

# BEITRÄGE ZUR MEERESTECHNIK

Nr. 10

Herausgegeben von der  
Arbeitsgruppe Meerestechnik und marine Mineralrohstoffe  
Technische Universität Clausthal

## **Vergleichende sedimentologisch-geochemische Untersuchungen an marinen Oberflächensedimenten der Deutschen Bucht (Nordsee), der Lübecker-Mecklenburger Bucht (Ostsee), und des Weddell-Meeres (Antarktis)**

Dipl.-Geol. Bernd F. Sokolowski

Als Dissertation angenommen  
bei der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Technischen Universität Clausthal  
(Mündliche Prüfung 25. April 1986)  
192 Seiten, mit 46 Abb. und 31 Tab. im Text  
10 Abb. und 35 Tab. als Anhang

Anschrift des Verfassers:  
Dr. Bernd F. Sokolowski  
Insitut für Geologie und Paläontologie  
Abteilung für Erdölgeologie  
Technische Universität Clausthal  
3392 Clausthal-Zellerfeld

BEITR. Z. MEERESTECHNIK

NR. 10

VII + 192 S.

CLAUSTHAL-ZELLERFELD 1986

ISBN 0344-6417

Referent: Prof. Dr. K. Müller

Korreferenten: Prof. Dr. H.J. Neumann  
Prof. Dr. H. Bottke

Die vorliegende Arbeit wurde am Geologischen Institut, Abt.  
für Erdölgeologie der Technischen Universität Clausthal an-  
gefertigt.

## Zusammenfassung

Die Sedimentologie der untersuchten Proben wird von den speziellen hydrographischen Verhältnissen in den drei Arbeitsgebieten geprägt. Die Nordseesedimente, als gezeitenbeeinflusste Flachmeerablagerungen, besitzen bei schlechteren Sortierungen mehr Feinkorn. Die Sedimente der gezeitenfreien Ostsee führen bei schlechteren Sortierungen mehr Grobkorn, wobei aperiodische Bodenströme einflußnehmend sind. Die bathyalen Antarktissedimente sind zum einen Teil von starken Bodenströmungen gut sortierte, marine Sande und entstammen zum anderen Teil strömungsberuhigteren Zonen, in der Feinstkorngehalte zunehmen sowie Glazialsedimentation anzutreffen ist, was insgesamt zu extrem schlechten Sortierungen führt. Röntgendiffraktometrisch ermittelte Mineralverteilungen weisen ebenfalls auf die hydrographischen Besonderheiten und die Unterschiede in den Liefergebieten der Untersuchungsräume hin. Dagegen zeigen die Tonminerale kaum variierende Verteilungen. Die höchsten Tongehalte besitzen die Antarktissedimente, gefolgt von denen aus Nord- und Ostsee. An ausgewählten Proben durchgeführte Sedimentationsversuche und die Anwendung des Schockgefrierens und Gefriertrocknens ermöglichten die rasterelektronenmikroskopische Identifizierung von Kaolinit und Illit. Die ermittelten Gehalte an Gesamtschwefel, organischem Kohlenstoff und Tonen vergrößern im Gegensatz zu den Karbonaten die spezifische Oberfläche der untersuchten Sedimente. Im Gesamtprobenmaterial und in den Kornfraktionen  $< 2 \mu\text{m}$  wurden die Schwermetallgehalte an Pb, Cd, Zn, Fe und Mn mit der AAS bestimmt. Maximale Anreicherungen zeigen Pb (6-fach) in den Nordseesedimenten und Cd (5-fach) in den Ostseesedimenten. Bezogen auf die Korngrößenkorrigierten Schwermetallgehalte der Antarktissedimente wurden Karten für die Nord- und Ostseesedimente erstellt, die die Proben südlich Helgolands als regional am stärksten angereichert ausweisen.

Am Gesamtprobenmaterial durchgeführte selektive Extraktionen ermöglichten die Hauptbindungsarten der Schwermetalle zu charakterisieren. Dabei ist Cd in den Nordseesedimenten zu 52 % und zu 74,9 % in den Ostseeproben austauschbar gebunden, während in den Antarktissedimenten nur 23 % des gesamten Cd in der schwächsten Bindungsart vorliegen. Pb ist überwiegend inert gebunden, Zn zeigt starke Affinitäten zur Fe-hydroxidischen und lithogenen Phase.

Eine Kalkulation des chemischen Milieus der Probennahmegebiete wurde anhand des Chemismus von Fe und Mn vorgenommen. Lineare Abhängigkeiten von Schwermetallen zu ihren Träger-substanzen neben sonst sehr komplexem Bindungsverhalten, lieferten bezogen auf die Antarktissedimente die Grundlage zur Berechnung materialkorrigierter Anreicherungsfaktoren. Diese zeigen 1,6-fache Cd-Anreicherung der organisch-sulfidischen Bindungsart der Ostseesedimente. In den Nordseeproben erweist sich die karbonatische Phase als 7,8-fach, die Mn-oxidische als 9,3-fach Zn angereichert.

## Vorwort

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Klaus Müller für die Vergabe des Themas, sein stetes Interesse und die vielfältige Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. H.J. Neumann und Herrn Prof. Dr. H. Bottke danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Für die Möglichkeit, antarktisches Probenmaterial bearbeiten zu können, danke ich Herrn Prof. Dr. D. Fütterer (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung) sowie Herrn Dipl.-Geol. Dr. G. Haase für die Probennahme vor Ort.

Herrn Dipl.-Chem. Dr. M. Somer und Herrn Dipl.-Chem. Dr. D. v. Borstel sei an dieser Stelle herzlich für Ihre unermüdlige Diskussionsbereitschaft gedankt.

Mein Dank gilt ebenso meinen Kollegen Dr. M. Özerler und H. Müller für ihre stete Hilfsbereitschaft.

Weiterhin möchte ich insbesondere meinen Kollegen vom "unteren Flur" für ihr ständiges Interesse an fachlichen Diskussionen danken.

Mein herzlicher Dank gilt nicht zuletzt meiner Kollegin Dr. C. Höbel für ihre wertvolle Unterstützung bei den Probennahmecampagnen und die kameradschaftliche Zusammenarbeit bei allen fachlichen Fragen.

Diese Arbeit wurde "gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen".



## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Beschreibung des Arbeitsgebietes	3
2.1 Die Arbeitsgebiete im großräumig geologischen Rückblick	3
2.1.1 Die Nordsee	3
2.1.2 Die Ostsee	8
2.1.3 Die Antarktis	11
3 Die Probennahmestationen der Arbeitsgebiete	16
3.1 Lage und Positionen	16
3.2 Probennahme und Konservierung	16
3.3 Hydrographie	20
3.3.1 Arbeitsgebiet Nordsee	20
3.3.2 Arbeitsgebiet Ostsee	21
3.3.3 Arbeitsgebiet Antarktis	22
4 Sedimentologische Untersuchungen	23
4.1 Granulometrie	23
4.1.1 Methodik	23
4.1.2 Ergebnisse und Auswertung	23
4.1.3 Regressionsanalysen I	42
4.1.4 Raster-Elektronenmikroskopie I	44
4.1.4.1 Methodik	44
4.1.4.2 Probenauswahl und -präparation	44
4.1.4.3 Dokumentation	45
4.2 Mineralogie	50
4.2.1 Methodik	50
4.2.2 Präparation der Proben	51
4.2.3 Darstellung der Ergebnisse	51
4.2.4 Tonmineralogie	57
4.2.4.1 Methodik	57

	Seite	
4.2.4.2	Darstellung der Ergebnisse	58
4.2.5	Raster-Elektronenmikroskopie II	62
4.2.5.1	Präparation der Proben	62
4.2.5.2	Dokumentation	63
4.3	Sedimentchemische Analysen	68
4.3.1	Methodik	68
4.3.2	Ergebnisse	69
4.4	Sedimentphysikalische Analysen	73
4.4.1	Methodik	73
4.4.2	Ergebnisse	73
4.5	Regressionsanalysen II	75
5	Geochemische Untersuchungen	78
5.1	Bestandsaufnahme der Schwermetallgehalte	78
5.1.1	Methodik	78
5.1.2	Diskussion der Ergebnisse	79
5.2	Regionale Schwermetallanreicherungen in Nord- und Ostsee	85
5.3	Bindungsmöglichkeiten von Schwermetallen in Sedimenten	95
5.3.1	Chemische Klassifikation der Schwer- metallträgersubstanzen	100
5.3.2	Verteilung der Schwermetalle auf ihre Bindungspartner	103
5.4	Beurteilung des chemischen Milieus der Probennahmegebiete	113
5.4.1	Verhalten der Schwermetalle zu ihren Trägersubstanzen	118
5.4.2	Korrigierte regionale Schwermetallan- reicherungen in einigen Trägersubstanzen der Nord- und Ostseesedimente	128
6	Schlußbetrachtung	137
7	Literaturverzeichnis	139
8	Anhang	147

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die Verschmutzung und Belastung bundesdeutscher Gewässer mit anorganischen und organischen Schadstoffen steht im Mittelpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen.

Ein besonderes Interesse gilt dabei der Meeresverschmutzung von Nord- und Ostsee, die wesentliche Glieder zur Erhaltung des Nahrungsmittelpotentials der Bevölkerung darstellen.

Die Gefährdung dieser Küstengewässer liegt zum einen in ihrer relativ geringen Größe und Tiefe, zum anderen in der hohen Besiedlungsdichte der Küstenländer begründet. Der Schadstoffeintrag wird in erster Linie durch einmündende belastete Flüsse (Rhein, Ems, Weser und Elbe in die Nordsee, RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN, 1980; Oder, Weichsel, Memel, Düna und Newa in die Ostsee, REINHEIMER, 1974) sowie durch das direkte Einlassen von Abwässern und die Verklappung und Verbrennung auf See gesteuert.

Zu den Gewässer belastenden Schadstoffemittenten sind besonders Bereiche der Metallverarbeitenden, der Chemischen und der Energieindustrie sowie die privaten Haushalte zu zählen.

In der Arbeitsgruppe Sedimentologie und Meeresgeologie der Abteilung für Erdölgeologie sind bereits verschiedene Arbeiten über die Belastung der Nordsee mit Schwermetallen als anorganische Schadstoffe abgeschlossen worden.

So fand u.a. HAASE (1980) in den Psammitfraktionen der Oberflächensedimente NW-lich Helgolands erhöhte Gehalte an Vanadium, Titan und Chrom, deren Anreicherungen er auf die Verklappung von Dünnsäure in diesem Gebiet zurückführen konnte. SOKOLOWSKI (1982) untersuchte die Pelitfraktionen von Oberflächensedimenten SE-lich Helgolands, in denen An-

reicherungen von Blei, Cadmium und Zink den Einfluß der Schwermetallfracht aus Weser und Elbe widerspiegeln.

Biogene Bestandteile der Sedimente, vornehmlich rezentmarine, benthische Foraminiferen der südlichen Deutschen Bucht und in ostfriesischen Wattengebieten bearbeitete HÖBEL (1984). Dabei wurden sowohl in den Skeletten als auch im Plasma der Mikrofauna Schwermetallanreicherungen festgestellt.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, Oberflächensedimente der südlichen Deutschen Bucht (Nordsee), der Lübecker-Mecklenburger Bucht (Ostsee) und des Weddell Meeres (Antarktis) sedimentologisch und geochemisch zu untersuchen.

Dabei sollen die Sedimente in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften dargestellt und ihre Schwermetallgehalte sowie deren Anlagerung an Trägersubstanzen quantitativ ermittelt werden.

Die Untersuchungen sollen eine Wichtung der Schwermetallkonzentration in Nord- und Ostseesedimenten gegenüber den naturgemäß nicht anthropogen belasteten Sedimenten der Antarktis ermöglichen.

## 2 Beschreibung des Arbeitsgebietes

Die Wahl des Arbeitsgebietes erfolgte in erster Linie nach logistischen Überlegungen, d.h. wann und wo an Forschungsfahrten der Universität Kiel und des Alfred Wegener Instituts für Polarforschung partizipiert werden konnte.

Das Arbeitsgebiet "Nordsee" ist ein Seegebiet der südlichen Deutschen Bucht, das im Bereich von  $54^{\circ}$  -  $55^{\circ}$  nördlicher Breite und  $6^{\circ}$  -  $8^{\circ}$  östlicher Länge liegt.

Der  $54.$  Breitengrad bildet ebenfalls die südliche Grenze des Arbeitsgebietes "Ostsee", das sich küstenparallel bis  $54^{\circ}20'$  Breite erstreckt und geographisch zur Belt See gehört. Die Längengrade  $10^{\circ}50'$  und  $11^{\circ}20'$  bezeichnen die West-Ost-Erstreckung.

Das im südlichen Weddell Meer liegende Arbeitsgebiet "Antarktis" wird durch den  $78.$  und  $74.$  südlichen Breitengrad sowie den  $60.$  und  $48.$  westlichen Längengrad begrenzt.

### 2.1 Die Arbeitsgebiete im großräumig geologischen Rückblick

#### 2.1.1 Die Nordsee

Bereits seit dem Perm ist der Bereich der heutigen Nordsee ein Senkungsgebiet, STREIF (1978), in das, beeinflusst von alternierenden marinen Trans- und Regressionen, im Verlauf des Mesozoikums große Sedimentmächtigkeiten abgelagert wurden. Ausgeprägte Taphrogenstadien führten zu Absenkungen des Viking-, Central-, Horn- und Oslo-Grabens. Die Sedimente des Mesozoikums haben große Bedeutung als Öl- und Gasreservoir erlangt.

Die Subsidenz der Nordsee ließ während der Oberkreide nach, ZIEGLER (1977), setzte aber erneut im Verlauf des Tertiärs

mit der Herausbildung eines symmetrischen, flachschüsseli- gen Beckens ein, das nahezu den heutigen Umrissen der Nord- see entsprach. Eine Übersicht der heutigen Strukturelemente der Nordsee geben ILLING & HOBSEN (1981) in Abb. 1.

Im Quartär wurde die Entwicklung des Nordseeraumes durch starke klimatische Schwankungen geprägt, STREIF (1978), die sich durch drei Glazialzeiten, alternierend mit Warmzeiten und damit verbundenen Meeresspiegelschwankungen auszeich- nen.

Während der Elster-Eiszeit (spätes Alt-Pleistozän) war das Nordseebecken bis zur Themse- und Emsmündung eiserfüllt, während der südliche Teil eisfrei blieb.

Der beginnende Zerfall des Elster-Eises führte zur Entste- hung von Schmelzwasserseen, in die der Lauenburger Ton, WOLDSTEDT & DUPHORN (1974), abgelagert wurde und kennzeich- net das einsetzende Holstein-Interglazial. Die Transgres- sion des Holstein-Meeres erstreckte sich nach BRINKMANN (1977) weit in die Elbemündung, über Süd-Schleswig-Holstein bis in die westliche Ostsee.

Während der Saale-Vereisung war der gesamte Nordseeraum mit Eis erfüllt. Im folgenden Saale/Weichsel-Interglazial des Jung-Pleistozäns überflutete das Eem-Meer das Nordseebecken und Teile der südlichen Ostsee, war aber insgesamt nicht so ausgebreitet wie das marine Holstein.

In der Weichsel-Eiszeit war die vergletscherte Fläche er- heblich kleiner als zuvor und ließ den deutschen Nordsee- schelf eisfrei.

Die am Ausgang der bislang letzten Eiszeit einsetzende Transgression wurde in dem Maße offenbar, wie das Eis Süd- Schweden und das Ostseegebiet freigab, BRINKMANN (1977).

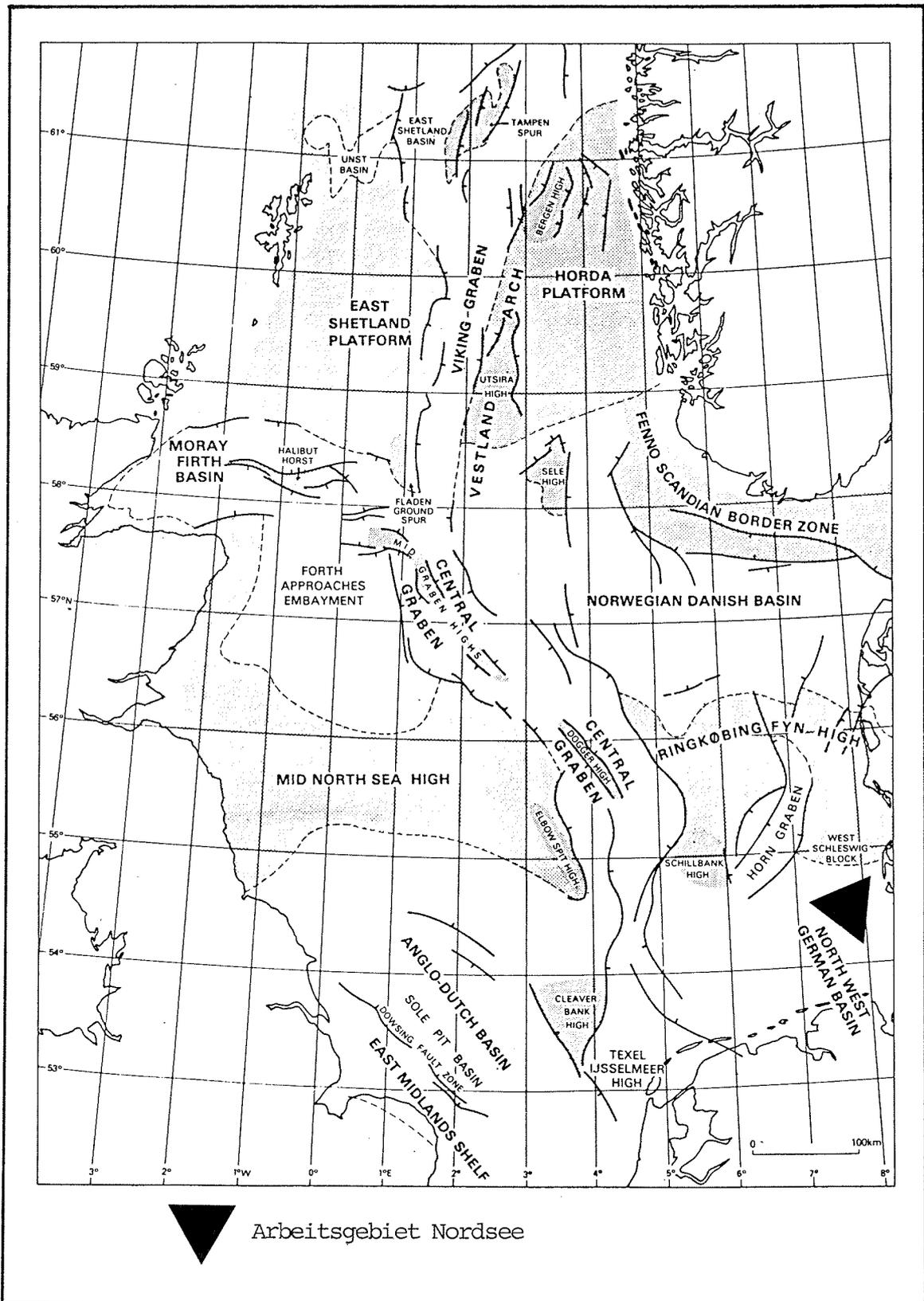


Abb. 1: Hauptstrukturelemente der Nordsee  
aus: Petroleum Geologie of the Continental Shelf  
of North-West Europe, ILLING & HOBSEN (1981)

Der während des Holozän stattfindende, un stetige Meeresspiegelanstieg beträgt nach SINDOWSKI (1962) von 7500 v. Chr. bis heute 35 m an den deutschen Nordseeküsten.

