den eingangs erwähnten Gründen, wonach Echohorizonte grundsätzlich nur dann auch Dichtehorizonte sein können, wenn diese mit einem Gradienten verknüpft sind, selten aussagekräftig. Ähnlich verhielt es sich mit Vergleichen, die über Sedimentkernentnahme angestellt wurden. Abgesehen von den Vorbehalten, die man bei der Probennahme mit Rohren bezüglich Depression, Kompression oder Schichtenvermischung haben kann, zeigte es sich, daß auch die Identität der Lokation nicht sorgfältig genug sichergestellt war. In Abb. 8 ist der Versuch gemacht, die während der MASEX-'83-Kampagne mit dem Kernentnahmegerät des WSA Bremerhaven gewonnenen und bei GKSS abschnittsweise auf ihre Dichte analysierten Proben mit den entsprechenden Gammasondenmessungen in Verbindung zu bringen. Aufgetragen ist die Häufigkeitsverteilung der Dichteabweichungen für experimentell gleiche Tiefe (gestrichelte Kurve) bzw. für um 25 cm korrigierte Tiefe (durchgezogene Kurve), was eine entsprechende Depression bei der Kernentnahme kompensieren würde. Trotz starker Streuung einiger Werte ist die Halbwertsbreite dieser Verteilung nicht schlecht, und durch die Korrektur wird offensichtlich eine gewisse Verbesserung bezüglich der Symmetrie erreicht, was die Annahme einer Depression im Kernentnahmerohr zu rechtfertigen scheint.

## 6. Meßeinsätze

## 6.1 Unterweser

Der erste längere Einsatz der Gammasonde fand bei der MASEX-'83-Kampagne statt, über die in einem separaten Artikel dieses Heftes (FANGER et al.) ausführlich berichtet ist. Neben einer Reihe anderer Aktivitäten wurden über volle fünf Tideperioden im Tag- und Nachtbetrieb rund alle zwei Stunden an drei etwa 500 m in Stromachse auseinanderliegenden Stationen über der bekannten Schlickrinne der Unterweser bei Nordenham Fierprofile der Gammasonde gefahren. Ein typisches Beispiel solcher Profile ist in Abb. 9 wiedergegeben, in der die stärker gezeichnete Kurve den Dichteverlauf über der auf die Wasseroberfläche bezogenen Tiefe darstellt. Die aus den vertikalen Dichteprofilen dieser Messungen abgeleiteten Zeitreihen für die NN-beschickten Tiefen der Dichtehorizonte 1,02 - 1,10 - 1,20 g/ccm (FANGER, ibidem) zeigen starke Schwankungen, die darauf zurückzuführen sind, daß bei dem Ouergefälle der Schlickrinne bereits Abweichungen um einige Meter von den Sollpositionen der drei Stationen genügten, um vergleichbare Bodenschichten in deutlich anderen Tiefen vorzufinden. Aus dem Ergebnis wurde die Erkenntnis gewonnen, daß zeitliche Veränderungen in der Mächtigkeit von Schlickablagerungen nur dann mit dieser Methode hinreichend sicher festzustellen sind, wenn äußerste Präzision bei der nautischen Positionierung und bei der Tiefenmessung aufgewendet wird. Bei Änderungen im cm-Bereich müssen im Mündungsbereich von Tideflüssen bei aus Druckmessungen gewonnenen Tiefenangaben auch Salzgehaltsschwankungen exakt berücksichtigt werden. Über die gesamte Einsatzdauer gab es keine Probleme im Betrieb der Gammasonde.



Abb. 8. Abweichungen experimentell bestimmter Dichtewerte aus Gammasonde und einem Kernentnahmegerät, aufgetragen als Häufigkeitsverteilung a) mit unkorrigiertem (gestrichelte Kurve) und b) mit korrigiertem (durchgezogene Kurve) Tiefenbezug (s. Text)



## GAMMA-SONDE MASEX '83 09/28 04:57

Abb. 9. Mit der Gammasonde gemessenes Vertikalprofil der Dichte in der Schlickrinne bei Nordenham (Unterweser). Zusätzlich aufgetragen ist die Neigung der Sonde gegen die Vertikale (dünne Kurve)

#### 6.2 Hamburger Hafen

Zahlreiche Erprobungen erfolgten auch – über einen Zeitraum von ca. zwei Jahren verteilt – in verschiedenen Becken des Hamburger Hafens, die fast alle vom Amt für Stromund Hafenbau, Hamburg, angeregt und auf Schiffen dieses Amtes mit tatkräftiger Unterstützung der Besatzungen durchgeführt wurden. Dabei nahmen die Erprobungen mehr und mehr den Charakter von systematischen Vermessungen an. Als erstes Beispiel für ein Ergebnis von Messungen im Kuhwerder Vorhafen ist in Abb. 10 eine Schlicklinse durch drei Isopyknen dargestellt. Als Abszisse ist die Entfernung von der Pier (Kuhwerder Höft) angegeben. Die bezifferten Pfeile kennzeichnen die Fierstationen bei der geradlinigen Querfahrt in nordwestlicher Richtung durch das Hafenbecken.

Das zweite Beispiel (Abb. 11) dokumentiert eine im November 1984 durchgeführte Meßaktion in den Becken Köhlfleethafen bis Dradenauhafen. Die Fierprofilmeßdichte (etwa 50 m Abstände in verschiedenen Längsprofilen) ist dem oberen Teil der Abbildung zu entnehmen. Im unteren Teil ist eine aus den Vertikalprofilmessungen abgeleitete Isoliniendarstellung für die Schlickmächtigkeit in 0,5-m-Schritten wiedergegeben. Über Einzelheiten, auch über Vergleiche mit Peilungen und daraus deduzierten Ablagerungsraten, wird an anderer Stelle berichtet (CHRISTIANSEN et al.).



