

Eine Elektrische In-Situ-Apparatur (ELISA) zur Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes in weichen marinen Sedimenten

A. Just, Ch. Flechsig, F. Jacobs (Leipzig) und R. Endler (Warnemünde)

1. Einleitung

Die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften mariner Sedimente ist sowohl für die Klärung grundlegender geowissenschaftlicher Fragen als auch zur Lösung geotechnischer Probleme und zur Untersuchung und Überwachung von Prozessen von großer Bedeutung.

Die physikalischen Eigenschaften der Sedimente lassen sich an Sedimentkernen im Labor bestimmen. Sie werden jedoch beim Gewinnen des Kernes aus dem Meeresboden durch die Druckentlastung verändert. Deshalb ist es erstrebenswert, Messungen direkt im Meeresboden (in-situ) mit Sensoren durchzuführen, die in die oberen Sedimentschichten eindringen. In-Situ-Messungen zwischen Bohrungen liefern gleichzeitig die Möglichkeit, räumliche Einflußbereiche zu erfassen, die in ihrer Ausdehnung über die Größe von Bohrkernen wesentlich hinausgehen.

Routinemäßig werden zur Strukturerkundung im marinen Bereich seismische und seismoakustische Messungen vom Schiff aus eingesetzt. Probleme entstehen dabei durch die mehr oder weniger stark auftretende Schlickbedeckung großer Bereiche der Flachmeere. Eine maßgebende Rolle spielen die Durchgasung der oberen Sediment- (Schlick-) Schichten und die daraus resultierenden Störeinflüsse (starke Absorption der seismischen Energie) auf seismische Registrierungen.

Das komplexe Zusammenspiel zwischen Festsubstanz des Sediments und der Porenfüllung, der Porosität und Porenstruktur (innere Oberfläche, Grenzflächenprozesse) prägt die elektrischen Eigenschaften des Gesteins. Einerseits sind Materialgrößen wie der spezifische elektrische Widerstand als Funktion der Porosität, des Gas- und/oder Wassergehalts der Poren, der Leitfähigkeit des Porenfluids und der Temperatur erfaßbar, andererseits können spontane elektrische Potentiale durch Fluidbewegungen und chemische Gradienten generiert werden.

Im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes (ELISA, Fkz.: BEO52-03G0536A9, Laufzeit 1998-2001) wurde an der Universität Leipzig ein Mehrelektrodensystem zur räumlich hochauflösenden In-Situ-Messung der elektrischen Leitfähigkeit in weichen Sedimenten am Meeresboden für den küstennahen Bereich und flache Binnengewässer entwickelt und in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Ostseeforschung Warnemünde in der Ostsee erfolgreich erprobt. Die Apparatur besteht aus drei miteinander kombinierten Mehrelektrodensonden mit jeweils 25 Elektroden im Abstand von 10 cm, die über mehradrige Kabel mit einer mehrkanaligen Geoelektrikapparatur an Bord des Schiffes verbunden werden.

Der Erkundungsschwerpunkt liegt in den obersten Sedimentschichten (ca. 3 m) bei einer maximalen Wassertiefe von 30 - 40 m. Als Ergebnis erhält man ein differenziertes Bild der räumlichen Verteilung der Leitfähigkeit in dem untersuchten Bereich des Meeresbodens. Das Auflösungsvermögen liegt dabei im Bereich weniger Zentimeter.

Zielfunktion der Untersuchungen sind Aussagen über die maßgebenden Gesteinseigenschaften wie die Porosität und die Porenfüllung (Wassersättigung, Salinität, Gasgehalt) aus den gemessenen elektrischen Eigenschaften in-situ und deren räumliche Verteilung.

2. Prinzip der Elektrischen Vertikaltomographie mit ELISA im Meeresboden

Mit der Elektrischen In-Situ-Apparatur (ELISA) wird die räumlich hochauflösende Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes oder seines Kehrwertes, der elektrischen Leitfähigkeit, mariner Sedimente nach dem Prinzip der Elektrischen Vertikaltomographie ermöglicht. Es werden 3 einzelne Mehrelektrodensonden mit jeweils 25 Elektroden, die in einem Haltegestell im Abstand von 2.5 m angeordnet sind, im Meeresboden versenkt. Die Mehrelektrodensonden

werden über mehradrige Kabel mit einer mehrkanaligen Geoelektrikapparatur an Bord des Schiffes verbunden (Abb. 1).