Ursachen und Dynamik des Meeresspiegelanstiegs sind das relativ schnelle Abtauen der mächtigen Inlandeismassen Skandinaviens, nach WOLDSTEDT (1958) im Kern der Vereisungen ca. 3000 m mächtig, die isostatischen Landhebungen als Folge der Druckentlastung durch abschmelzendes Eis und die epirogenetische Absenkungstendenz des Nordseebeckens bis heute.

Die Inseln im deutschen Nordseeküstenbereich sind zum Teil Aufbauformen (Ostfriesische Inseln) oder Abbauförmn (Nordfriesische Inseln). Die Ostfriesischen Inseln sind nach der Platenhypothese von BARCKHAUSEN (1969) durch Dünenkernbildung holozäner Sande auf hochwasserfreien pleistozänen Geestplatten entstanden. Die Nordfriesischen Inseln besitzen ebenfalls einen pleistozänen, z.T. tertiären Kern, um den holozäne Sande gelagert wurden.

Helgoland nimmt unter den deutschen Inseln eine Sonderstellung ein, da seine Entstehung auf Halokinese des Zechsteinsalzes im Tertiär und dadurch bedingte Aufwölbung der hangenden mesozoischen Schichten zurückzuführen ist, WURSTER (1962).

Die quartäre Sedimentbedeckung erreicht in der nördlichen Nordsee maximale Mächtigkeiten von 700 m, während in der mittleren und südlichen Nordsee z.T. 500 und 1000 m mächtige Quartärsedimente vorliegen, CASTON (1979), vgl. Abb. 2. Die Deutsche Bucht weist dagegen nur maximal 100 bis 300 m mächtige quartäre Bedeckungen auf.

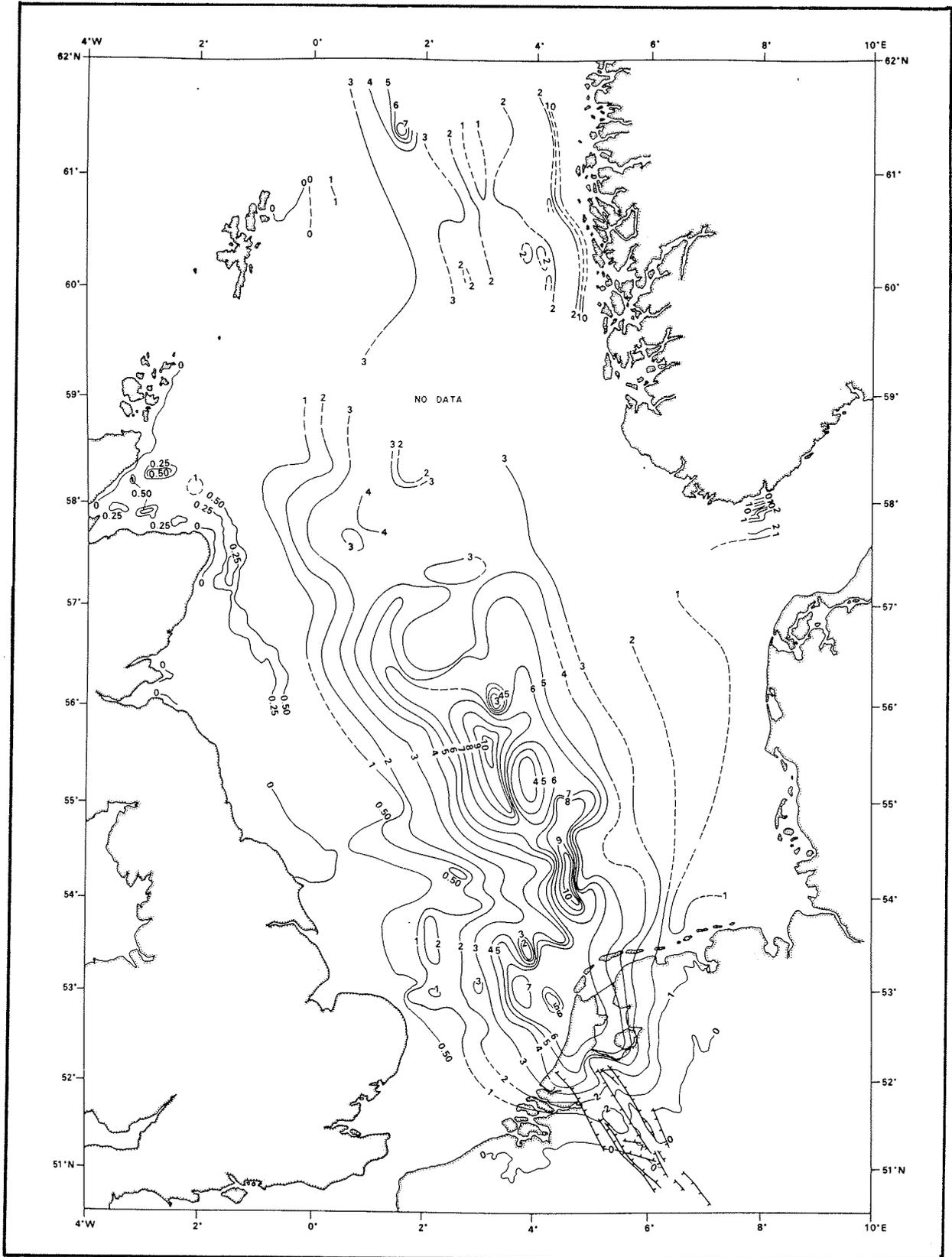


Abb. 2: Mächtigkeitsverteilung des Quartärs im Nordseebecken in 100 m-Schritten, nach CASTON (1979)

### 2.1.2 Die Ostsee

Die heutige Ostsee ist zwar wie die Nordsee ein flaches Schelfmeer des NW-europäischen Kontinentalssockels, doch in ihrer Entstehungsgeschichte im Gegensatz zur Nordsee als altem Absenkungsgebiet sehr jung.

Als die Inlandeismassen der Weichsel-Eiszeit zu schmelzen begannen, entstand ca. 8500 v.Chr. der süßwasserhaltige "Baltische Eisse", als Keimzelle der heutigen Ostsee in deren südlichen und östlichen Teilen.

Abschmelzen und Rückzug der jungpleistozänen Eismassen bewirkten einen glazialeustatischen Wasserspiegelanstieg, der dem Baltischen Eisse einen Durchbruch zum Skagerrak eröffnete, IGNATIUS et al. (1981). So konnte Salzwasser mit einer subarktischen Meeresfauna eindringen, nach deren Hauptvertreter, der Muschel *Portlandia arctica* (früher *Yoldia arctica*), das nunmehr salzig-brackige Yoldiameer-Stadium (8000 - 7250 v.Chr.) benannt wurde, DIETRICH (1974).

Andauernde isostatische Landhebungen Skandinaviens durch Eisentlastung führte zum Schließen der Meeresstraße. Die Ostsee wurde erneut zum Binnensee und süßte durch die Schmelzwassermassen zum Ancylussees (7250 - 5100 v.Chr.) aus (nach der Süßwasserschnecke *Ancylus fluviatilis*). Da der Ancylussees Wasserüberschuß besaß, DIETRICH (1974), mußte er zwangsläufig überfließen. Wegen der isostatischen Hebung Mittelschwedens verlagerte sich der Abfluß nach S, so daß zum zweiten Mal ein Salzwasseranschluß hergestellt wurde. Nachdem der Anstieg des Weltmeeres den Wasserspiegel des Ancylussees erreicht hatte, drang salzhaltiges Nordseewasser vor und bildete ein salzig-brackiges Meer, dessen Leitform die Schnecke *Littorina littorea* wurde - Littorinameer (5100 - 2000 v.Chr.). In dieser Epoche stieg der Salzgehalt der holozänen Ostsee auf seinen höchsten Wert, BRINKMANN (1977). Während der letzten 4000 Jahre süßte das Meer immer

weiter aus, da die fortdauernde isostatische Landhebung zu einer Verkleinerung des Littorinameeres führte und die Verbindungen zur Nordsee verengt wurden. In das mehr und mehr verbrackende Meer drang die Brackwasserschnecke *Lymnaea ovata* vor - Limnaeameer (2000 v. - 500 n.Chr.).

Seit 1500 Jahren ist die Leitform die Sandmuschel *Mya arenaria*, was zur Bezeichnung des bislang letzten Entwicklungsstadiums der Ostsee als Myameer führte.

Einen Überblick der heutigen Gestalt der Ostsee gibt Abb. 3.

Die Topographie des südlichen Ostseebeckens wurde hauptsächlich durch die Ausschürfung der Gletscher der Weichsel-Eiszeit geprägt, DIETRICH & KÖSTER (1974), die eine Folge von Becken und Schwellen hinterließen (s. Abb. 4).

Während die Nordsee als altes Absenkungsgebiet große Sedimentmächtigkeiten (lokal bis zu 6000 m) aufweist, fehlen Sedimente in der Ostsee völlig oder sind sehr dünn. Quartäre Ablagerungen kommen besonders in der südlichen und westlichen Ostsee vor, am Boden der nördlichen Ostsee stehen vorwiegend Präkambrium und Alt-Paläozoikum des Fennoskandischen Schildes an.

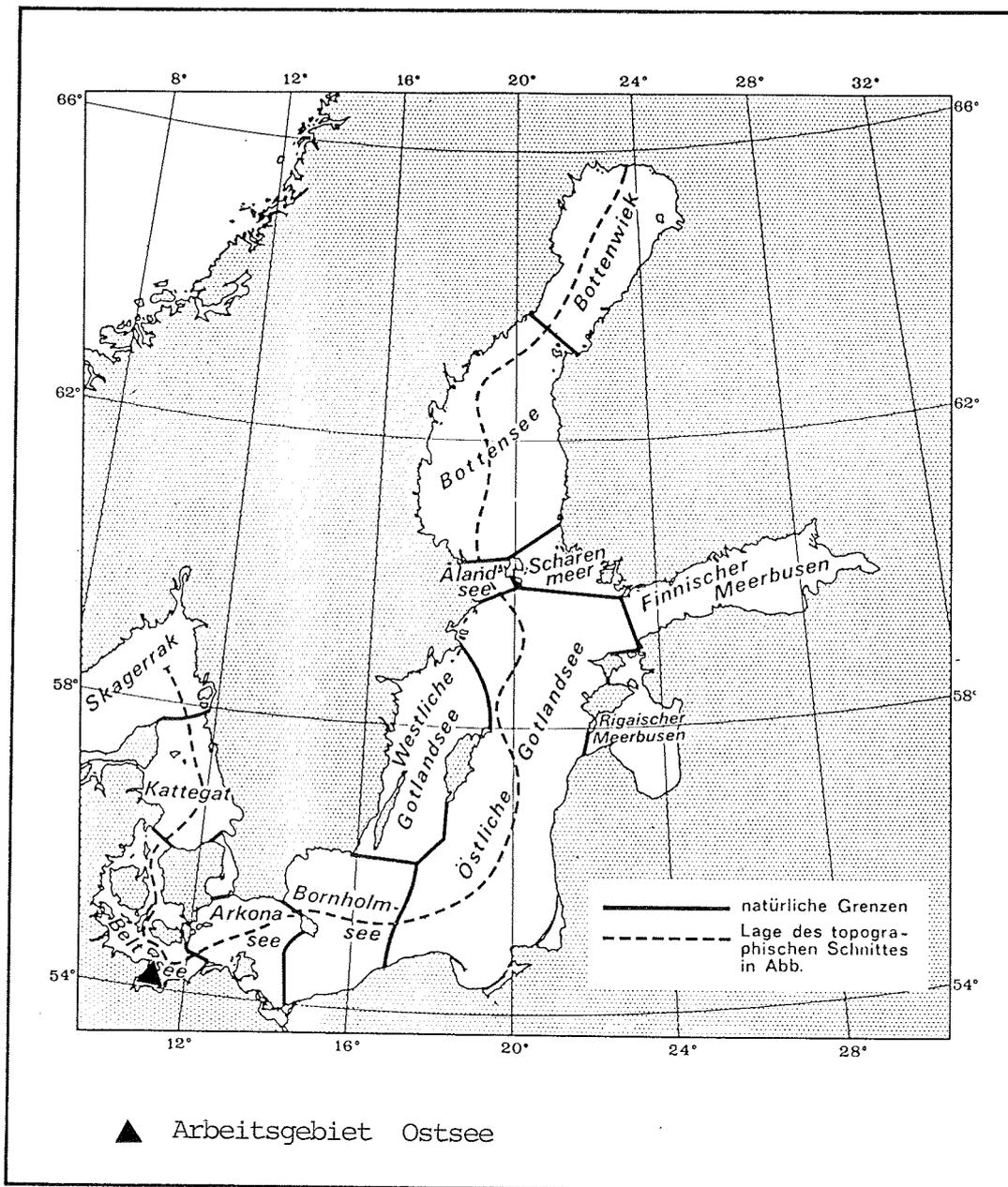


Abb. 3: Gliederung der Ostsee nach WATTENBERG (1949)

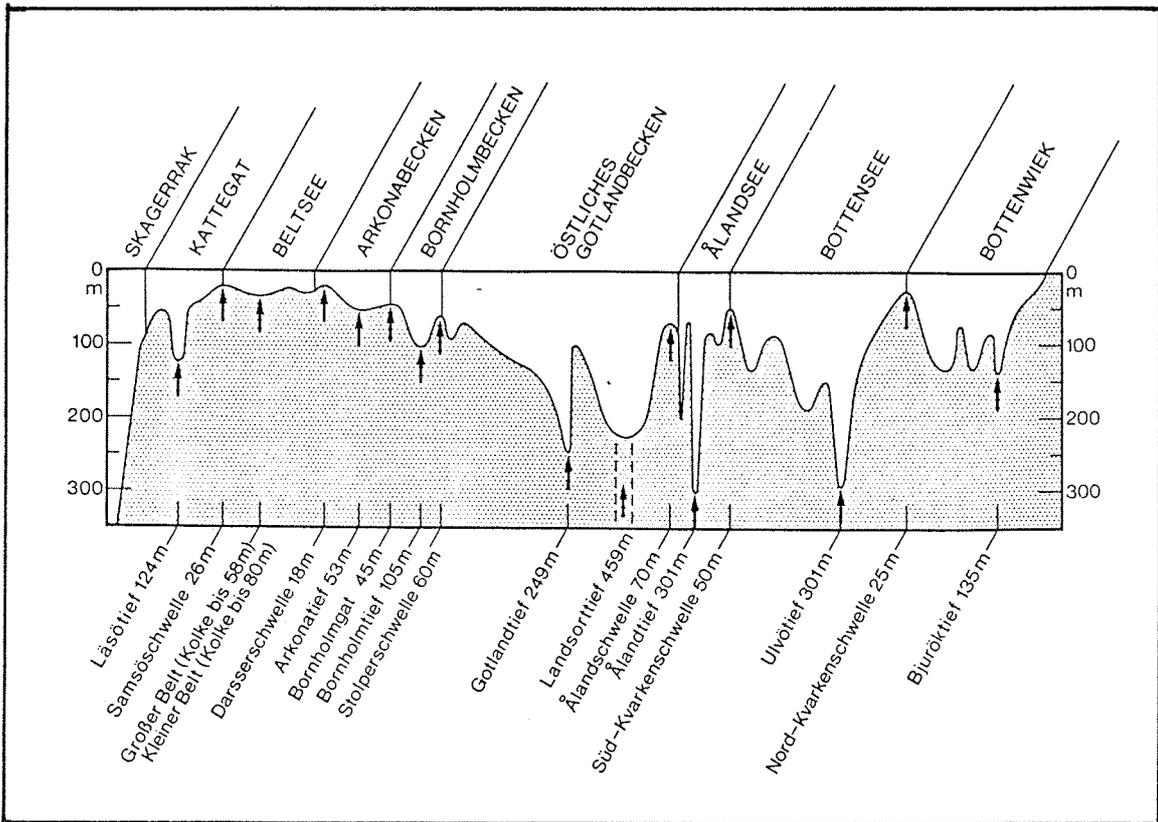


Abb. 4: Topographischer Schnitt durch die Ostsee nach WATTENBERG (1949)

### 2.1.3 Die Antarktis

Der antarktische Kontinent ist mit einer Fläche von nahezu 14 Millionen km<sup>2</sup> fast doppelt so groß wie Australien und mit einer mittleren Höhe von 2040 m der höchste Kontinent der Erde, denn die mittlere Höhe der restlichen landbedeckten Welt beträgt gerade 730 m.

98 % des Kontinentes sind von bis zu 4000 m mächtigen Eismassen bedeckt, die ca. 80% des Süßwassers der Erde binden, KOHNEN (1981). Zu den Kontinentalrändern abfließende Eismassen bilden zwei Schelfeisflächen von je fast 500000 km<sup>2</sup> (Größe Frankreichs), den Filchner- und den Ross-Eisschelf.