Abb. 10. Schlicklinse im Hamburger Hafen/Kuhwerder Vorhafen, dargestellt durch Isopyknen aus Dichteprofilmessungen mit der Gammasonde

## 7. Weiterentwicklung

Angeregt durch das rege Interesse verschiedener Ämter an der Entwicklung der Gammasonde, zuletzt auch durch den Auftrag zum Bau einer zweiten Sonde für das WSA Bremerhaven, wurde das ursprüngliche Konzept im Hinblick auf einen praxisgerechten Einsatz in einigen Punkten wesentlich verbessert, ohne daß entscheidende Merkmale, die sich offensichtlich bewährt hatten, preisgegeben worden wären.

Die Signalübertragung und Stromversorgung für die Sonde erfolgt bei der neuen Version durch ein Einleiterkabel, das zugleich mechanisch tragende Funktion hat. Dies bringt beim Handling an Bord und bezüglich der Verschleißfestigkeit bedeutende Vorteile, erfordert allerdings eine Winde mit Schleifringen. Mit der damit notwendig gewordenen Telemetrie, die nach dem FSK-(Frequency shift key-)Verfahren arbeitet, mußte die Analogimpuls-Elektronikstufe, die bisher im Bordgerät untergebracht war, in die Sonde integriert werden. Die Telemetrie ist ein praxiserprobtes Signalübertragungssystem, das kommerziell von der Firma Meerestechnik und Elektronik (ME), Trappenkamp, gefertigt wird und multisonden-kompatibel ist; d. h., es können ohne Schwierigkeiten weitere Sensoren (z. B. für Leitfähigkeit etc.) an die Gammasonde mit angeschlossen werden.

Mit der gänzlich überarbeiteten Datenerfassung wurde die Möglichkeit geschaffen, die vertikalen Dichteprofile schon während der Messung on-line auf dem Bildschirm darzustellen und bei Interesse auf Plotter auszugeben; parallel dazu werden die Daten auf Floppy abgespeichert.

Im Hand-shake-Verfahren mit einem zweiten, zum Schiffsbetrieb gehörenden Rechner werden Positionsdaten, Zeiten und vorgewählten kritischen Dichten zugeordnete Tiefenwerte ("nautische Tiefen") ausgetauscht.

Die neue Version ist bereits im Einsatz (s. Abb. 12), und es werden im praktischen Betrieb voraussichtlich weitere Erfahrungen gesammelt werden, die bei der künftigen kommerziellen Fertigung durch die Firma ME zu berücksichtigen sind. Damit dürfte mit der Gammasonde ein brauchbares Gerät für Schlickuntersuchungen zur Verfügung stehen.

Dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, insbesondere den beteiligten Ämtern: dem Amt für Strom- und Hafenbau, Hamburg, und dem Wasser- und Schiffahrtsamt Bremerhaven, sei für die gute Zusammenarbeit bei der Erprobung und den Feldeinsätzen an dieser Stelle gedankt. Dank gilt auch Herrn Dr. H. CHRISTIANSEN von Strom- und Hafenbau



Abb. 11. Vermessung eines Hafenabschnitts von Hamburg (Köhlfleethafen bis Dradenauhafen). Oben: Stationsplan der Fierprofile unten: Isolinien der Schlickmächtigkeit im vorderen Bereich des Köhlfleethafens (Einfahrt)



Abb. 12. Photographie der Gammasonde II auf der "Wittesand"

für das fördernde Interesse und zahlreiche anregende Diskussionen. Ferner soll das stete Interesse von Herrn Dr. J. HÜLSEMANN an der Entwicklung der Gammasonde hervorgehoben werden. Herrn Dipl.-Oz. W. HORN wird für die Mitarbeit an der Auswertung der Hafenmessungen gedankt.

## 8. Schriftenverzeichnis

- BARCZEWSKI, B. u. GRIMM-STRELE, J.: Echolotung in verschlammten Gewässern. DVWK-Nachrichten, H. 76, Nov. 1984.
- BECKMANN, H. u. ABDULLAH, H.: Erforschung des Meeresbodens mit radioaktiven Meßmethoden. Berichte INTEROCEAN '73, Vol. 2, Nr. 259, Düsseldorf, 1973.
- CHRISTIANSEN, H., BÖSSOW, E., FANGER, H.-U. u. HORN, W.: Bericht in Vorb.
- FÜHRBÖTER, A. u. MITTELSTÄDT, M.: Strahlungsmessungen zur Klassifikation von Baggergut aus dem Hamburger Hafen. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau der TU Braunschweig, Bericht Nr. 575, Mai 1984.
- HARTMANN, W.: Meßverfahren unter Anwendung ionisierender Strahlung. Handbuch der Meßtechnik in der Betriebskontrolle, Band V, AVG, Leipzig, 1969.

- HELLEMA, J. A.: Density measurements in situ. Report of the Lower Reaches Directorate of the Netherlands' Public Works Department, Dordrecht (Holland), Nov. 1979.
- JURASCHEK, M., BARCZEWSKI, B. u. GRIMM-STRELE, J.: Untersuchungen zur Schlammdickenmessung mit Echoloten. Inst. f. Wasserbau der Univ. Stuttgart, Wissenschaftl. Ber. 81/14 (HWV 030), Dez. 1981.
- MOXHAM, R. M., TANNER, A. B. u. SENFTLE, F. E.: In situ neutron activation analysis of bottom sediments, Anacostia River. Washington D.C., Mar. Technol. Soc. J. 11, 1 (p. 14), 1976.