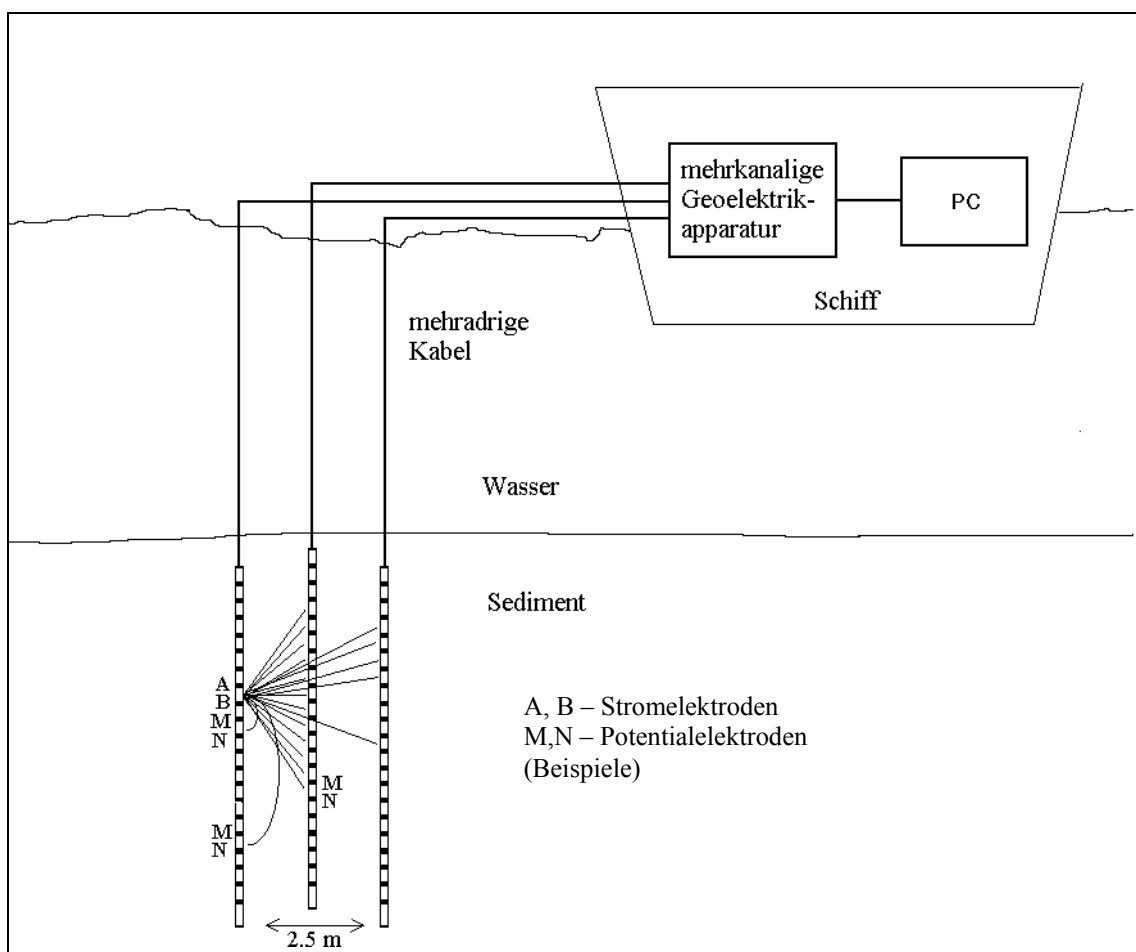


Abb. 1: Schematische Skizze der ELISA-Meßanordnung

Von den insgesamt 75 Elektroden können über das Steuerprogramm der Geoelektrikapparatur beliebige angesteuert und als Vierpunkt-Anordnung geschaltet werden. Indem man z. B. auf einer Sonde nacheinander jeweils vier benachbarte Elektroden in Dipol-Dipol- oder Wenner-Anordnung auswählt, erhält man ein Tiefenprofil des elektrischen Widerstandes. Durch Variation der Elektrodenabstände ergibt sich eine Vertikalpseudosektion (Abb. 2).

Schaltet man zwei Elektroden auf einer Sonde als Stromelektroden und greift mit zwei Elektroden auf einer anderen Sonde die Potentialdifferenz ab und wiederholt das für viele verschiedene Elektrodenpaar-Kombinationen, erhält man unter Berücksichtigung der Konfigurationsfaktoren und nach Anwendung eines tomographischen Inversionsverfahrens ein Abbild der räumlichen Verteilung des elektrischen Widerstandes im Raum zwischen den Mehrelektrodensonden (Prinzip der Elektrischen Vertikaltomographie, Abb. 3).

Die Inversion, d. h. die Berechnung eines Modells der wahren spezifischen Widerstände im Raum zwischen den Sonden aus der Vielzahl der gemessenen scheinbaren Widerstände, erfolgt durch Anwendung eines tomographischen Rekonstruktionsalgorithmus. Die hier verwendeten Programme DC2DSIRT (KAMPKE 1996, 2D-Inversion) und ELT_ELI (eine speziell für die ELISA-Anordnung weiterentwickelte Version des an der Universität Leipzig entwickelten Programm-Paketes ELTOMO, siehe z. B. BRUNNER et al. 1999) basieren auf der Simultanen Iterativen Rekonstruktionstechnik (SIRT, z. B. DINES & LYTLE 1979, KRAJEWSKI et al. 1989).

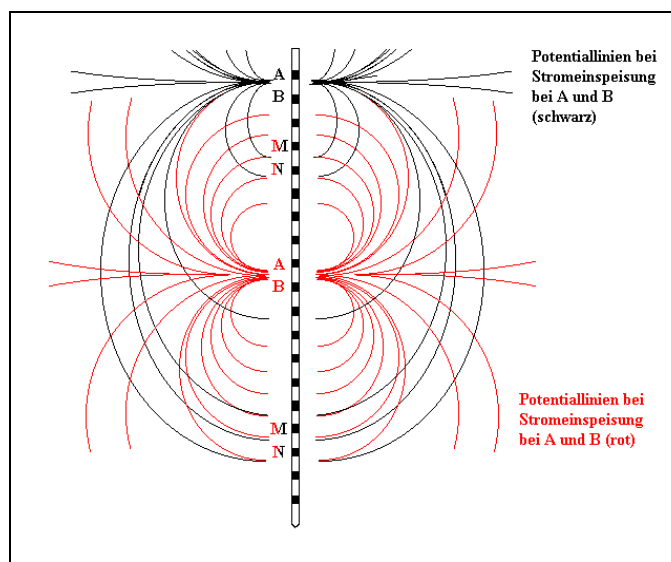


Abb. 2: Messungen mit einer Mehrelektrodensonde: Jede Elektrode kann als Stromelektrode (A oder B) oder Potentialelektrode (M oder N) geschaltet werden. Durch Auswahl vieler Dipol-Dipol-Konfigurationen verschiedener Abstände erhält man eine Dipol-Vertikalpseudosektion

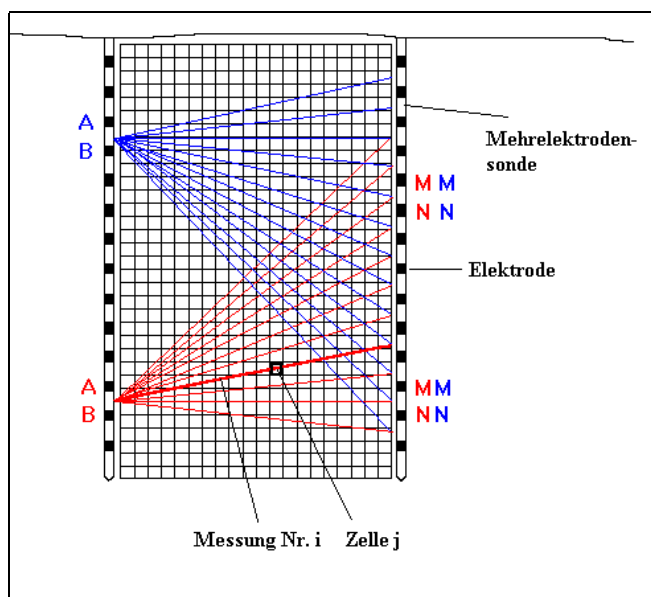


Abb. 3: Messungen mit zwei Mehrelektrodensonden (Elektrische Vertikaltomographie). Jede Elektrode kann Stromelektrode (A oder B) oder Potentialelektrode (M oder N) sein.