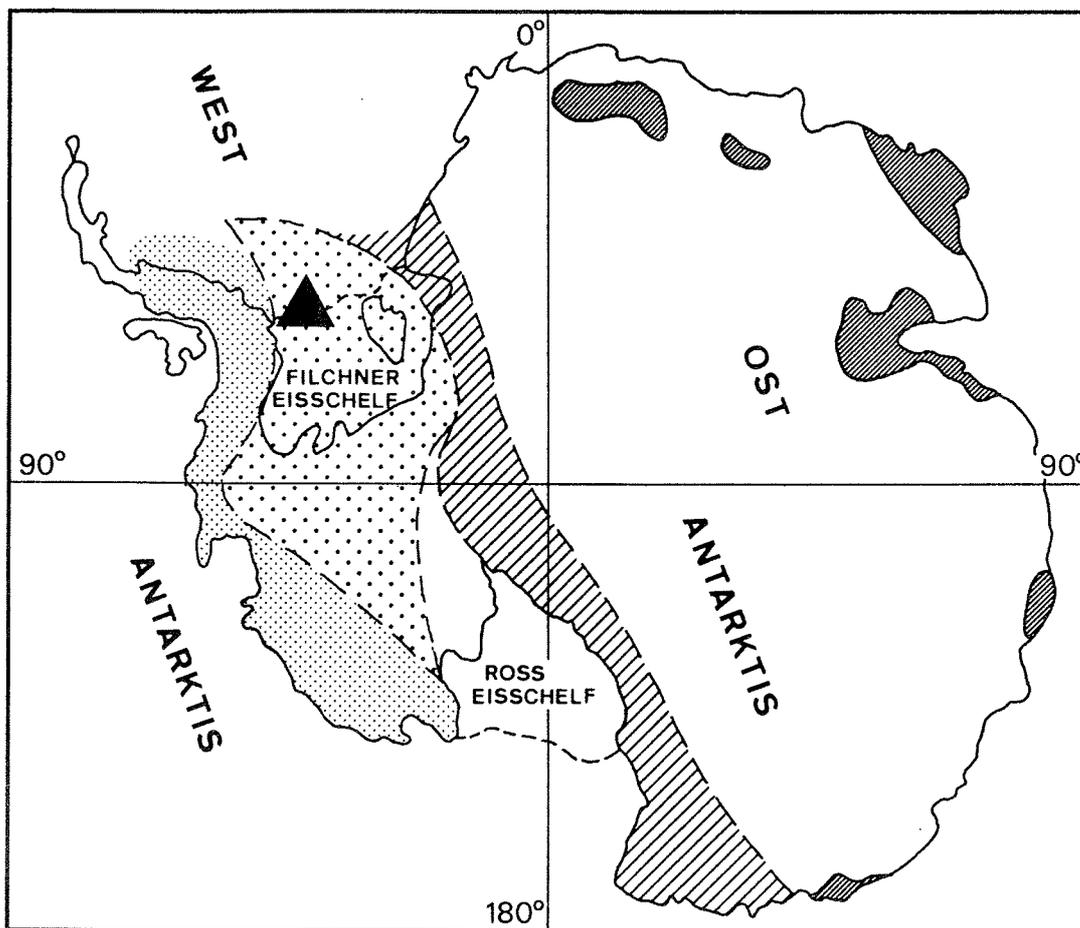
An der Verbindungslinie der beiden östlichen Schelfeiskan-  
ten erfolgt die geographische Teilung in die schildförmige  
Ostantarktis und die stärker gegliederte Westantarktis mit  
einer niedrigeren Eiskappe, aber den höchsten Erhebungen  
des Kontinents (Vinson-Massiv: 5170 m im Ellsworth Gebir-  
ge). In der geographischen Zweiteilung spiegelt sich in  
etwa die geologische Gliederung wider.

Die Ostantarktis besteht aus einem präkambrischen Schild,  
der hauptsächlich aus hochmetamorphen Gneisen und Graniten  
aufgebaut wird, TESSENSOHN (1979) - s. Abb. 5.

Im Westen schließt sich an den Schild das kaledonische Ross  
Orogen an, das als Transantarktisches Gebirge den Kontinent  
in einer Länge von 4000 km durchquert.

Auf das Ross Orogen folgen das mesozoische Ellsworth-Orogen  
oder die Gondwaniden und schließlich die andine Gebirgsbil-  
dung des unteren Tertiärs, die den Gebirgsbogen der Antark-  
tischen Halbinsel bis Mary-Byrdland formt. Zu dieser tekto-  
nischen Zonierung, die altersmäßig von Osten nach Westen  
verläuft, zählt noch eine vulkanische Provinz, deren rezen-  
te Aktivität z.B. auf der Ross-Insel und in Mary-Byrdland  
zu beobachten ist, KOHNEN (1981), und sich an den Riftsy-  
stemen der Westantarktis orientiert.

Besonders die Beakon-Folge des Ellworth-Orogens mit permo-  
triadischen Kohleflözen und Glossopteris-Gangamopteris-  
Faunen sowie deren Äquivalente in Südafrika und Südamerika,  
untermauern die Existenz von Gondwanaland. Die Gliederung  
der Antarktis und die Fortsetzung ihrer tektonischen Ein-  
heiten in den umgebenden Schilden Gondwanas zeigt Abb. 6.



▲ Arbeitsgebiet "Antarktis"

- |   |   |   |                               |
|---|---|---|-------------------------------|
|  | Transantarktisches Gebirge (Ross Orog.) |  | Andine Zone                   |
|  | metamorphes Präkambrium                 |  | Gondwaniden (Ellsworth Orog.) |

Abb. 5: Geologisch-tektonische Übersicht der Antarktis (umgezeichnet nach TESSENSOHN, 1979)

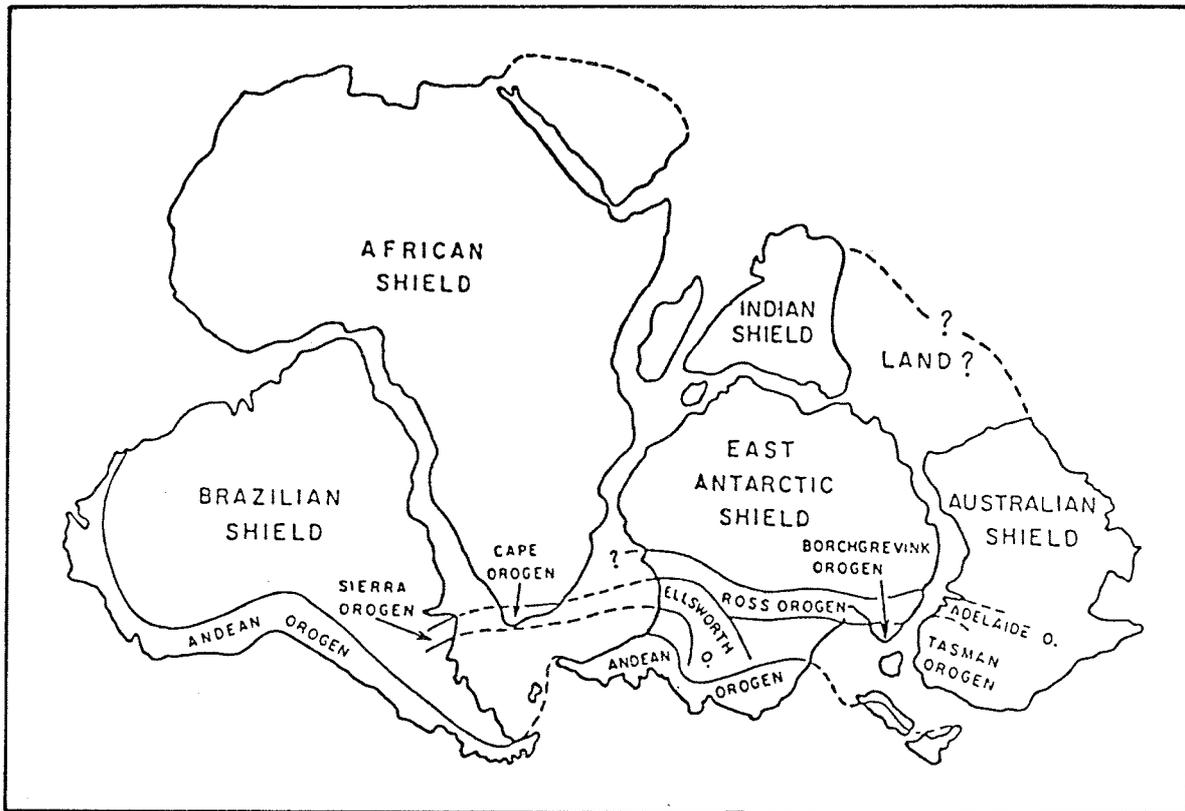


Abb. 6: Gondwana und die tektonische Gliederung der Antarktis, nach CRADDOCK (1977)

Nach TESSENSOHN (1979) erfolgte der Zerfall Gondwanalands in folgenden zeitlichen Schritten:

- Trennung von West- und Ostgondwanaland (Südamerika-Afrika/Antarktis-Australien) und Lösung Indiens von der Antarktis (Trias? oder Jura),
- Trennung Südamerikas von Afrika (oberer Jura),
- Driften der getrennten Komplexe (Kreide), möglicher neuer Kontakt Südamerika-Antarktis,
- Trennung Australiens von der Antarktis (Eozän),
- Trennung Südamerikas von der Antarktis (ab Oligozän).

Während des Driftens der Kontinente blieb die Antarktis weitgehend lagestabil, die übrigen Kontinente entfernten sich von ihr nach Norden. Die zwei großen mittelozeanischen Rückensysteme, das atlantische und das pazifische, sind die Driftachsen und laufen im Süden um die Antarktis herum, um sich im Indischen Ozean wieder zu treffen. Dieser seismisch aktive "Ring" hält offenbar jede seismische Aktivität von dem passiven zentralen Block fern, TESSENSOHN (1975).

Die Trennung von Südamerika ab dem Oligozän leitete die fortschreitende Abkühlung der Antarktis ein, da der Wärme- fluß von Nord nach Süd durch die Isolierung von den anderen Kontinenten unterbrochen war, KOHNEN (1981).

Die progressive Vergletscherung wurde durch den Albedo-Ef- fekt gefördert, so daß sich interglaziale Temperaturer- höhungen kaum auswirkten. PÉWÉ (1960) in NILSSON (1983) postulierte multiple antarktische Vergletscherungen, die z.B. zum viermaligen Expandieren des Ross-Eisschelfes führ- ten.

Nach THOMAS (1979) war die westantarktische Eisdecke ca. 30 % größer als heutzutage. Die jüngste Vereisung verlief zeitgleich zum Weichsel-Glazial der Nordhemisphäre. Unter- stützt durch Paläotemperaturuntersuchungen in Eiskernen der Antarktis und Grönlands, stellte NILSSON (1983) fest, daß Kalt- und Warmzeiten beiderseits des Äquators synchron stattfanden.

### 3 Die Probennahmestationen der Arbeitsgebiete

#### 3.1 Lage und Positionen

Die Beprobung der südlichen Deutschen Bucht konnte durch die freundliche Unterstützung des Instituts für Meereskunde und des Instituts für Geophysik der Universität Kiel mit dem FS POSEIDON 1983 durchgeführt werden. Die Lage der Stationen zeigt Abb. 7, die Positionen Tab. 1 im Anhang. Die Nordseeproben werden im folgenden als Proben "P" (Poseidon) bezeichnet.

Ebenfalls 1983 konnte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Kiel die Probennahme in der Lübecker-Mecklenburger Bucht der Ostsee auf dem FK LITTORINA erfolgen. Lage und Positionen der Stationen zeigen Abb. 8 sowie Tab. 1 im Anhang. Die Ostseeproben sind im folgenden mit der Signatur "Li" versehen.

1984 wurde durch das Alfred-Wegener Institut für Polarforschung auf der Antarktisexpedition II/4 mit dem FS POLARSTERN Probenmaterial entlang des Filchner Eisschelfs gewonnen und zur Verfügung gestellt. Lage und Positionen der Antarktisproben "A" zeigen Abb. 9 sowie Tab. 1 des Anhangs.

#### 3.2 Probennahme und Konservierung

Die Probennahme bei den drei Arbeitsgebieten erfolgte ungestört mit REINECK-Kastengreifern. An Bord wurden die obersten 5 cm der Sedimente vorsichtig abgetrennt, in Plastiktüten verschweißt und sofort tiefkühlkonserviert.

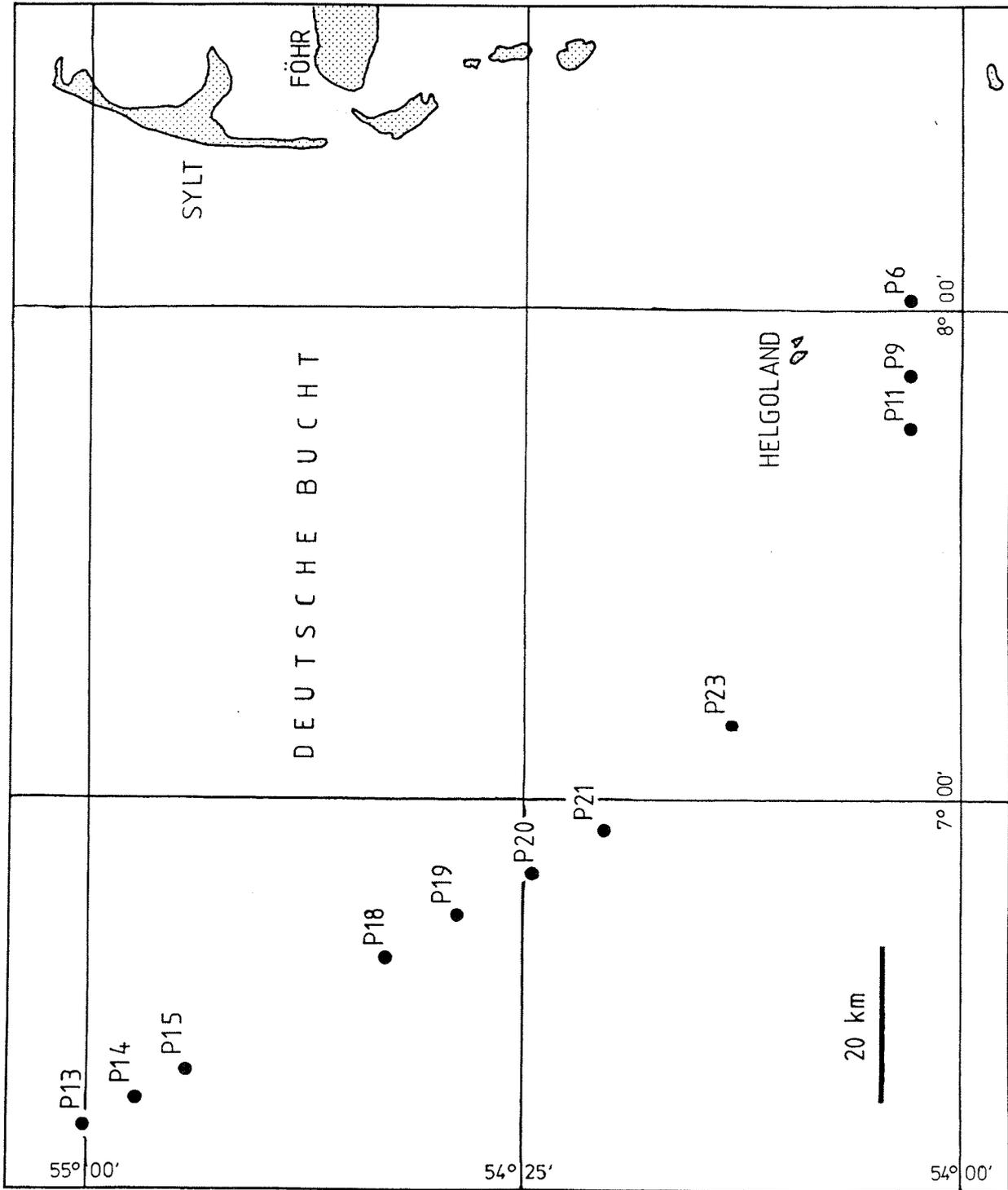


Abb. 7: Lage der Probennahmestationen "P", Nordsee

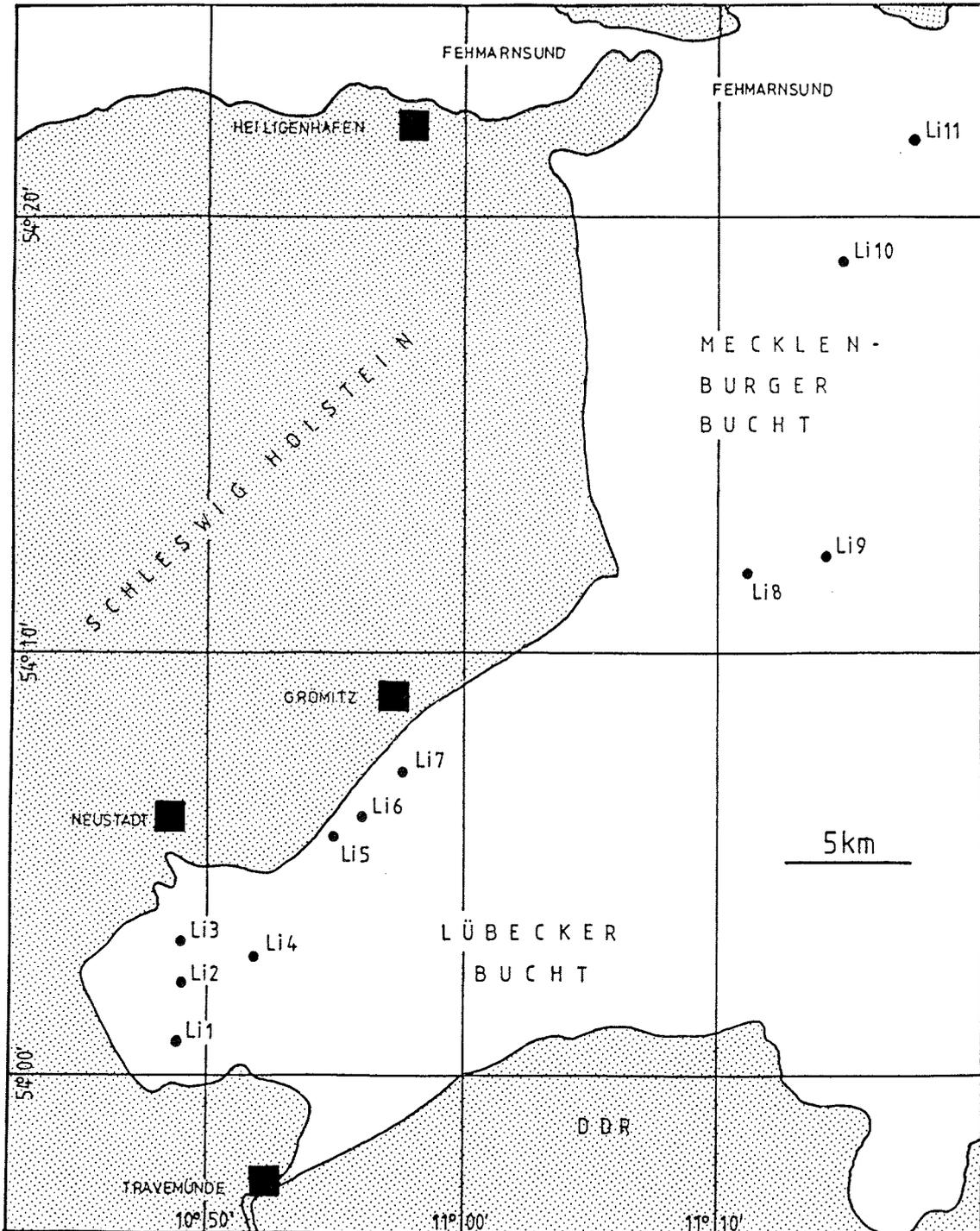


Abb. 8: Lage der Probennahmestationen "Li", Ostsee

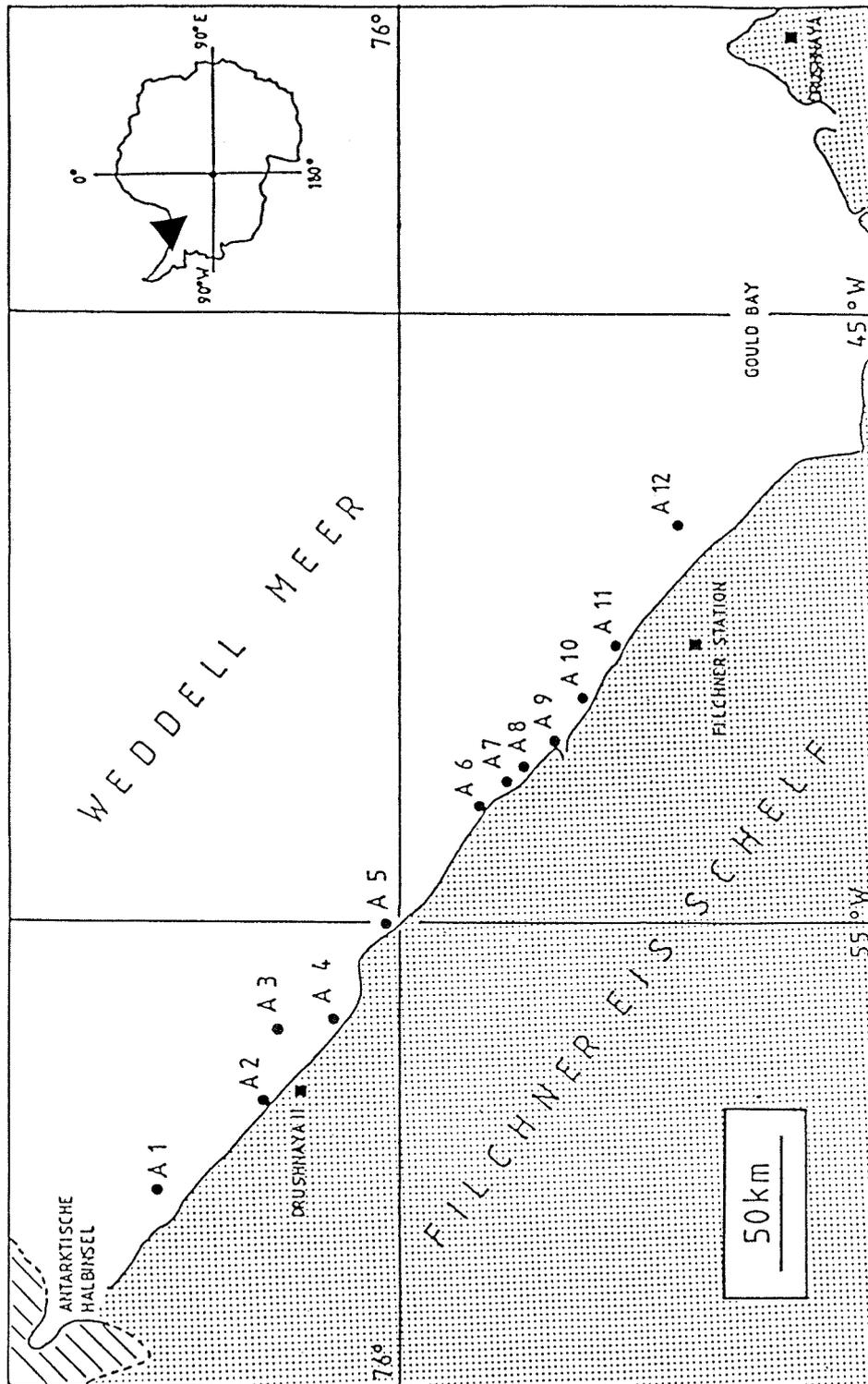


Abb. 9: Lage der Probennahmestationen "A", Antarktis

### 3.3 Hydrographie

#### 3.3.1 Arbeitsgebiet Nordsee

Die Wassermassen des Randmeeres Nordsee (mittlere Tiefe 94 m; DIETRICH, 1974) werden von folgenden Zuflüssen gebildet:

- atlantischer Zufluß zwischen Schottland und Norwegen,
- Zufluß von Ostseewasser mit geringem Salzgehalt im Bereich des Skagerrak,
- atlantischer Zufluß durch den Kanal formt die Wassermassen in der südwestlichen Nordsee sowie
- die Süßwasserzuflüsse des Inlandes im Bereich der Küsten.

Beeinflußt durch die offenen Zugänge zum Ozean wird die Nordsee im halbtägigen Rhythmus von Gezeitenwellen durchlaufen, die an den Küsten der Deutschen Bucht Tidenhübe von ca. 2 m und Springtidenhübe von 4 m erreichen, REINECK (1978). Die großräumigen Bewegungen der Wassermassen werden durch meteorologische Einflüsse, wie z.B. vorherrschend westliche Winde modifiziert, so daß im Bereich der Deutschen Bucht Küstenlängsströme und zirkulare Strömungskörper resultieren, RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN (1980). Dies führt dazu, daß die Wasserfracht der schadstoffbelasteten Flüsse nicht nur die größte Verweildauer in der Nordsee haben, sondern auch vorzugsweise in einem schmalen Streifen entlang der Küste transportiert werden, DHI (1978b).

Der Salzgehalt in der nördlichen Nordsee beträgt 35 ‰ und nimmt küstenwärts, bedingt durch süße Flußwässer, bis auf Werte um 30 ‰ ab, FAIRBRIDGE (1966). Die Temperaturen des Nordseewassers in der Deutschen Bucht schwanken jahreszeitlich von 3°- 17°C. Großregional bestehen Halin- und Thermoschichtungen, RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN (1980).

Der pH-Wert des Nordseewassers umfaßt den Bereich 7,5 bis 8,5. Die Wassertiefen der Probennahmestationen bewegen sich von 28 - 41 m.

### 3.3.2 Arbeitsgebiet Ostsee

Im Gegensatz zur Nordsee ist die Ostsee ein kontinentales, fjordähnliches Mittelmeer mit nur engen und flachen Zugängen durch den Skagerrak zur Nordsee und nur sehr geringer Gezeiteneinwirkung (dm-Bereich). Das brackige Wasser der Ostsee wird durch Süßwasserzuflüsse und den Austausch mit höhersalinarem Nordseewasser beeinflusst. Begünstigt durch die Windverhältnisse, dringt Ostseewasser mit 15 ‰ - 20 ‰ Salinität nicht allmählich, sondern sprunghaft in den Skagerrak ein, während es von dichterem und höhersalinarem Nordseewasser in Gegenrichtung unterströmt wird (Druckgefälle). Bei den Austauschvorgängen muß die Darsser-Schwelle mit einer Satteltiefe von 18 m überwunden werden, DIETRICH (1975).

Durch Salzwasserzufluß einerseits und fortschreitende Ausübung andererseits besteht ganzjährig eine haline Schichtung von salzarmem Oberflächenwasser und dichterem, salinarem Tiefenwasser. Das Oberflächenwasser bildet besonders im Sommer eine warme homotherme Haut, SEIBOLD (1974), deren Untergrenze sich als Sperrschicht zum kaltem Tiefenwasser biologisch und chemisch auswirkt. Behindert durch die Folge von Becken und Schwellen wird das Tiefenwasser nur sehr selten ausgetauscht und so seine Eutrophierung begünstigt. Die Sauerstoffbilanz der Ostsee ist insgesamt negativ, NATIONALKOMITEE (1981).

Der Rückgang des Makrobenthos in der Lübecker Bucht ist ein Hinweis darauf, daß sich die Sauerstoffverhältnisse in der grundnahen Wasserschicht dieses Gebietes zunehmend verschlechtern haben.

Nach dem NATIONALKOMITEE (1981) liegt der pH-Wert des Ostseewassers im allgemeinen bei 7,8 - 8,2.

Die Wassertiefen der Probennahmestationen "Li" schwanken von 13 - 20 m.

### 3.3.3 Arbeitsgebiet Antarktis

Das südliche Weddell Meer steht im Gezeiteneinfluß der Ozeane (Tidenhub 0,6 - 3,2 m). Es herrschen westliche Winde vor, FAIRBRIDGE (1966), die Wellenbewegung wird durch fast permanente Packeisbedeckung gehemmt.

Gerade im Weddell Meer entsteht der überwiegende Anteil antarktischen Bodenwassers, DIETRICH et al. (1975). Dabei sinkt kaltes Oberflächenwasser von ca.  $-1,0^{\circ}\text{C}$  und 34,6 ‰ Salzgehalt bis auf den antarktischen Kontinentalschelf - mit ca. 1000 m unter NN tiefster Schelf der Erde, JOHNSEN et al. (1981) - und breitet sich, beeinflusst von der Morphologie des Tiefseebodens, nach Norden aus. Das kalte Bodenwasser behält auf seinem Weg nach N Temperaturen von  $0^{\circ}$  -  $4^{\circ}\text{C}$  bei, ist mit  $\text{CO}_2$  angereichert und verursacht Kalklösung aus den Sedimenten. Da in der Tiefsee keine Pflanzen leben, werden die Nährstoffe des Bodenwassers nicht verbraucht, sondern durch den Zerfall organischer Substanz noch angereichert, SEIBOLD (1974).

Im Arbeitsgebiet Antarktis wurden tiefste Temperaturen von  $-2,11^{\circ}\text{C}$  an der Station A 4 gemessen, ROHARD (1985). Einen Überblick weiterer hydrographischer Daten gibt Tab. 1. Die Wassertiefen der Probenstationen "A" liegen im Bereich von 257 - 624 m.

Station	Wassertiefe (m)	Gerätetiefe (m)	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	Salinität (‰)
A 1	624	450	- 1,90	34,797
A 2	520	500	- 2,08	34,743
A 4	347	325	- 2,11	34,669
A 5	462	460	- 1,99	34,615
A 6	405	387	- 2,09	34,579
A 9	300	285	- 1,48	34,635
A 12	231	230	- 1,82	34,691

Tab. 1: Temperatur und Salinität des Bodenwassers aus-  
suchter Probennahmestationen "A";  
nach ROHARD (1985), frdl. schriftliche Mitteilung

## 4 Sedimentologische Untersuchungen

Die tiefkühlkonservierten Proben der drei Arbeitsgebiete wurden bei Zimmertemperatur aufgetaut und im Trockenschrank bei 60°C getrocknet. Die Lagerung des Materials erfolgte nach vorsichtigem Mörsern mit einem Gummipistell in verschließbaren Plastikboxen. Für die jeweiligen Untersuchungen wurden repräsentative Unterproben gewonnen.

### 4.1 Granulometrie

#### 4.1.1 Methodik

Zur Untersuchung der Korngrößenverteilung wurde für die Fraktionen  $\geq 125 \mu\text{m}$  ein Vibrationssiebsatz verwendet. Für die Ermittlung der feineren Fraktionen stand ein SILAS GRANULOMÈTRE 715 E060 zur Verfügung. Durch Laserbestrahlung entstehen Beugungsspektren an den Partikeln, die in Suspension mehrfach durch eine Meßzelle geleitet werden. Die Beugungsspektren sind abhängig von der Partikelgröße. Befinden sich ausreichend viele Partikel im Laserstrahl, ist es möglich, aus ihren Beugungsspektren die Größenverteilung beugungsgleicher Partikel elektronisch zu ermitteln, HEUER, LESCHONSKI (1984).

Der Auflösungsbereich des SILAS-Gerätes umfaßt Partikelgrößen von  $1 \mu\text{m}$  -  $192 \mu\text{m}$ .

#### 4.1.2 Ergebnisse und Auswertung

Die prozentualen Verteilungen der ermittelten Korngrößenintervalle der Proben "P", "Li" und "A" sind in den Abbildungen 10a - 12b als Kornsummenkurven dargestellt.

Für die Berechnung der Kenngrößen der Kornverteilungskurven wurden die Parameter von TRASK (1932) herangezogen:

$$\begin{aligned}\text{Median } Md &= Q_2 \\ \text{Sortierung } So &= \sqrt{Q_3/Q_1} \\ \text{Schiefe } Sk &= Q_1 Q_3 / Q_2^2,\end{aligned}$$

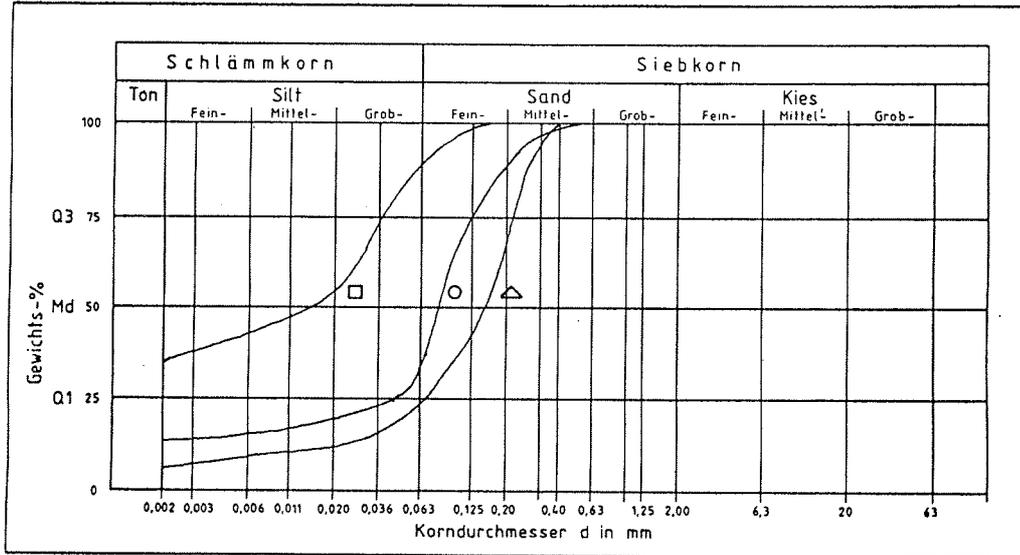
wobei die Quartilwerte  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $Q_3$  die Korngrößen der 25 %- , 50 %- und 75 %-Durchgänge der Summenkurven sind.

Die Gütebestimmung der Sortierungsgrade erfolgte nach FÜCHTBAUER (1959):

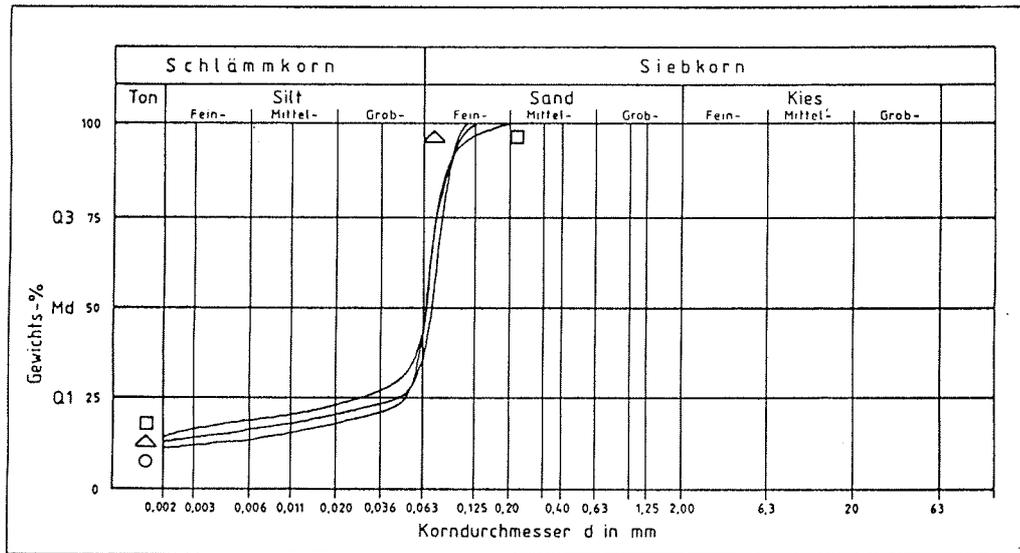
$\sqrt{Q_3/Q_1}$	Sortierungsgrad
bis 1,23	sehr gut
bis 1,41	gut
bis 1,74	mittelmäßig
bis 2,0	schlecht
> 2,0	sehr schlecht

Der Medianwert  $Md$  mm , bezeichnet die mittlere Korngröße, bei der 50 % des Kornmaterials gröber und 50 % feiner sind als diese. In den Fällen, in denen die Kornsummenkurven keinen Schnittpunkt mit der  $Q_1$  (25 %)-Linie erreichten, wurde als  $Q_1$  einheitlich der Wert für die Fraktion  $< 2 \mu m$  verwendet. Für die Sortierung ergeben sich bei den betreffenden Proben folglich Werte von  $So > x$ ; die dazugehörige Schiefe ist in Klammern geschrieben (siehe dazu Tab. 2 bis 4). Mit diesem Hilfsschritt lassen sich die Charakteristika der Kornverteilungen gut beschreiben und interpretieren.

Aus den Kornsummenkurven wurden die Gehalte der Fraktionen  $< 63 \mu m$  und der Tonfraktionen ( $< 2 \mu m$ ) ermittelt und eine lithologische Sedimentansprache mit Hilfe des Sand-Silt-Ton-Dreiecks nach MÜLLER (1969a) vorgenommen (Abb. 13, 14, 16). Die z.T. sehr schlecht sortierten Sedimente der Ostsee und der Antarktis, deren größste Kornfraktionen im Bereich des Fein- und Mittelkieses liegen, erhalten bei der Ansprache die Zusätze  $y$  % fk (Feinkies) und  $z$  % mk (Mittelkies), siehe Tab. 2 - 4.