3. Die Elektrische In-Situ-Apparatur (ELISA)

Die Elektrische In-Situ-Apparatur besteht aus drei miteinander kombinierten Mehrelektroden-sonden mit jeweils 25 Elektroden im Abstand von 10 cm, die über mehradrigte Kabel mit einer mehrkanaligen Geoelektrikapparatur an Bord des Schiffes verbunden werden (siehe schematische Skizze in Abb. 1).

Die Mehrelektrodensonden bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Die Sonden haben einen Durchmesser von 55 cm, eine Länge von 3,5 m und tragen 25 Edelstahl Elektroden im Abstand von 10 cm (effektive Meßlänge: 2,40 m). In jeder Sonde befinden sich zur Temperaturmessung 5 Temperaturfühler KTY. Am Kopf einer Sonde sind zwei Neigungssensoren angebracht. Es stehen drei Sonden für das ELISA-System sowie eine vierte als Ersatz zur Verfügung. Die drei Mehrelektrodensonden sind im Abstand von 2,5 m in einem Haltegestell aus

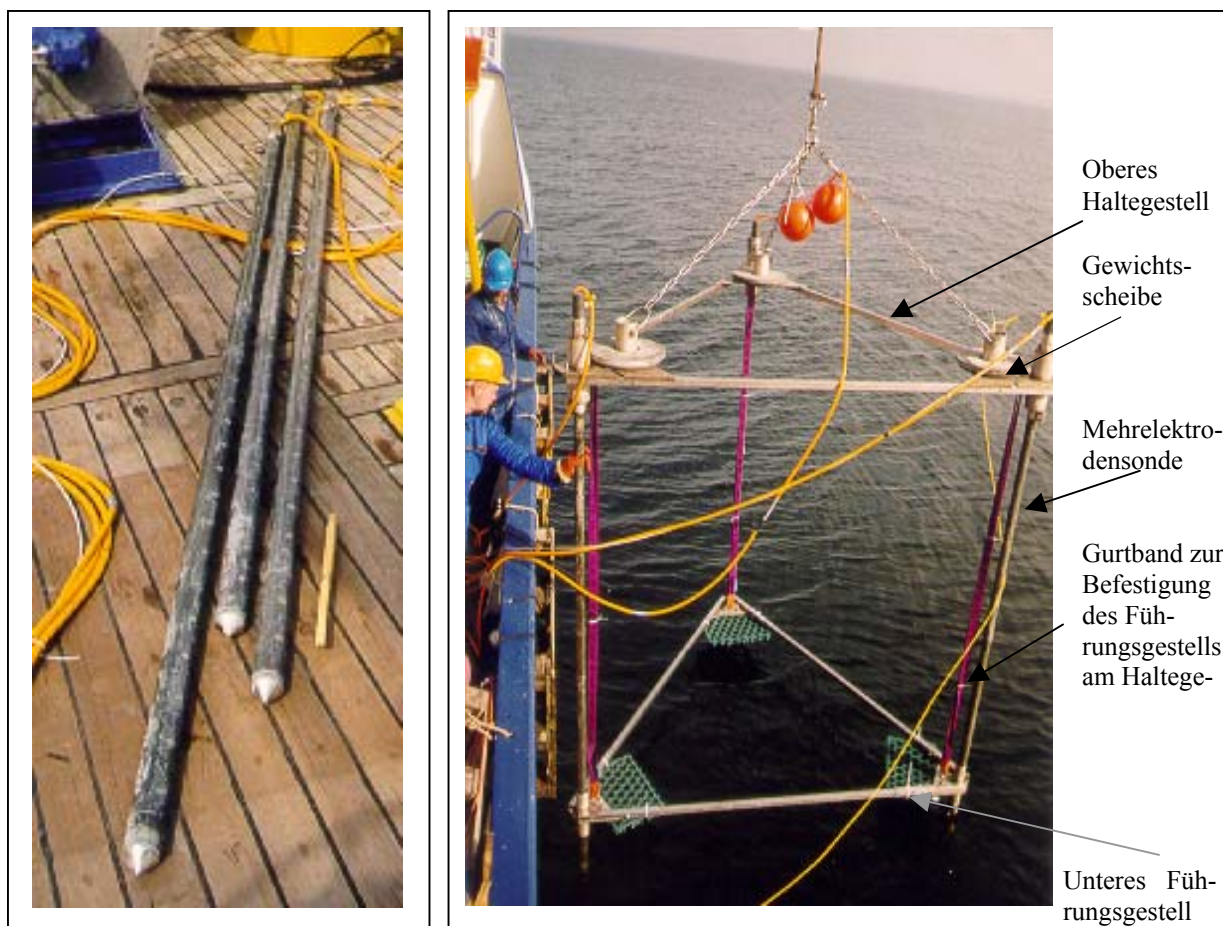


Abb. 4a: Mehrelektrodensonden Abb. 4b: Elektrische In-Situ Apparatur mit drei Mehrelektrodensonden

Edelstahl fixiert. Am Haltegestell können zusätzliche Gewichtsscheiben angebracht werden, die das Eindringen der Sonden in den Meeresboden (Weichsediment, Schlick) gewährleisten. Ein bewegliches Führungsgestell, das beim Absenken auf dem Meeresboden aufsitzt, sorgt für einen definierten Abstand der unteren Sondenenden und ein möglichst senkrechtcs Eindringen der Sonden. Das Führungsgestell ist durch Gurtbänder am oberen Haltegestell befestigt. Das Führungsgestell aus Metall hat den Nachteil, daß seine Anwesenheit über den Elektroden die Messung beeinflusst. Deshalb wurde ein zweites Führungsgestell mit GFK-Stangen angefertigt. Abb. 4 zeigt die Mehrelektrodensonden und die komplette Apparatur.

Die Konfigurationsfaktoren für alle genutzten Vierpunktanordnungen wurden experimentell durch Messungen in der Wassersäule bestimmt (angenommene homogene Leitfähigkeit, die vom Thermosalinographen des Schiffes aufgezeichnet wird). Der Einfluß des Gestells auf die Meßanordnung wurde auf diese Weise berücksichtigt.

4. Messungen in der westlichen Ostsee

Der erste Einsatz der kompletten Elektrischen In-Situ-Apparatur fand vom 12. bis 20. 4. 2000 während einer Fahrt mit der „Prof. A. Penck“ in der westlichen Ostsee statt, ein zweiter vom 6. bis 9. 2. 2001. Zuvor (1999) waren Messungen mit einer einzelnen Mehrelektrodensonde in der Eckernförder Bucht ausgeführt worden (JUST et. al. 1999a, b, 2000).