□ P 6    △ P 9    ○ P 11



□ P 13    △ P 14    ○ P 15

Abb. 10a: Kornsummenkurven der Proben P 6 - P 15, Nordsee

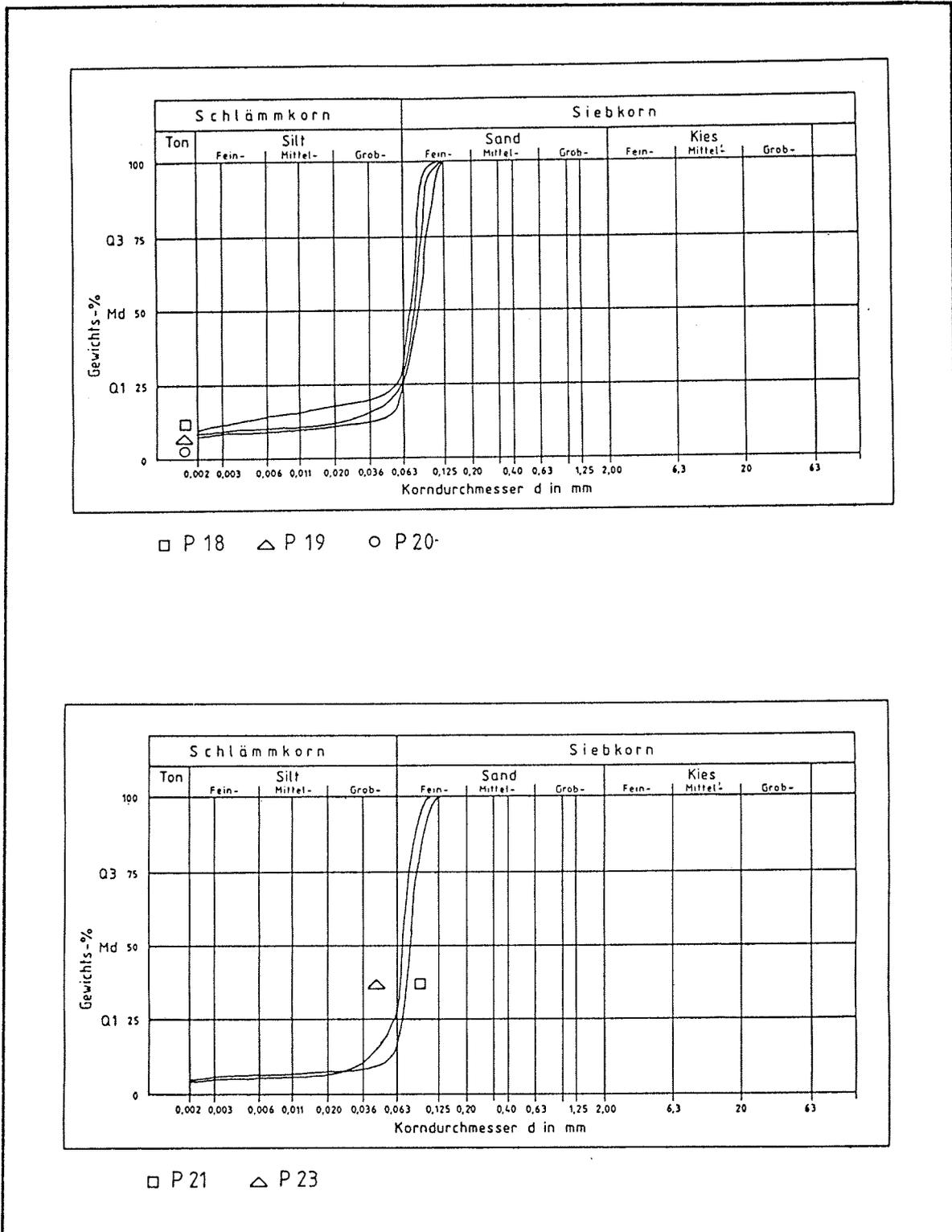


Abb. 10b: Kornsummenkurven der Proben P 18 - P 23, Nordsee

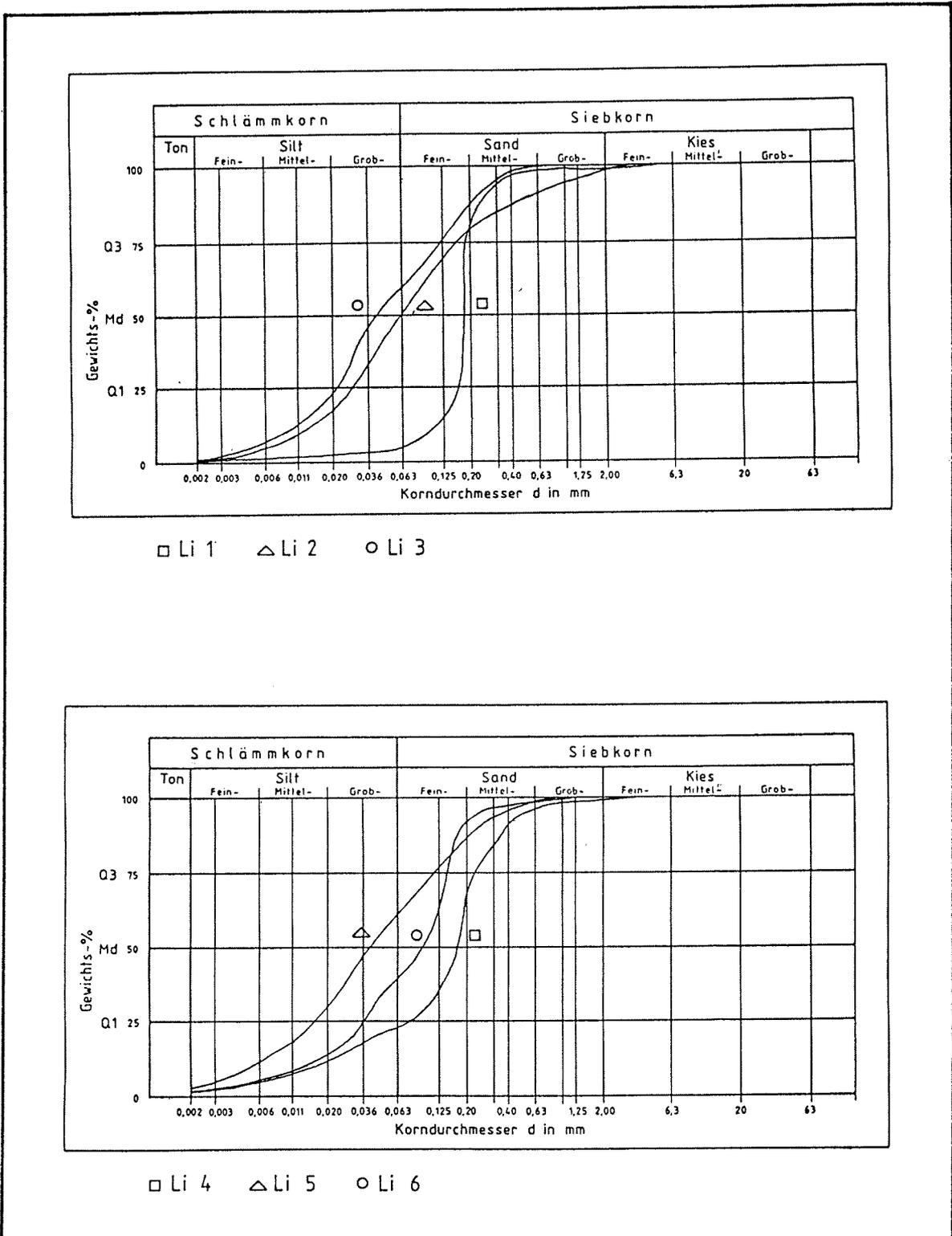


Abb. 11a: Kornsummenkurven der Proben Li 1 - Li 6, Ostsee

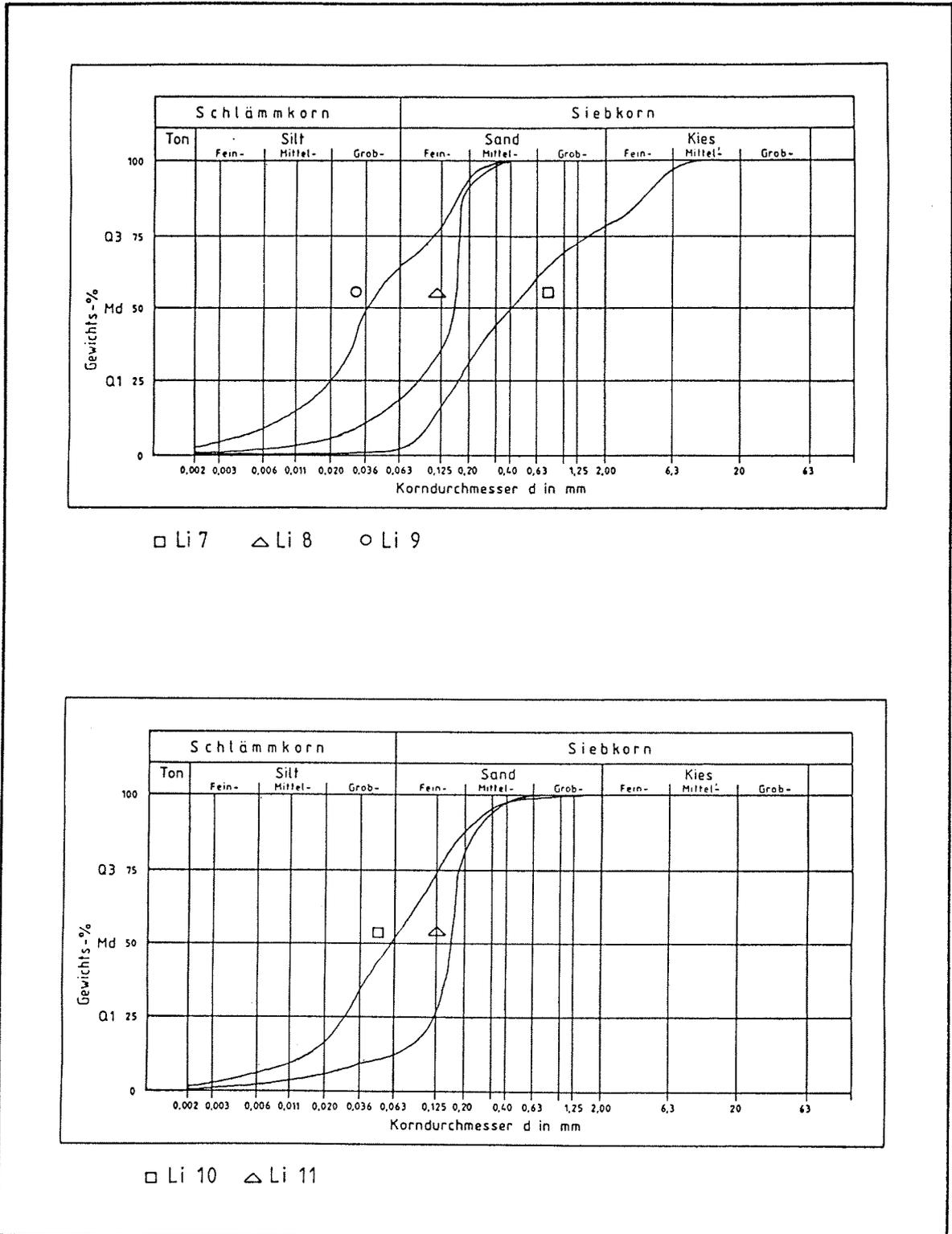


Abb. 11b: Kornsummenkurven der Proben Li 7 - Li 11, Ostsee

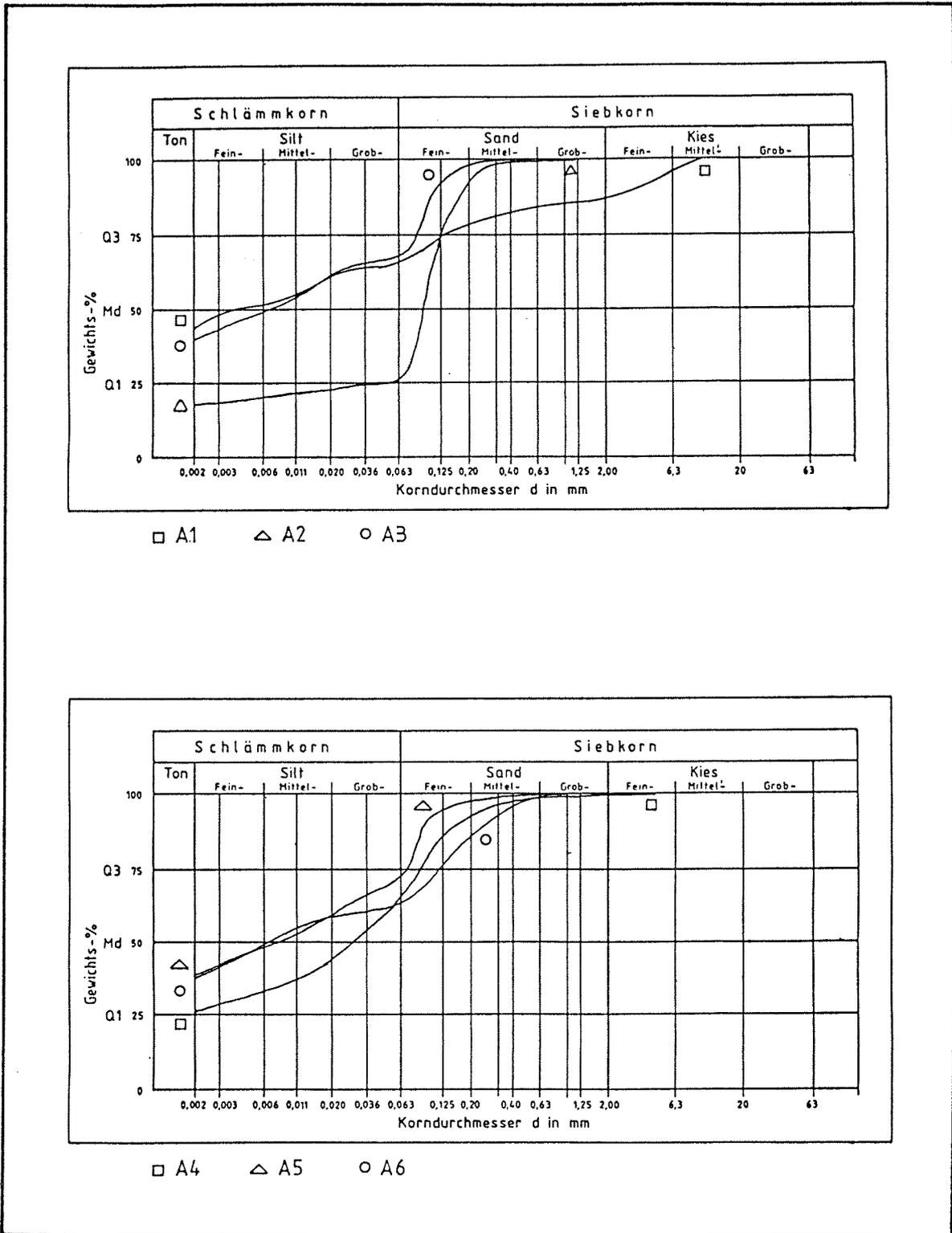


Abb. 12a: Kornsummenkurven der Proben A 1 - A 6, Antarktis

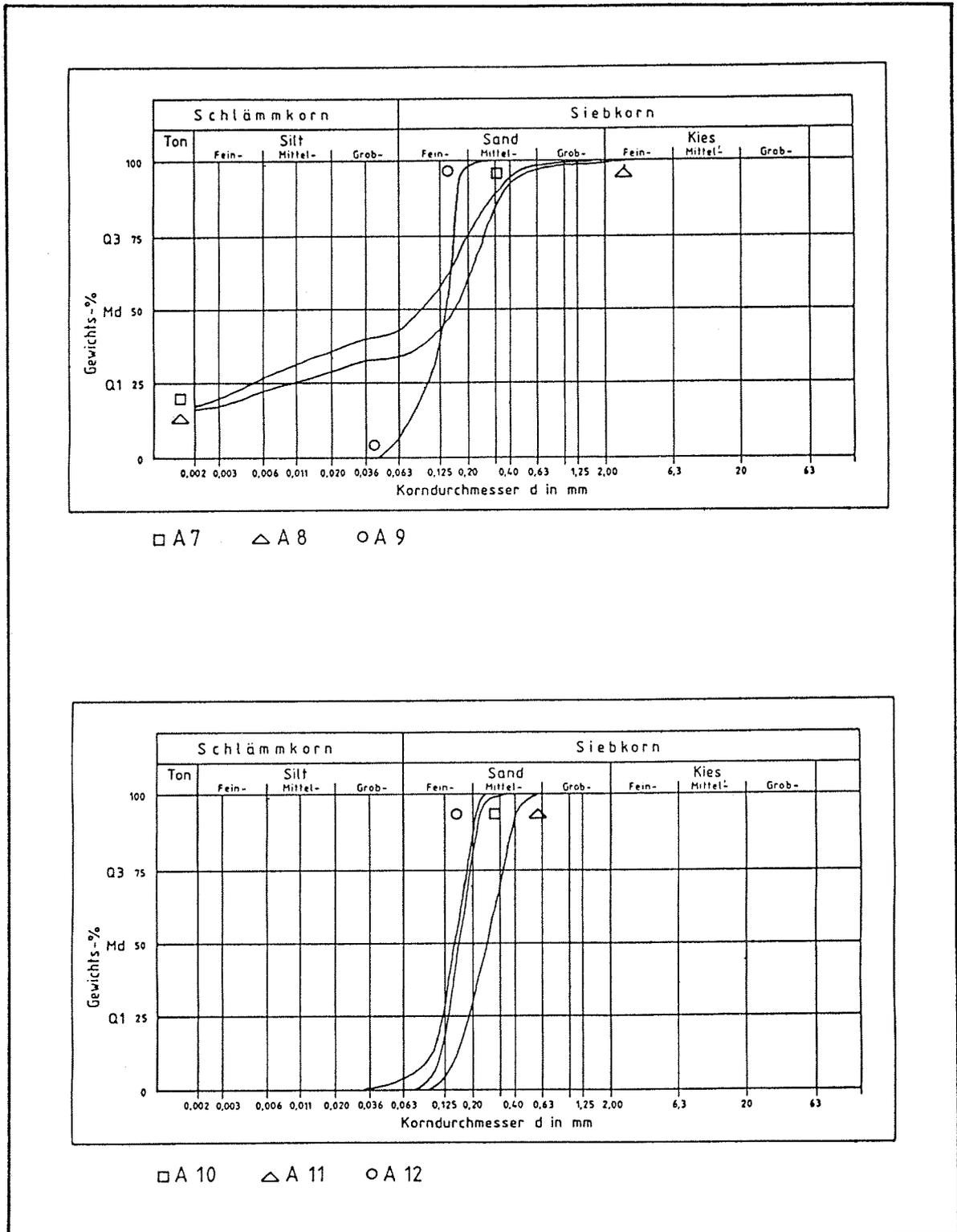


Abb. 12b: Kornsummenkurven der Proben A 7 - A 12, Antarktis

Die Signaturen des Sand-Silt-Ton-Dreiecks sind wie folgt zu lesen:

t: tonig, si: siltig, s: sandig, T: Ton, Si: Silt, S: Sand. Demnach bezeichnen die Kürzel tSiS einen "tonigen Silt-Sand".

Für die Nordseesedimente gilt, daß in holozäner Zeit so gut wie keine Sande über die Flüsse das Meer erreichten, RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN (1980), so daß die Sandanteile der Proben hauptsächlich pleistozäner Herkunft sind. Die Silt- und Tonfraktionen werden neben der Entstehung durch subaquatische Verwitterung und Transport entscheidend von der Suspensionszufuhr der Flüsse beeinflusst. Nach EISMA (1981) transportiert die Elbe jährlich 860000 t, die Weser 350000t Suspensionsfracht in die Nordsee.

In die Deutsche Bucht einströmendes, süßes Elbwasser wird durch die vor den Küsten wirkende Strömung nach Norden versetzt. Von Westen her strömendes, salinares Nordseewasser (atlantischer Zufluß vom Ärmelkanal; folglich Kap. 3.3.1) drückt einen Teil des süßen Weserwassers mit seiner Sedimentfracht in den Elbwasserkörper, HERTWECK (1983). Südöstlich von Helgoland werden die feinkörnigen Suspensionsmengen abgelagert und bilden das Schlickgebiet der Helgoländer Bucht.

Die sehr schlecht sortierte Probe P 6 "sandiger Ton-Silt" (siehe Tab. 2) liegt im Bereich der Westgrenze dieses Schlickgebietes und weist daher einen Gehalt von 34,9 % Tonfraktion und einen Median von nur 0,017 mm auf.

Die nach Westen anschließende Probe P 9, "siltiger Sand", schlecht sortiert, stammt aus tieferen Teilen der Helgoländer Bucht, ist jedoch gröber und besteht nur zu 6,1 % aus der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$ . Die tieferen, westlichen Teile der Helgoländer Bucht sind also nicht zwingend Sedimentfalle für feines Kornmaterial. Die Ursache liegt in dem von Westen

Probe	So	Sk	Md [mm]	< 63 µm [%]	< 2 µm [%]	Lithol. Ansprache
P 6	>6,48	(015)	0,017	80,4	34,9	sTSi
P 9	1,91	0,58	0,410	19,5	6,1	siS
P 11	1,76	0,94	0,091	26,5	12,5	tSiS
P 13	1,70	0,48	0,074	34,5	13,9	tSiS
P 14	1,36	0,74	0,079	28,7	12,7	tSiS
P 15	1,27	0,87	0,074	30,5	12,4	tSiS
P 18	1,20	0,89	0,080	25,0	11,1	tSiS
P 19	1,16	0,94	0,111	16,9	7,54	siS
P 20	1,18	0,90	0,110	24,4	9,8	siS
P 21	1,14	0,95	0,123	11,4	4,7	siS
P 23	1,17	0,93	0,079	18,3	5,7	siS

Tab. 2: Granulometrische Analyse der Nordseeproben "P"

her strömenden, salzigen Nordseewasser, das die westlichen Tiefen der Helgoländer Bucht füllt und das weniger dichte, süße Flußwasser "abblockt", HERTWECK (1983). So wird die Feinkornsedimentation auf morphologisch höher liegende Teile zurückgedrängt. Bei von westlichen Winden verursachten Stürmen erreichen bodennahe Salzwasserströme Geschwindigkeiten, die gerade auf den Flanken zu regionalen Tiefs zur Erosion feinkörnigen Materials führen können, SEIBOLD (1974). Das scheint für die Probe P 9 mit ihrem auffällig groben Median von 0,400 mm und geringen Silt-Anteil zuzutreffen.

Das Sediment der westlichsten Probe im Süden von Helgoland ist ein "toniger Silt-Sand", ebenfalls schlecht sortiert. Offensichtlich langsamere Strömungsverhältnisse ließen hier die Ablagerung von 12,5 % Tonfraktion zu. Da das Sedimentationsgebiet südöstlich Helgolands permanent durch die Flußwässer gespeist wird, sind recht hohe Sedimentationsraten

zu beobachten. DOMINIK et al. (1978) geben eine Rate von 70 - 77 cm/100 Jahre an; FÖRSTNER & PATCHINEELAM (1981) ermittelten an einem Sedimentkern südöstlich von Helgoland Sedimentationsraten von ca. 100 cm/100 Jahre.

Die Profillinie der Proben P 13 - P 23 fällt in den Bereich des NW-SE verlaufenden Elbe-Urstromtals. Dieses Sedimentationsgebiet ist älter als das im SE Helgolands, da bereits die pleistozän und altholozän transgredierende Nordsee dort ihre Sedimentfracht ablagerte (siehe Kap. 2.1.1). Die Mächtigkeit des Holozäns im Elbtal beträgt nach FIGGE (1981) bis zu 16 m, außerhalb davon selten mehr als 2 m.

Die Proben P 13 - P 18 liegen im NW sehr nahe am östlichen Rand des Urstromtals, das im Verlauf dieser Probenstationen östlich durch morphologisch höheres, anstehendes Pleistozän begrenzt wird, FIGGE (1981). Die Sedimente der Proben P 13 bis P 18 sind "tonige Silt-Sande", deren Anteile der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$  von 13,9 % (P 13) nach SW mit abnehmender Wassertiefe auf 11,1 % (P 18) zurückgehen. Die nach NW zunehmende Wassertiefe und die markante östliche pleistozäne Abgrenzung dieses Sedimentationsbereichs bewirken eine Herabsetzung der Strömungsgeschwindigkeiten und ermöglichen so die Ablagerung feineren Materials.

In südlicher Richtung folgen die Proben P 19 bis P 23, die einerseits etwas flacherem Wasser entstammen und deren Sedimentationsraum andererseits keine so markante östliche Pleistozänbegrenzung aufweist. Geringere Wassertiefe und flacherer Übergang zum Pleistozän ermöglichen stärkere Effektivität der Strömungen: feinstes Material wird erodiert. Dies belegen die "siltigen Sande" der Proben P 19 bis P 23 durch ihre herabgesetzten Gehalte der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$  sowie ihre sehr guten Sortierungen.

Der Schiefewert aller Nordseeproben ist  $< 1$ , d.h. der Feinkornanteil überwiegt im Kornspektrum. Im Sand-Silt-Ton-Dreieck (Abb. 13) setzt sich die im Spezialsedimentationsgebiet südöstlich Helgolands abgelagerte Probe P 6 deutlich von den mehr strömungsbeeinflussten Sedimenten ab.

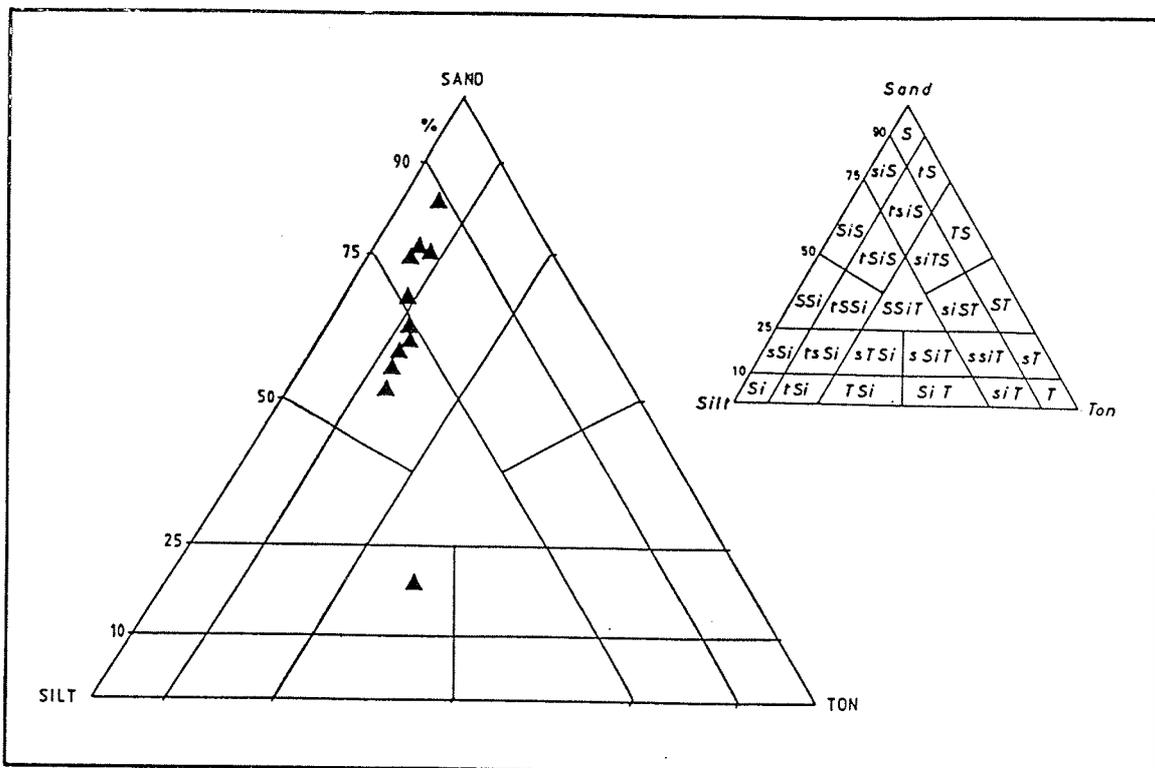


Abb. 13: Die Nordseeproben "P" im Sand-Silt-Ton-Dreieck nach MÜLLER (1969a)

Bei den Sedimenten der westlichen Ostsee spielt der Zutrag von Schwebgut durch Flüsse nur eine sehr geringe Rolle, SEIBOLD (1974). Die Sedimente sind pleistozänen Ursprungs, holozän aufbereitet, transportiert und sedimentiert. SEIBOLD et al. (1982) beschreibt die Ostsee als Musterbeispiel mariner Sedimentation: grobe Sedimente im Flachwasserbereich, feine und feinste Ablagerungen in Tiefen.

Gezeitenströme haben auf die Sedimente keinen Einfluß (s. Kap. 3.3.2). Hauptsächlich werden die Strömungen durch den Zufluß des Nordseewassers und von Winden verursacht. Letztere können z.B. in der Lübecker-Mecklenburger Bucht aperiodische Wasserstandsschwankungen bis 5,30 m (vor Travemünde) verursachen. Das ist mehr als der Springtidenhub der Deutschen Bucht.

Gleichzeitig entstehen seegangsbedingt starke Bodenströme. SCHWEIZER (1976) errechnete für die westliche Ostsee Geschwindigkeiten bis zu 161 cm/sec bei 8 Bft Windstärken in Wassertiefen bis 15 m (demgegenüber 80 cm/sec bei vollem Gezeitenstrom der offenen Deutschen Bucht). Solche Strömungen reichen aus, um eine Bewegung von Sanden und Kiesen einzuleiten. Die teilweise heftigen Strömungen und der sehr geringe Zutrag an Flußfracht erklären die extrem niedrigen Gehalte der Fraktionen  $< 2 \mu\text{m}$  in den Proben Li 1 - Li 11 (s. Tab. 3) sowie die stellenweise auftretenden Kiese (Li 1, Li 2, Li 4, Li 7). Die südlichste Probe Li 1, "Sand mit 1 % Feinkies", ist sehr gut sortiert (Küstennähe) und weist nur 0,1 % Tonfraktion auf. Von Li 1 bis Li 3 steigt die Wassertiefe von 13 auf 20 m, was durch die geringfügige Zunahme der  $< 2 \mu\text{m}$ -Fraktionen und die kontinuierliche Verkleinerung der Medianwerte dokumentiert wird. Li 2 und Li 3 sind sehr schlecht sortierte "Sand-Silte", wobei Li 2 zusätzlich 1 % Gehalt an Feinkies besitzt. Li 4 ist ein mittelmäßig sortierter "siltiger Sand mit 1 % Feinkies" und einem  $< 2 \mu\text{m}$ -Gehalt von 1,1 %. Die längs der Küste liegenden Proben Li 5 - Li 7 zeigen abnehmende Gehalte der  $< 2 \mu\text{m}$ -Fraktion und

Probe	So	Sk	Md [mm]	< 63 µm [%]	< 2 µm [%]	Litholog. Ansprache
Li 1	1,14	0,94	0,200	4,5	0,1	S (1% fK)
Li 2	2,47	1,20	0,063	51,0	2,1	SSi (3% fK)
Li 3	2,43	1,48	0,044	57,0	2,5	SSi
Li 4	1,72	0,74	0,190	21,0	1,1	siS (1% fK)
Li 5	2,87	1,00	0,046	57,5	3,0	siS
Li 6	2,06	0,56	0,110	36,5	1,3	SiS
Li 7	3,40	3,23	0,360	1,90	0,8	S (17% fK, 9% mK)
Li 8	1,40	0,60	0,180	16,0	0,6	siS
Li 9	2,52	1,94	0,040	60,0	2,5	SSi
Li 10	2,24	0,92	0,70	47,5	1,7	SiS
Li 11	1,25	0,82	0,190	10,1	0,3	S

Tab. 3: Granulometrische Analysen der Ostseeproben "Li"

größer werdende Medianwerte. Diese Erscheinungen sind wieder auf zunehmende Wassertiefen in Richtung der Li 5, "siltiger Sand", zurückzuführen. Li 6 ist ein "Silt-Sand", Li 7 ein "Sand mit 17 % Feinkies und 9 % Mittelkies". Die drei Proben sind sehr schlecht sortiert. Das Wasser vertieft sich ebenfalls von Probe Li 8 zu Probe Li 9 von 18 auf 21 m. Die Mediane und die Tonfraktionen zeigen dabei die gleiche Entwicklung wie bereits oben beschrieben. Der "siltige Sand" von Li 8 ist gut sortiert, während das Sediment der Probe Li 9 als schlecht sortierter "Sand-Silt" anzusprechen ist.

Der ebenfalls schlecht sortierte "Silt-Sand" der Probe Li 10 besitzt mit 0,700 mm den größten Median der untersuchten Ostseeproben.

Die gute Sortierung der "Sand"-Probe Li 11 und ihr geringer Gehalt von nur 0,3 % der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$  dokumentieren starken Strömungseinfluß in diesem Bereich.

Die Sedimentation der Lübecker Bucht wird sehr stark durch NE-liche Winde mit entsprechendem Seegang beeinflusst. Der Sandtransport erfolgt in Richtung Küste und hinterläßt größere Restsedimente. Der nahe Küstenbereich unterliegt der Erosion und Brandungslängsströmung, die Versatz von NE nach NW verursacht, WALGER (1966). Die für die Ostsee typischen Schlickgebiete wurden bei der Beprobung nicht erreicht, obwohl von PRATJE (1948) die Grenze zu den Schlicksedimenten bei 17 m Wassertiefe angegeben wird.

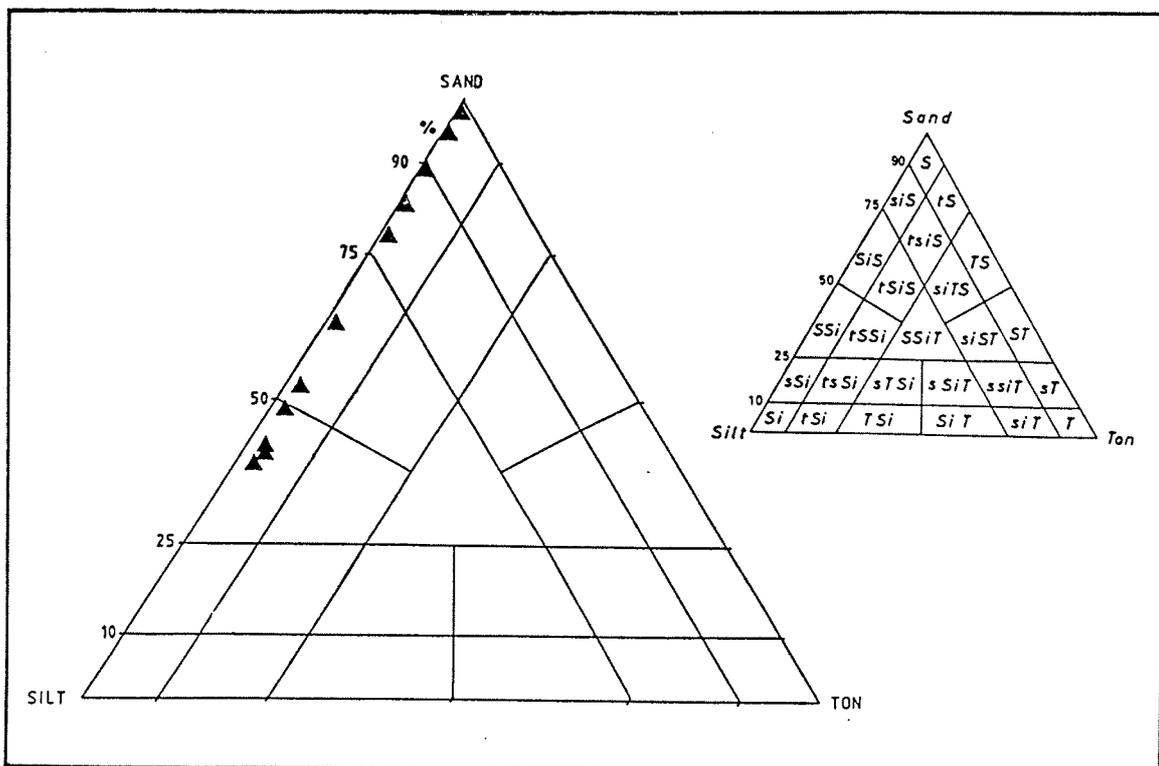


Abb. 14: Die Ostseeproben "Li" im Sand-Silt-Ton-Dreieck nach MÜLLER (1969a)

Die Schiefewerte der Ostseeeproben sind z.T. erheblich  $> 1$ . Im Sand-Silt-Ton-Dreieck liegen diese Proben direkt an der Sand-Silt-Linie, diejenigen mit Schiefen  $< 1$  setzen sich geringfügig von ihr ab.

Die Antarktisproben "A" im südlichen Weddell Meer bilden das südlichste Profil, das bisher auf geologische Fragestellungen hin bearbeitet wurde, HAASE (1985).

Während Schelfbereiche im allgemeinen durch Wassertiefen zwischen 7 und ca. 200 m gekennzeichnet sind, zählt der antarktische Schelf zu den tiefsten der Erde, ROLAND (1983). Anders als bei der Beprobung von Nord- und Ostsee wurde auf der Profillinie im südlichen Weddell Meer kontinuierlich die Morphologie des Meeresbodens mit einem 15 kHz Echographen registriert (Abb. 15). Die Wassertiefen reichen von über 600 m bis ca. 250 m unter den Meeresspiegel.

Nach Messungen von KOHNEN (1981) erstreckt sich das vor dem Filchner Eisschelf gefundene morphologische Relief parallel zum Eisvorschub weiter nach Norden. LANGE et al. (1984) schließen daraus, daß die jetzige Morphologie durch Glazialerosion der Weichselperiode gestaltet wurde (Siehe auch Kap. 2.1.3).