Die Apparatur wurde an insgesamt 9 verschiedenen Stationen in der Lübecker, der Mecklenburger und der Eckernförder Bucht eingesetzt (vgl. Tabelle 1). Es wurden jeweils mit verschiedenen Dipolweiten Pseudosektionen an allen drei Sonden sowie „Quermessungen“ zwischen den Sonden, d.h. Stromspeisungen mit zwei Elektroden auf einer Sonde und Messung der Poten-

tialdifferenzen auf einer der beiden anderen (Prinzip der Elektrischen Vertikaltomographie), durchgeführt. Als Meßgerät kam eine Gleichstrom-Apparatur „GeoTom“ der Firma Geolog Starnberg GbR zum Einsatz (2000 einkanalig, 2001 fünfkanalig). Die Tabelle 1 gibt zusammengefaßt eine Übersicht über alle Lokationen, an denen im Laufe der Projektlaufzeit In-Situ-Messungen durchgeführt wurden.

Tabelle 1: Übersicht über alle Lokationen mit elektrischen In-Situ-Messungen

Stations-Nr.	Koordinaten		Gebiet		In-Situ-Messung			Kern	
	N	E			Einzel-sonde	ELISA komplett	komplett		
1	54°05.1830	11°07.9810	Lübecker Bucht	L1		4/2000		SL3	
2 ^(*)	54°09.9100	11°25.9380	Lübecker Bucht	L2		4/2000		-	
3	54°09.9590	11°25.9380	Lübecker Bucht	L3		4/2000		SL3	
4	54°13.7850	11°43.5830	Mecklenburger Bucht	M4		4/2000		SL3	
5	54°13.8260	11°38.9580	Mecklenburger Bucht	M5		4/2000		SL3	
6	54°13.7160	11°36.7840	Mecklenburger Bucht	M6		4/2000	2/2001	SL3, VKG6	
7	54°13.2550	11°36.8710	Mecklenburger Bucht	M7		4/2000	2/2001	-	
8	54°29.7950	10°01.0800	Eckernförder Bucht	E8 = E2	4/1999 9/1999	4/2000		VKG6, RL1, TL1	EP
9	54°29.9230	10°01.4320	Eckernförder Bucht	E9 = E4	4/1999	4/2000		VKG6, TL1	EP
10	54°14.025	11°37.589	Mecklenburger Bucht	M0	6/1999			VKG6	

Erläuterungen: VKG6 – Vibrationskerngerät 6m,
SL3 – Schwerelot 3m
RL1 – Rumohrlot 1m

TL1-Tripellot 1m
EP - Einzelproben (aus VKG-Kernen)

(*): An Station L2 wurden nur Messungen im Wasser durchgeführt

Im folgenden sei hier nur auf die Ergebnisse in der Mecklenburger und Lübecker Bucht eingegangen (zur Eckernförder Bucht siehe z. B. Just et al. 1999a, b, 2000).

In Abb. 5 sind im Überblick die Tiefenabhängigkeiten des scheinbaren spezifischen Widerstandes (Rohdaten) an den 6 Stationen in der Lübecker und Mecklenburger Bucht, an denen die Sonden vollständig im Sediment waren, dargestellt (zum Vergleich auch Station E2 = E8 in der Eckernförder Bucht). Die Werte stellen Mittelwerte der Messungen an den drei einzelnen Sonden mit einfachem Dipolabstand (Dipolweite 10 cm) und $n=1$ (Elektroden benachbart) dar.

Der an allen Stationen vorhandene Schlick zeigt außer an den Stationen M6 und E8 (Eckernförder Bucht) meist keine großen Widerstandsvariationen mit der Tiefe, der Übergang zu schluffigem Material ist mit Widerstandserhöhungen verbunden (Stationen M4 und M7). An Station M4 lagert unter dem Schlick eine etwa 1 m mächtige Tonschicht, ehe der Schluff folgt. Diese Tonschicht unterscheidet sich im Widerstand nicht vom Schlick. An Station M6, die nur einige 100 m von Station M7 entfernt ist, zeigt der Schlick eine signifikante Widerstandszunahme mit der Tiefe. Auch der Absolutwert des Widerstandes in 0.6 m Tiefe ist bereits deutlich höher als der an Station M7. Ein ähnliches Verhalten zeigt der elektrische Widerstand auch an Station E8 in der Eckernförder Bucht. Diese deutliche Widerstandszunahme deutet auf das Auftreten von Gas- oder Süßwasseraufstiegen aus dem Untergrund (in Verbindung mit sog. Pockmarks) hin.