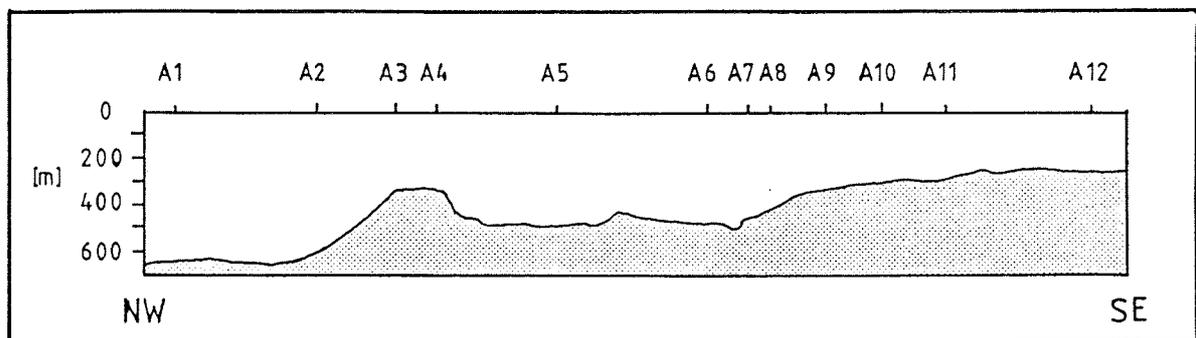


Abb. 15: Morphologie entlang der Probennahmestationen "A", umgezeichnet nach HAASE (1985)

Bei der Betrachtung der granulometrischen Parameter der antarktischen Sedimente fällt die scharfe Abgrenzung der Proben A 9 - A 12 auf (Tab. 4). Es sind gut sortierte "Sande" mit Schiefewerten knapp um 1 und nur extrem kleinen Gehalten der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$ . Diese Sedimente aus dem SE des Profils stammen von einem morphologisch hoch gelegenen "Plateau". Die Proben A 7 und A 8 wurden an der NW-Flanke des Plateaus genommen. Sie haben deutlich höhere Tonfraktionsgehalte und extrem schlechte Sortierungen. Der höhere Anteil an  $< 2 \mu\text{m}$  und der kleinere Median des "tonigen Silt-Sandes" der A 7 erklären sich durch die tiefere Flankenlage zum "tonig-siltigen Sand" der Probe A 8.

Probe	So	Sk	Md [mm]	$< 63 \mu\text{m}$ [%]	$< 2 \mu\text{m}$ [%]	Litholg. Ansprache
A 1	> 13,00	(10,6)	0,004	64,0	43,5	SSiT (8% fK, 7% mK)
A 2	2,18	0,39	0,100	21,5	18,5	tS (1% fK)
A 3	> 10,00	(2,04)	0,007	66,5	40,0	SSiT
A 4	10,00	0,22	0,030	62,0	22,5	SSiT (1% fK)
A 5	> 8,37	(1,09)	0,008	70,0	39,0	SSiT
A 6	> 11,40	(3,61)	0,006	62,0	38,0	SSiT
A 7	10,00	0,08	0,100	43,0	19,5	tSiS
A 8	7,07	0,06	0,170	35,0	18,5	tsiS
A 9	1,31	0,82	0,160	6,5	0,5	S
A 10	1,23	1,02	0,170	0,5	0,1	S
A 11	1,38	0,97	0,280	0,5	0,1	S
A 12	1,27	1,07	0,160	9,0	0,5	S

Tab. 4: Granulometrische Analysen der Antarktisproben "A"

Weiter NW-lich schließt sich ein neues, ca. 150 m tieferes "Plateau" an, in dessen Bereich die Sedimente der Proben A 5 und A 6 fallen. Beide sind "Silt-Sand-Tone" mit extrem schlechter Sortierung, fast 50 % Tonfraktion und sehr kleinen Medianen.

Die im weiteren Profilverlauf auf einem horstähnlichen "Plateau" liegenden Sedimente der A 3 und A 4 sind ebenfalls "Sand-Silt-Tone", deren granulometrische Parameter im wesentlichen denen der A 5 und A 6 gleichen.

Von der NW-Flanke dieser Erhebung stammt der "tonige Sand mit 1 % Feinkies" der Probe A 2. Er ist sehr schlecht sortiert, erreicht aber nicht die extremen Sortierungskoeffizienten der übrigen Proben. Der Gehalt der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$  entspricht dem der "Flankenproben" A 7 und A 8.

Eine Sonderstellung fällt der Probe A 1 im NW zu. Sie weist die extrem schlechteste Sortierung auf. Ihr "Sand-Silt-Ton" hat Beimengungen von 8 % Feinkies und 7 % Mittelkies, und sie besitzt neben dem höchsten Tonfraktionsgehalt den kleinsten Median der untersuchten Proben.

Aus den aufgeführten Sedimenteigenschaften läßt sich folgendes ableiten:

Die SW-lichen Proben A 9 - A 12 sind rein marin und stehen unter dem Einfluß relativ hoher Strömungen. Dafür sprechen gute Sortierungen und kaum vorhandenes Feinkorn. Nach NW nehmen die Tonfraktionsgehalte stark zu, gleichzeitig werden die Sortierungen extrem schlecht. Dies deutet einerseits auf ein ruhiges Strömungsregime hin, andererseits auf den Einsatz glazialer Sedimentation. Durch die Gletschermassen erodiertes und mitgeführtes Material rieselt bei anschmelzender Gletscherunterseite auf den Meeresboden. Diese sogenannten Dropstones haben unterschiedlichste Korngrößen (Glazialerosion !) und verschlechtern die Sortierung der marin abgelagerten Sedimente in den strömungsberuhigten Zonen. Der stärkste Einfluß glazialer Sedimentation ist bei

Probe A 1 im NW zu beobachten. Hier müssen, wegen des kleinen Medians und des höheren Gehalts der Fraktion  $<2 \mu\text{m}$ , die niedrigsten Strömungsgeschwindigkeiten des Profils angenommen werden.

Die Zunahme der Strömungen im SE des Profils kann unterhalb des Eisschelfs ausfließende, kalte Wassermassen zur Ursache haben. Dieser Ausstrom erfolgt in NE-liche Richtung, da die Flankensedimente A 7 und A 8 keine Beeinflussung zeigen.

Im Sand-Silt-Ton-Dreieck (Abb. 16) nehmen die rein marinen Sedimente die Sandspitze des Dreiecks ein, die stark glazialgeprägten "Plateausedimente" gruppieren sich im Zentrum. Die ebenfalls glazialbeeinflussten Proben A 2, A 7 und A 8 bilden eine Linie zwischen beiden Gruppen, da sie wegen ihrer Flankenlage einer besonderen Dynamik unterliegen.

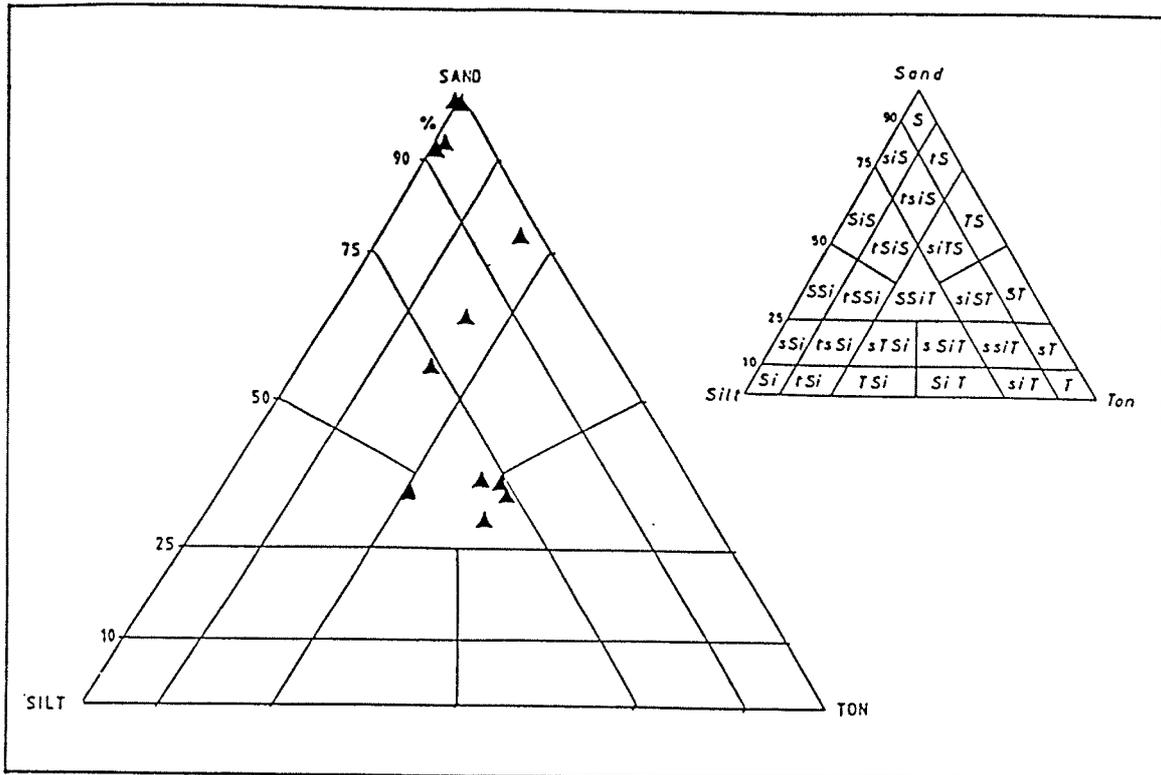


Abb. 16: Die Antarktisproben "A" im Sand-Silt-Ton-Dreieck nach MÜLLER (1969a)

#### 4.1.3 Regressionsanalysen I

Um Abhängigkeiten zwischen den granulometrischen Parametern in den drei Arbeitsgebieten aufzuzeigen, wurden mit einem EPSON QX 10 Computer lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Aus der jeweiligen Gegenüberstellung der Werte für Sortierung, Median und Schiefe konnten Korrelationskoeffizienten errechnet werden, deren Signifikanz nach MARSAL (1967) geprüft wurde. In Tab. 5 sind die Korrelationskoeffizienten zu den Proben "P", "Li" und "A" aufgeführt, diejenigen mit 99 %iger Signifikanz sind doppelt unterstrichen.

Die von Gezeiten beeinflussten Flachmeersedimente der Nordsee zeigen einen hochsignifikanten Zusammenhang zwischen Sortierung und Schiefe: mit schlechterer Sortierung nimmt der Schiefewert ab, d.h. schlechte Sortierungen beruhen auf größeren Feinkornanteilen (folglich Abb. 10a, b).

Die gezeitenfreien Ostseesedimente, als flache Beckenablagerungen mit aperiodischem Strömungseinfluß, weisen genau den umgekehrten Trend auf. Mit schlechterer Sortierung steigt der Schiefewert, d.h. die schlechteren Sortierungen werden von häufigeren Grobkorngehalten bestimmt (Abb. 11a, b).

Die Korrelationskoeffizienten der Paarungen So/Md und Md/Sk ergeben in Nord- und Ostseeproben keine signifikanten Abhängigkeiten.

Bei den bathyalen Schelfsedimenten des südlichen Weddell Meeres besteht ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen Sortierung und Medianwerten: mit schlechteren Sortierungen nehmen die Mediane ab. Das bestätigt die in Kap. 4.1.2 beschriebene Glazialsedimentation, speziell in strömungsberuhigten Zonen. Sie tritt besonders stark im Bereich der antarktischen Halbinsel auf. Umgekehrt ziehen gute Sortierungen größere Mediane nach sich, was für die rein marinen Sande der SW-lichen Proben zutrifft.

"P"			"Li"			"A"			
	So	Md	Sk	So	Md	Sk	So	Md	Sk
So	1	-0,212	-0,851	1	0,017	0,734	1	-0,809	0,514
			=====			=====		=====	
Md		1	-0,002		1	0,088		1	-0,443
Sk			1			1			1

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten der granulometrischen Parameter in den Arbeitsgebieten Nordsee, Ostsee und Antarktis (lineare Regression)

#### 4.1.4 Raster-Elektronenmikroskopie I

##### 4.1.4.1 Methodik

Ein aus einer Elektronenkanone austretender Primärelektronenstrahl wird durch Hochspannung beschleunigt und durch Elektronenlinsen gebündelt. Mit Hilfe eines Ablenkgenerators rastert dieser Strahl die Oberfläche des zu untersuchenden Objektes zeilenweise nacheinander ab. Die durch Wechselwirkung mit dem Objekt entstehenden Sekundärelektronen und reflektierten Elektronen werden mit Hilfe von Detektoren in elektrische Signale umgewandelt, anschließend verstärkt und dienen zur Helligkeitsmodulation der Bildröhre. Das REM-Bild ist eine Projektion der Objektoberfläche senkrecht zum ab rasternden Elektronenstrahl mit großer Tiefenschärfe, PFEFFERKORN (1978).

##### 4.1.4.2 Probenauswahl und -präparation

Für die REM-Betrachtung der getrockneten Gesamtsedimente eignen sich besonders gut sortierte Proben mit geringem Feinkornanteil. Diese Voraussetzungen erfüllen die Proben P 23, Li 8 und A 11. Das Kornmaterial wurde als dünne Schicht auf eine glatte Oberfläche gestreut und die mit beidseitigem Klebeband versehenen Objektträger vorsichtig aufgedrückt. Je homogener das Kornspektrum, desto repräsentativer ist die so fixierte Durchschnittsprobe.

Eine anschließende Goldbedampfung im Hochvakuum gewährleistet die elektrische Leitfähigkeit der Präparate.

Als Beispiel für extrem schlechte Sortierung und Glazialsedimentation wurde zusätzlich die Probe A 1 zur Betrachtung ausgewählt. Die Beschreibung der Abb. 17 bis 24 erfolgt nach KRINSLEY & DOORNKAMP (1973).

#### 4.1.4.3 Dokumentation

Abb. 17 zeigt den sehr gut sortierten "siltigen Sand" der Probe P 23 mit der Foraminifere *ELPHIDIUM WILLIAMSONI* (HAYNES). Das Kornmaterial ist subangular - subrounded. Das plattige Korn unterhalb der Foraminifere ist wahrscheinlich ein Hellglimmer.

Abb. 18 stellt ein abgerundetes Korn der Probe P 23 dar. Die Ausschnittsvergrößerung zeigt V-förmige Schlagmarken (subaquatischer Transport), die teilweise durch Ätzung modifiziert wurden.

Abb. 19 veranschaulicht den gut sortierten "siltigen Sand" der Probe Li 8. Die Körner sind subangular - subrounded und lassen stellenweise muscheligen Bruch erkennen, was auf glaziale Beanspruchung hindeuten könnte.

Abb. 20 zeigt ein von Ätzung angegriffenes Korn der Probe Li 8. Die Ätzspuren orientieren sich parallel zur Kristallstruktur und lassen auf einen Feldspat schließen. Die im Bildvordergrund sichtbare Mineralecke weist starke Ätzbeanspruchung (Lochfraß) auf.

Abb. 21 stellt den gut sortierten "Sand" der Probe A.11 dar. Die Körner sind ebenfalls subangular - subrounded.

Abb. 22 läßt die relative große Dichte an Schlagmarken auf einem Korn der Probe A 11 erkennen, die durch starken submarinen Transport verursacht wurde. Am rechten, oberen Bildrand sichtbare parallele Furchen können von glazialen Transport hervorgerufen sein.

Abb. 23 ist ein Beispiel für den extrem schlecht sortierten "Sand-Silt-Ton" der Probe A 1. Auf einem "Feinstkornrasen" liegen Körner unterschiedlichster Größe und zumeist subangularer - angularer Rundung.

Abb. 24 zeigt einen Vertreter glazialer "droptones" der Probe A 1.