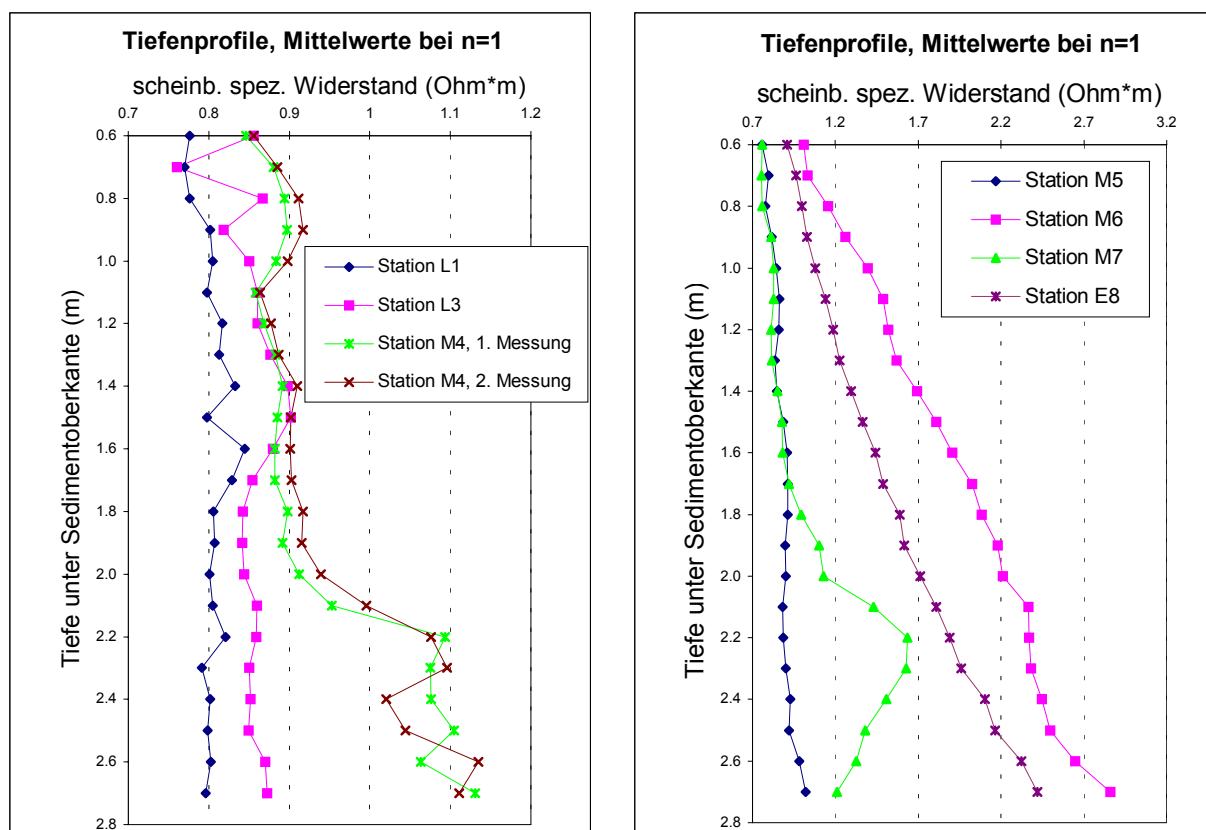


Abb. 5: Tiefenabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes (Rohdaten) aus den Dipol-Dipol-Pseudosektionen mit Dipolweite $l = 10$ cm, Dipolabstand $n=1$ (Mittelwerte der Messungen mit jeder der drei Mehrelektroden) in der Lübecker und Mecklenburger Bucht (E8: Eckernförder Bucht).

An allen Stationen außer M7 liegen Sedimentkerne (Schwerelot 3 m bzw. VKG 6 m) vor, an denen im Anschluß an die Meßfahrt Labormessungen des elektrischen Widerstandes vorgenommen wurden. In Abb. 6 sind Ergebnisse von In-Situ- und Labormessungen gegenübergestellt. In den oberen Diagrammen sind die unkorrigierten Werte dargestellt, in den unteren die nach der Temperaturkorrektur nach SCHLUMBERGER (SCHÖN 1996):

$$\rho(T_2) = \rho(T_1) \frac{T_1 + 21.5^\circ}{T_2 + 21.5^\circ} \quad (1)$$

(mittlere Sedimenttemperatur in-situ: $T_1 = 9^\circ\text{C}$, zu korrigieren auf Labortemperatur $T_2 = 19^\circ\text{C}$). Nach der Temperaturkorrektur sind die Abweichungen zwischen den Ergebnissen von In-Situ- und Labormessungen sehr gering. Wesentlich größer sind die Unterschiede zwischen zwei Kernen von derselben Position (Station M5)! Dies ist sehr wahrscheinlich durch die unterschiedliche Beprobungstiefe der Kerne (Schwerelot) bedingt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß der Vergleich zwischen Labor- und In-Situ-Messungen nicht unproblematisch ist. Sowohl bei den In-Situ-Messungen mit der Elektrischen In-Situ-Apparatur als auch bei den Kernen ist die Tiefenzuordnung nicht exakt möglich. Im sehr weichen Schlick kann die Apparatur zu tief einsinken, während sie bei härterem Untergrund nicht ganz in den Untergrund eindringt. In letzterem Fall läßt sich die Eindringtiefe allerdings durch Messung der Übergangswiderstände zwischen zwei benachbarten Elektroden, die im Wasser etwas geringer sind, feststellen. Bei der Entnahme von Vibrocoring-Kernen (bis zu 6 m lang) kann es im oberen Kernbereich zu Kernverlust kommen. Zudem wird das Probenmaterial ebenfalls im oberen Kernbereich durch die Probenahme gestaucht. Bei sehr weichem Schlick

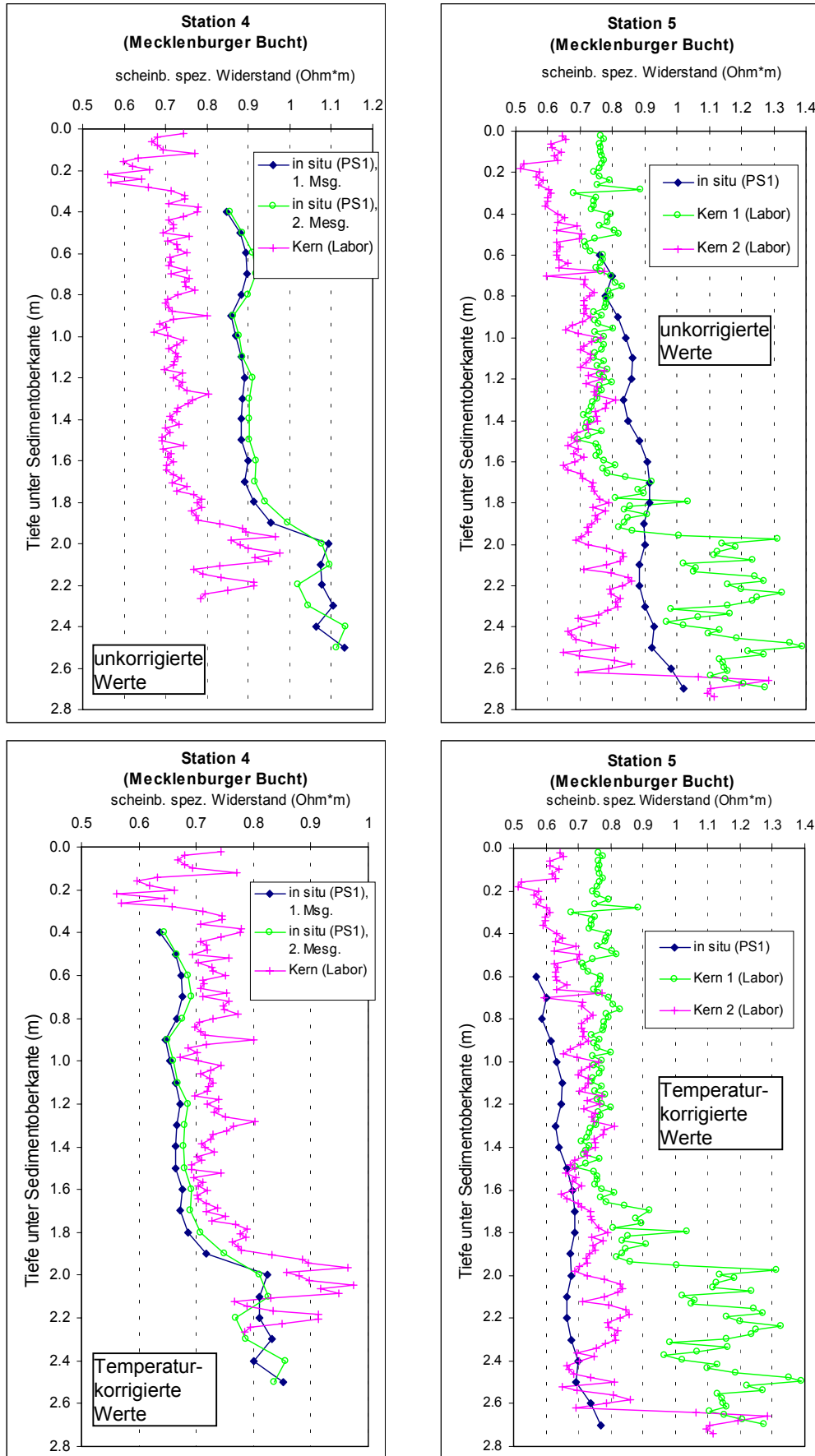


Abb. 6: Vergleich der In-Situ-Messungen (Tiefenprofile aus Vertikalpseudosektionen, jeweils kleinster Elektrodenabstand) und Labormessungen an Kernen der Stationen 4 und 5 (Mecklenburger Bucht). Oben: Unkorrigierte Werte, unten: Temperaturkorrigierte Werte

sinkt auch das Kerngerät in den Schlick ein, so daß die Probe eigentlich aus größerer Tiefe stammt. Abweichungen können auch durch die Veränderung des Sedimentes durch die Probenahme und die anschließende Lagerung bedingt sein (Druckentlastung der Sedimente, Entgasung, Austrocknung).

Im folgenden sei auf die Ergebnisse der In-Situ-Messungen an den Stationen M6 und M7 in der Mecklenburger Bucht eingegangen, die sich weit voneinander entfernt befinden. Sie liegen auf einem Profil, entlang dessen Sedimentecholotaufnahmen vorliegen (Universität Rostock, G. WENDT, persönliche Mitteilung). Die Sedimentecholotaufnahme (Abb. 7), die ebenfalls während der Reise der „Prof. A. Penck“ im April 2000 aufgezeichnet wurde, zeigt als erste Reflexion die Sedimentoberkante (26 bis 27 m Wassertiefe), als zweite Reflexion die Unterkante des Schlicks. Darunter folgen Reflexionen aus dem tieferen Untergrund. Im Bereich zwischen ($54^{\circ}13.5850$ N, $11^{\circ}36.788$ E) und ($54^{\circ}13.7330$ N, $11^{\circ}36.788$ E) tritt eine räumlich eng begrenzte Lücke in den Untergrund-Reflexionen auf.

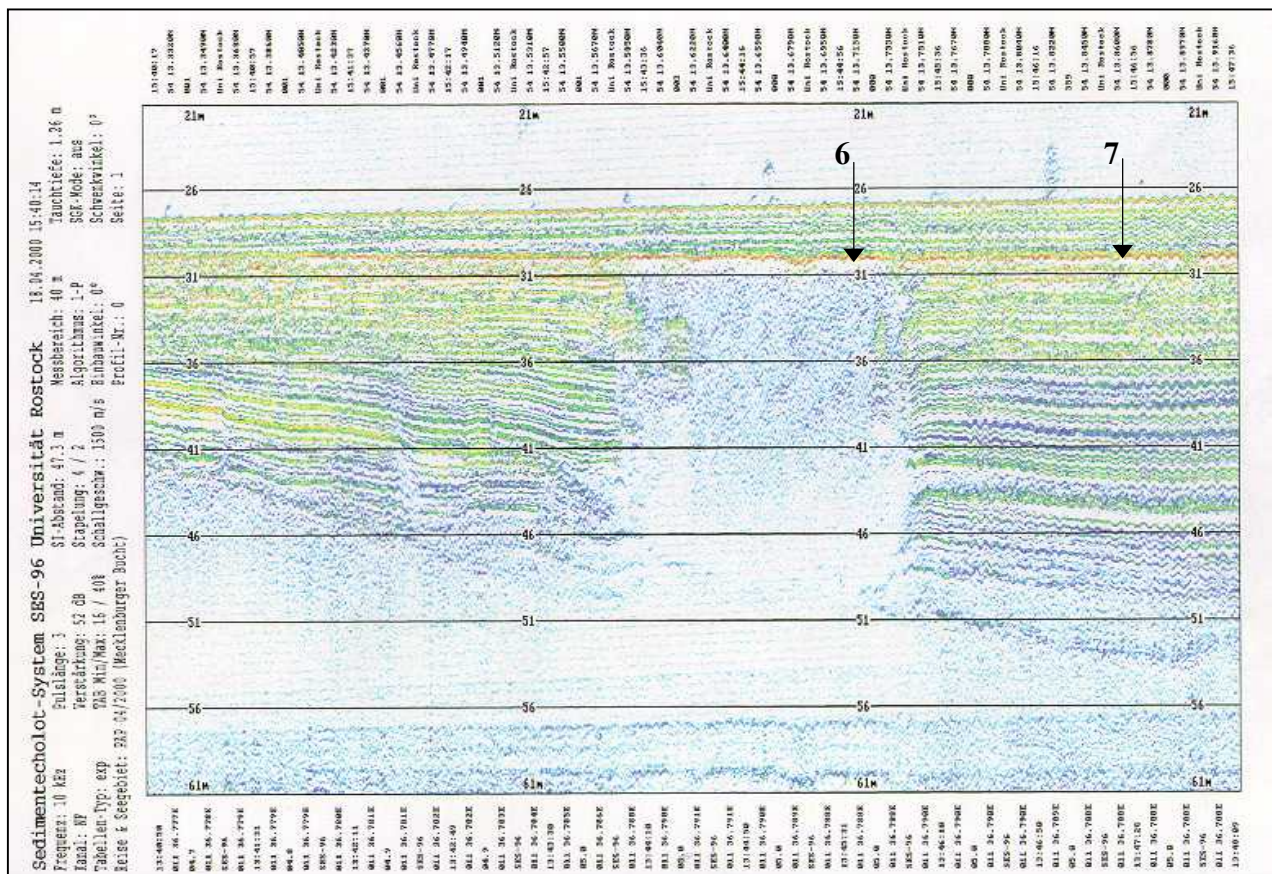


Abb. 7: Sedimentecholotaufnahme in der Mecklenburger Bucht (Sedimentecholot-System SES-96, Universität Rostock, G. WENDT)

Die ELISA-Meßstation M6 liegt im Bereich der Reflexionslücke, die Station M7 außerhalb davon. Nicht weit entfernt, aber außerhalb des Sedimentecholot-Profiles, liegt auch Station M5. Während sich an der ungestörten Lokation M7 der Widerstand des Schlicks mit der Tiefe nur unwesentlich erhöht (von 0,8 auf 0,9 Ω m; in 2 m Tiefe erfolgt ein sprunghafter Anstieg infolge des Übergangs zu schluffigem Material), nimmt er an der gestörten Lokation stark und kontinuierlich mit der Tiefe zu (bis ca. 2,5 Ω m)! Diese starke Widerstandserhöhung des Schlicks (hier ca. 3 m mächtig) kann durch Süßwasser oder Gas, das aus dem tieferen Untergrund aufdringt, hervorgerufen werden. Die erneuten Messungen im Februar 2001 bestätigen diese Tendenz. Die Absolutwerte der gemessenen elektrischen Widerstände liegen dabei etwas unter denen von April 2000 (Abb. 8).

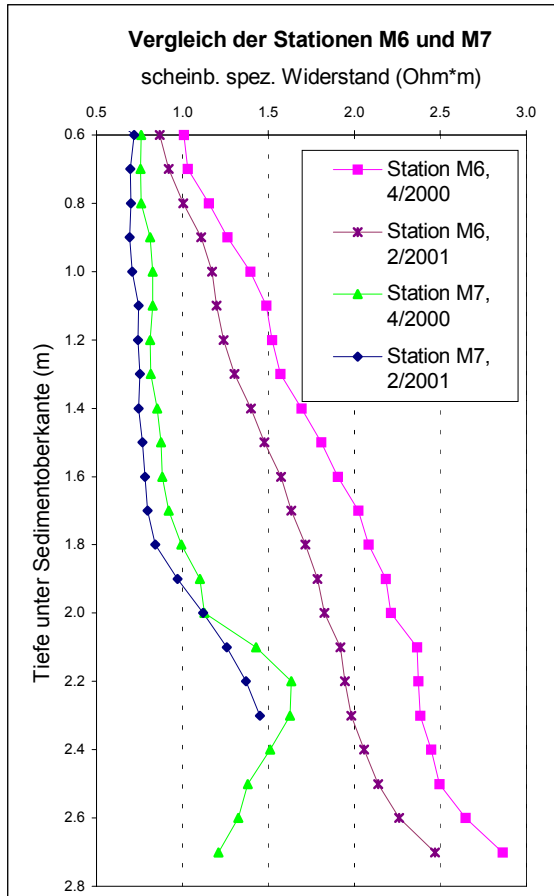


Abb. 8: Vergleich der In-Situ-Messungen (Tiefenprofile aus den Dipol-Dipol-Pseudosektionen mit $n=1$) der Stationen M6 und M7 (April 2000 und Februar 2001).

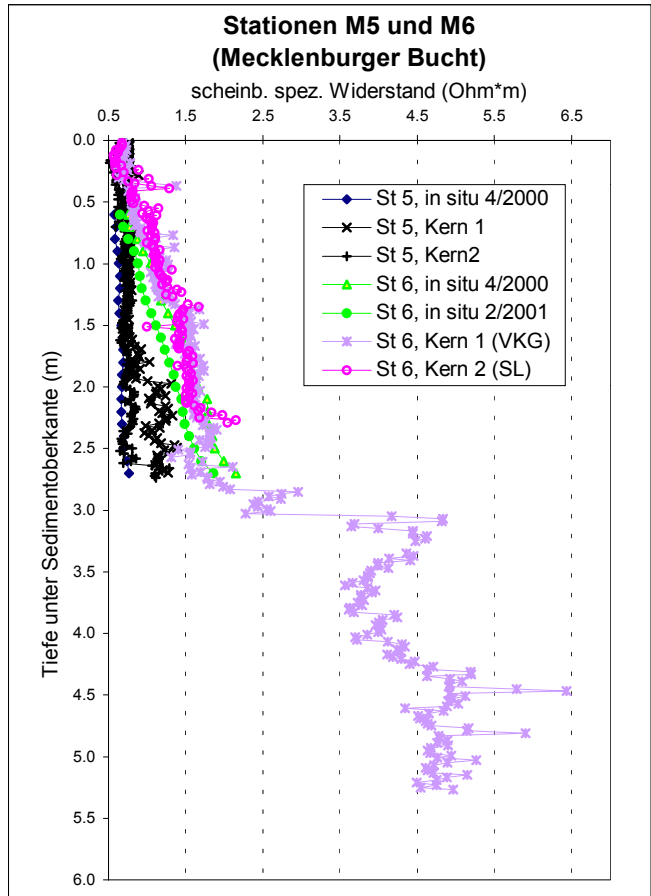


Abb. 9: Vergleich von Labormessungen an Kernen der Stationen M5 und M6 und In-Situ-Messungen

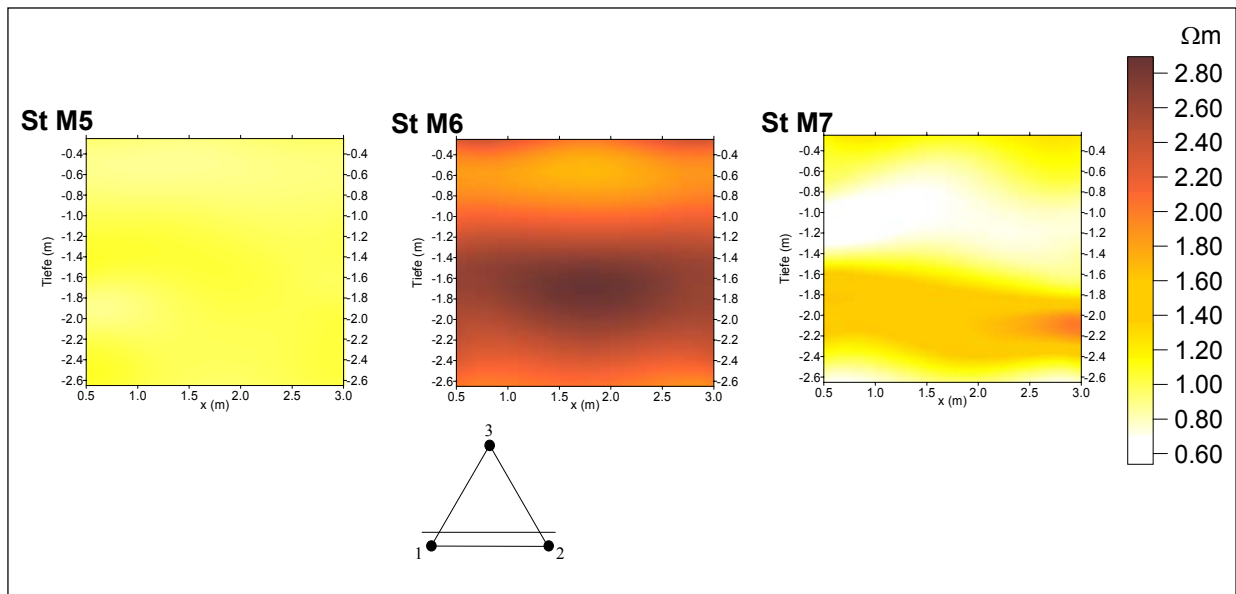


Abb. 10: 3D-Inversion aller Daten mit Dipolweite $n=3$ der Stationen M5, M6 und M7 (invertiert mit ELT_ELT von E. DANCKWARDT). Tiefenschnitte parallel zu den Sonden 1-2 im Abstand von 10 cm.

Die kontinuierliche Widerstandszunahme des Schlicks an Station M6 zeigte sich auch in den Labormessungen an zwei Kernen dieser Station (Abb. 9). Da von Station M7 kein Kern vorlag, sind die Ergebnisse von Labor- und In-Situ-Messungen von Station M6 denen von Station M5 gegenübergestellt. Wie bereits oben erwähnt, liegt die Station M5 in der Nähe von Station M7 und weist eine vergleichbare geologisch-geochemische Situation auf. In der Inversion (3D-Inversionen in Abb. 10) treten die unterschiedlichen Widerstandsverteilungen an den beiden benachbarten Lokationen M6 und M7 deutlich in Erscheinung.

5. Zusammenfassung

Es wurde eine neue Elektrische In-Situ-Apparatur (ELISA) für Meeresböden (Weichsediment, maximale Wassertiefe 40 m) entwickelt und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) in der Ostsee erfolgreich erprobt. Die Apparatur erfaßt die räumliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes in den obersten Sedimentschichten (ca. 3 m).

Die komplette Apparatur mit drei Mehrelektrodensonden wurde im April 2000 erstmals in der Ostsee eingesetzt. Messungen an 9 Lokationen mit Schlickbedeckung in der Lübecker, der Mecklenburger und der Eckernförder Bucht verliefen erfolgreich. Eine zweite Meßkampagne unter erstmaliger Nutzung einer neuen fünfkanaligen Gleichstromapparatur GeoTom fand im Februar 2001 in der Mecklenburger Bucht statt.

An den Meßlokationen wurden parallel zu den geoelektrischen In-Situ-Messungen Sedimentkerne mittels Schwerelot oder Vibrationskerngerät entnommen. Die Labormessungen des elektrischen Widerstandes an diesen Kernen bestätigten die Ergebnisse der In-Situ-Messungen.

Schlick an Lokationen mit Gas-/ Süßwasserzutritten (Pockmarks) weist signifikant höhere Widerstandswerte auf als gleiches Material an ungestörten Lokationen. In den gestörten Bereichen nimmt der Widerstand stark und kontinuierlich mit der Tiefe zu. Dadurch wurde ein Detektionskriterium für Pockmarkstrukturen gewonnen. Die Apparatur ermöglicht damit insbesondere die Erkennung und Bewertung von Störungszonen, die mit submarinen Süßwasserzuflüssen und Gasaustritten verbunden sind.

6. Literatur

- BRUNNER, I., FRIEDEL, S., JACOBS, F. & DANCKWARDT, E. (1999): Investigation of a tertiary maar structure using 3D resistivity imaging. *Geophys. J. Int.*, 136:771-780.
- DINES, K. A., & LYTLE, R. J. (1979): Computerized geophysical tomography, *Proc. IEEE* **67**,7, D 1065-1073.
- JUST, A., HELBIG, K., FLECHSIG, CH., JACOBS, F., ENDLER, R. (1999a): In-Situ and laboratory measurements of electrical resistivity on marine sediments.- *Proc. 5th EEGS Meeting*, 6-9 September 1999, Budapest, Hungary, EmP6.
- JUST, A., HELBIG, K., FLECHSIG, CH., JACOBS, F., ENDLER, R. (1999b): Elektrische-In-Situ-Apparatur (ELISA) für Meeresböden – Erste Meßergebnisse.- *Proc. VIII. Arbeitsseminar "Hochauflösende Geoelektrik"*, Bucha/Sachsen, 5.-7.10.1999, 4 S.
- JUST, A., HELBIG, K., HEINSE, R., FLECHSIG, CH., JACOBS, F., ENDLER, R. (2000): Messungen mit der Elektrischen In-Situ-Apparatur (ELISA) in der Ostsee.- *Proc. IX. Arbeitsseminar "Hochauflösende Geoelektrik"*, Bucha/Sachsen, 4.-6.10.2000.
- JUST, A., FLECHSIG, CH., JACOBS, F. (2002): Entwicklung und Erprobung einer Elektrischen In-Situ-Apparatur (ELISA) für Meeresböden.- Abschlußbericht zum BMBF-Projekt 03G0536A9, Universität Leipzig.
- KAMPKE, A. (1996): Modellierung und Inversion von Daten der induzierten Polarisation für zweidimensionale Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit. Diplomarbeit. Institut für Geophysik und Meteorologie, Technische Universität Braunschweig.
- KRAJEWSKI, C., DRESEN, L., GELBKE, C., RÜTER, H. (1989): Iterativ tomographic methods to locate seismic low-velocity anomalies: a model study.- *Geophys. Prosp.* **37**, 717-751.
- SCHÖN, J. H. (1996): Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. (Handbook of geophysical exploration. Section I, Seismic exploration: Vol. 18). Elsevier Science New York Oxford, 583 S.