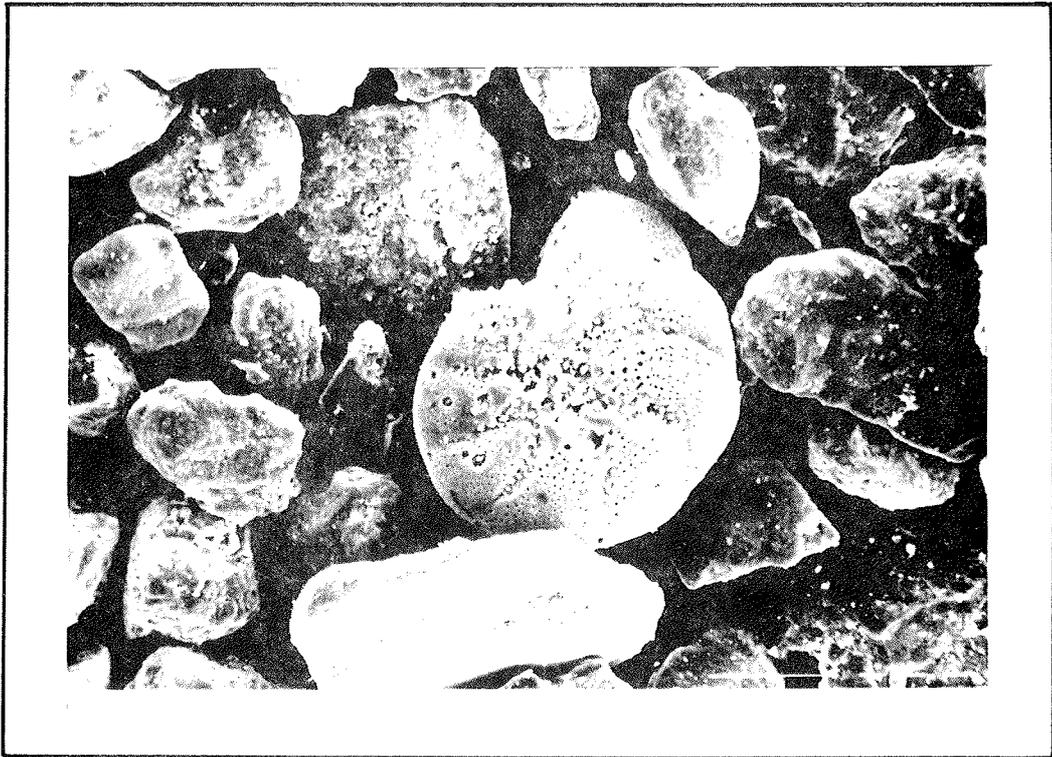


Abb. 17: P 23

┆┆┆ 100  $\mu$ m

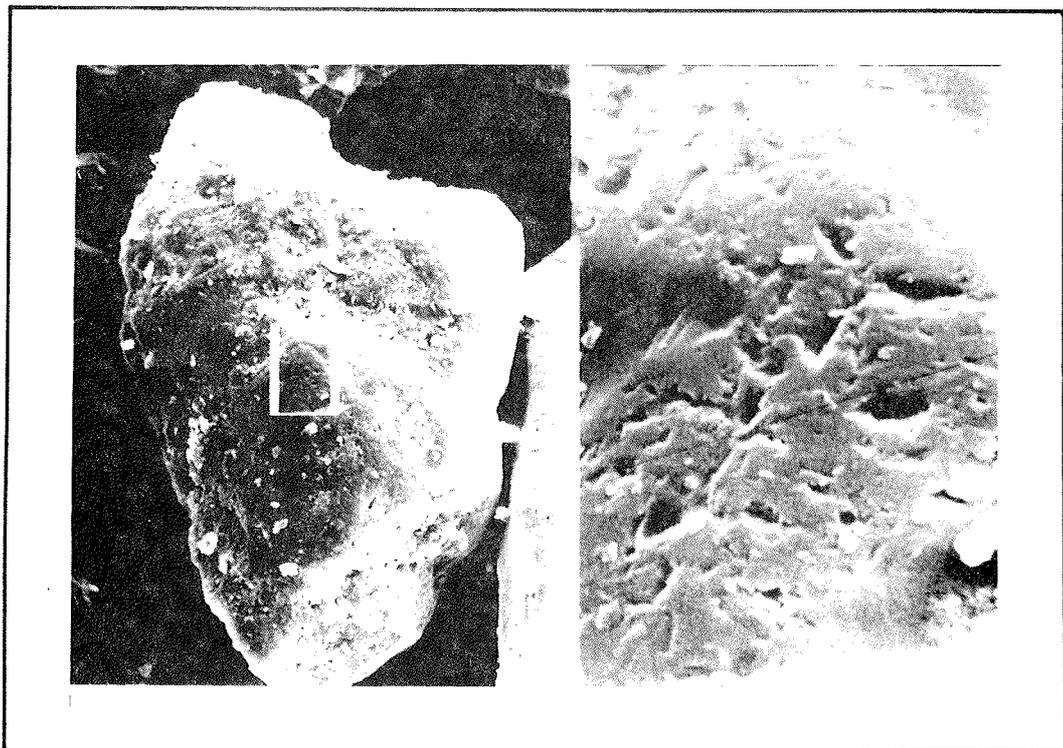


Abb. 18: P 23

┆┆┆ 10  $\mu$ m

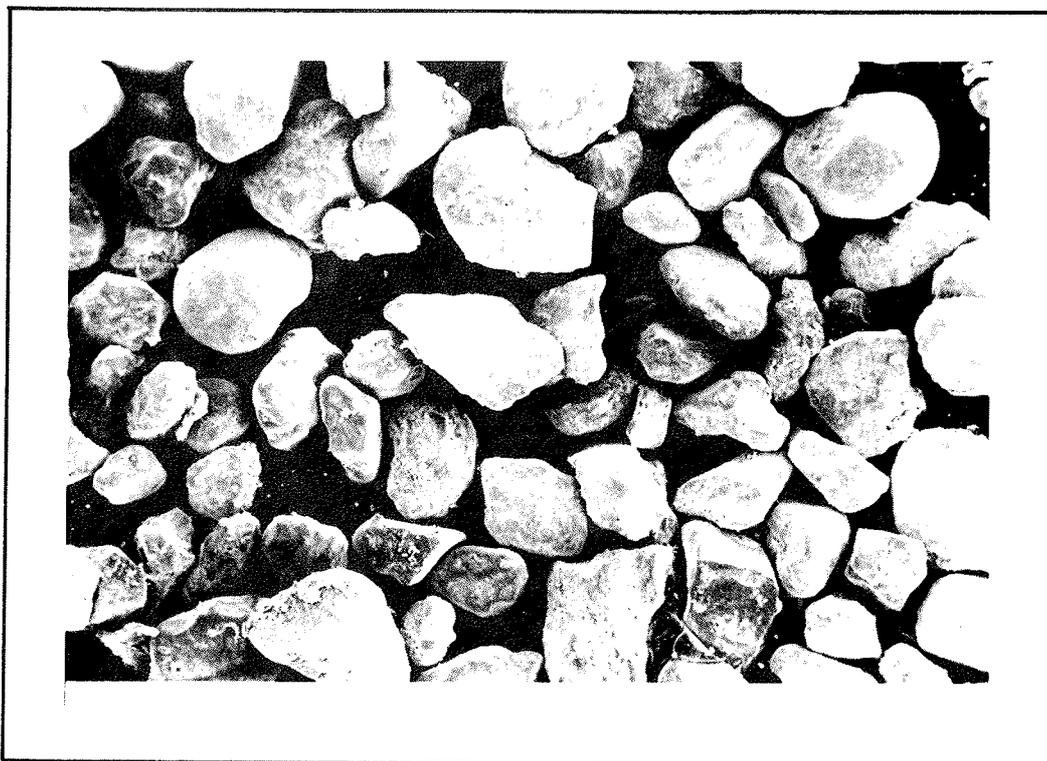


Abb. 19: Li 8

┆ 100  $\mu\text{m}$

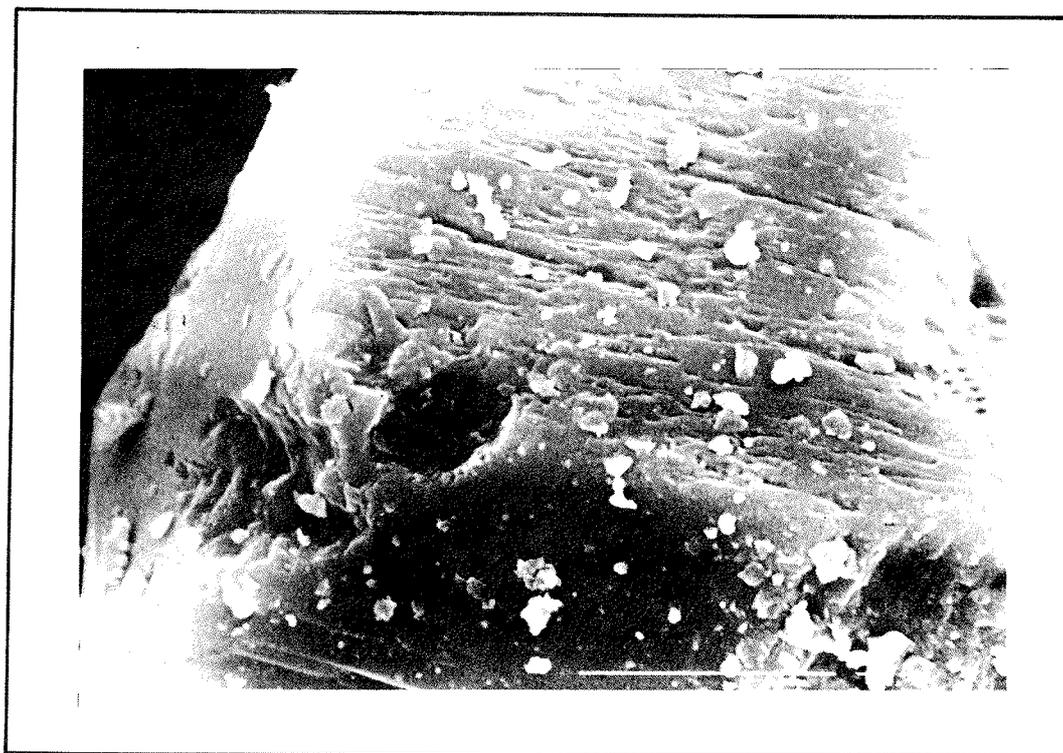


Abb. 20: Li 8

┆ 10  $\mu\text{m}$

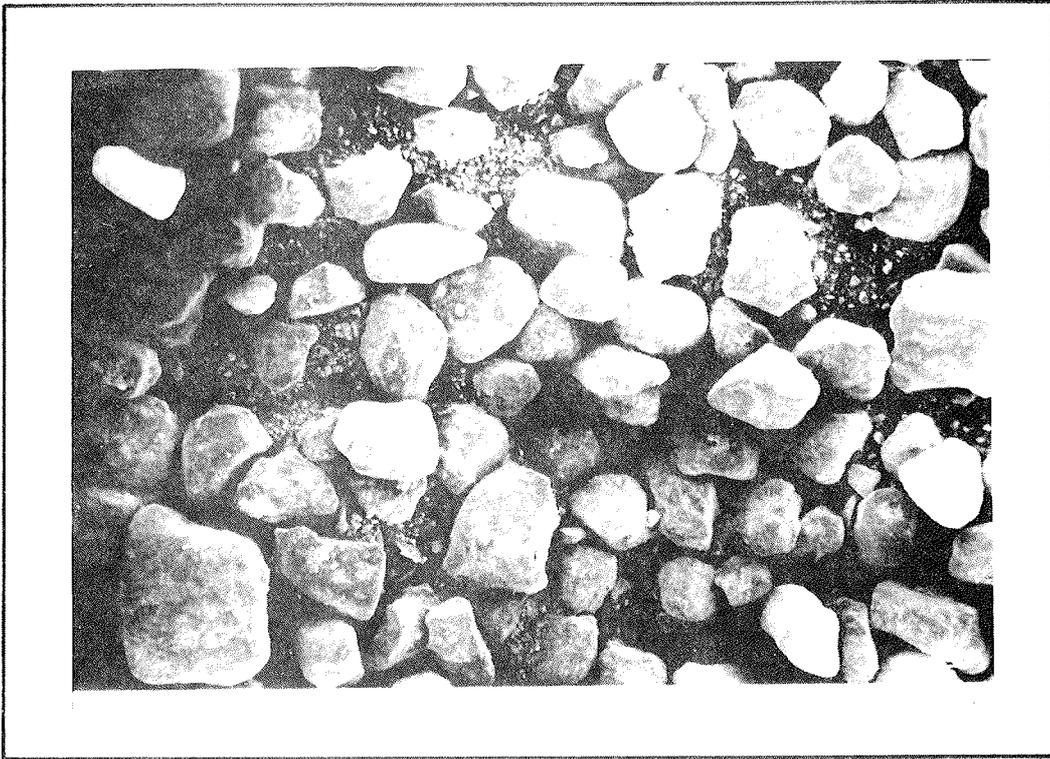


Abb. 21: A 11

┆ 10  $\mu\text{m}$

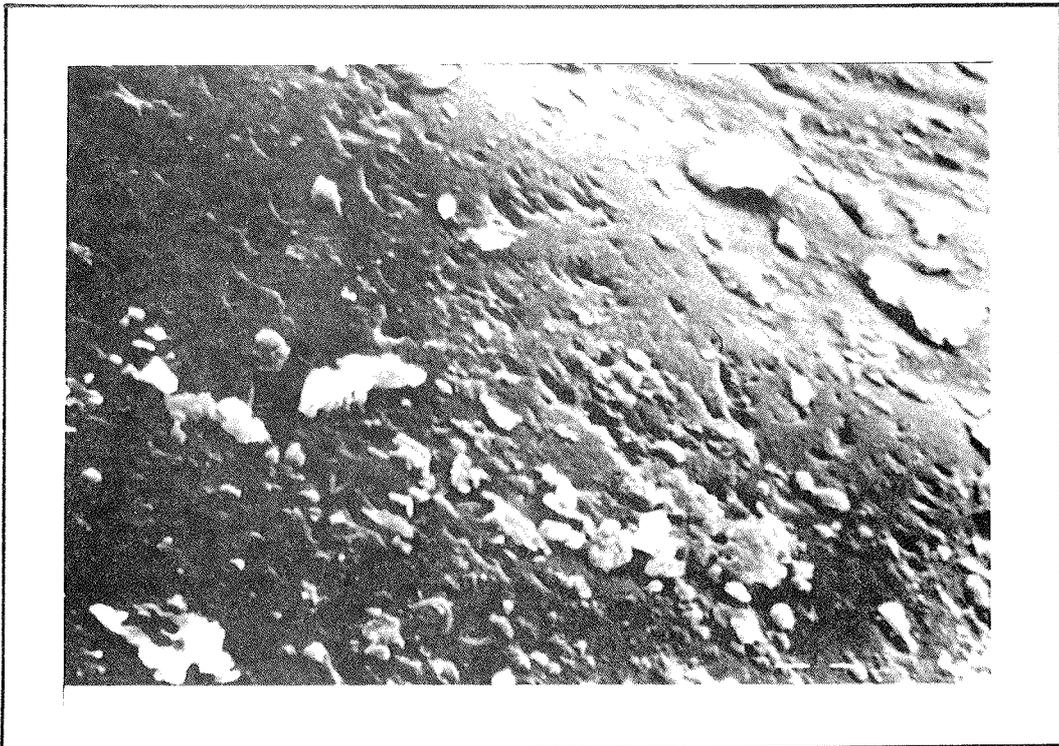


Abb. 22: A 11

┆ 1  $\mu\text{m}$

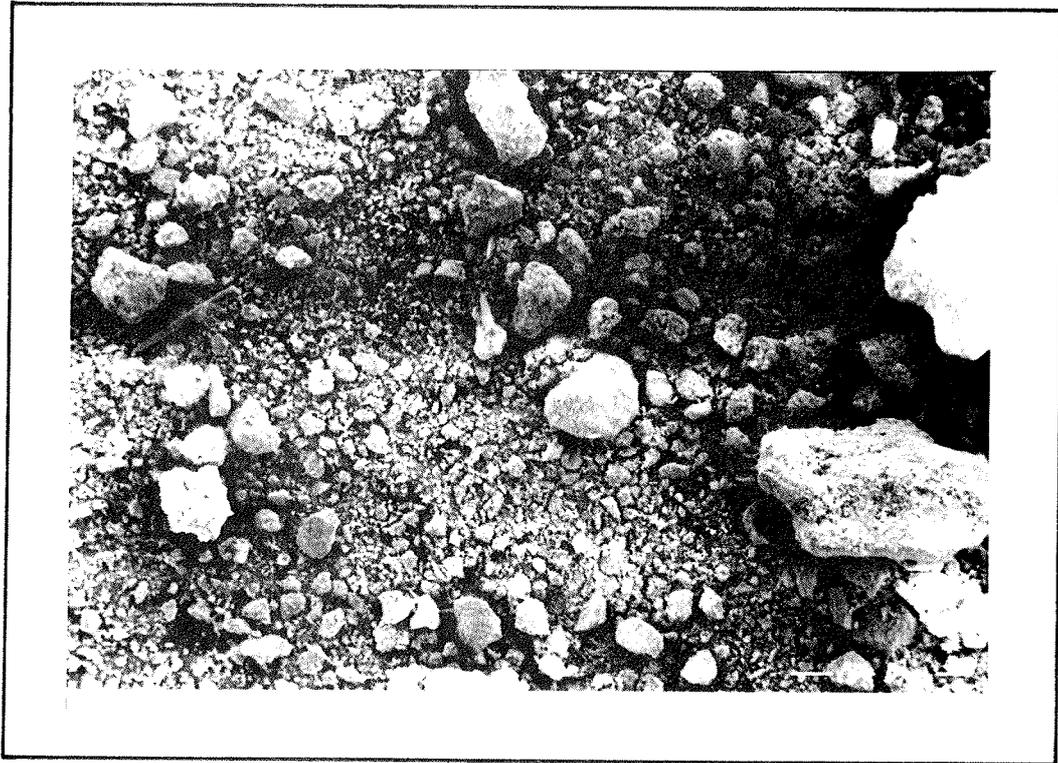


Abb. 23: A 1

┆┆ 100  $\mu$ m

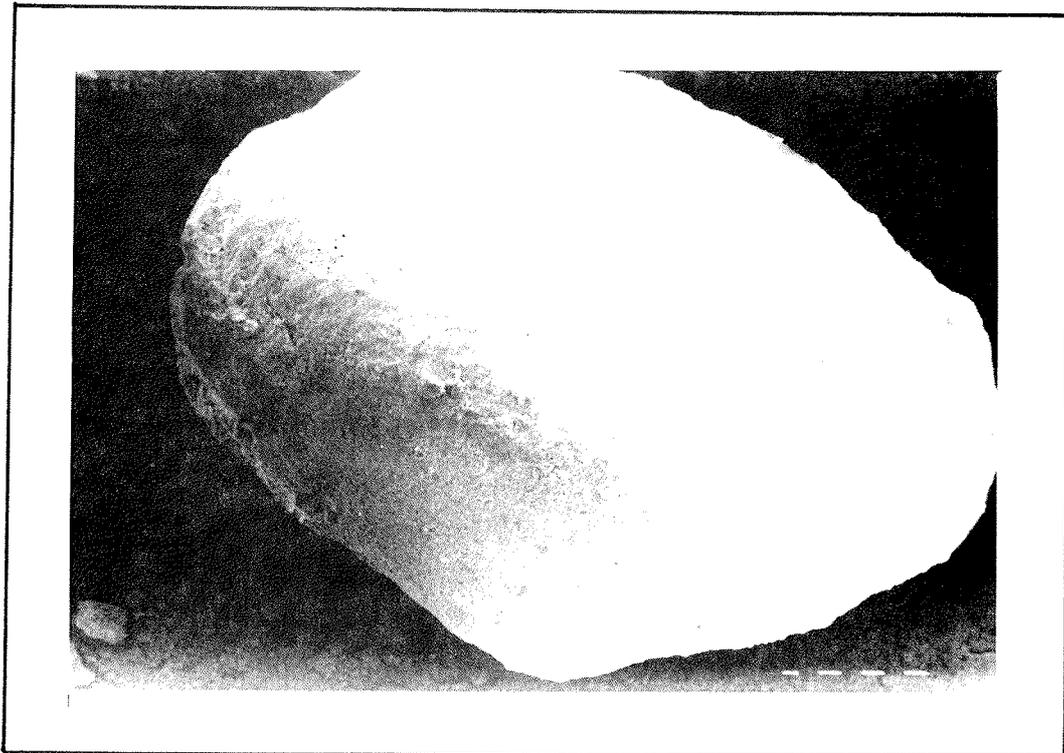


Abb. 24: A 1

┆┆ 100  $\mu$ m

## 4.2 Mineralogie

Mit den folgenden Untersuchungen soll der Gesamtmineralbestand der Sedimentproben aus den drei Arbeitsgebieten erfaßt und die Mineralverteilung semiquantitativ berechnet werden.

### 4.2.1 Methodik

Die Identifizierung der Minerale erfolgte durch die Röntgenbeugungsanalytik mit einem PHILIPS Röntgendiffraktometer PW 1050/70. Trifft monochromatisches Röntgenlicht auf kristalline Strukturen, interferieren die reflektierten Wellen entsprechend der Lage und dem Abstand  $d$  der Kristallgitter bei einem bestimmten Glanzwinkel  $\theta$  und einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge  $\lambda$ . Die Reflexionen gehorchen der Braggschen Gleichung, JENKINS (1977):

$$n \lambda = 2 d \sin \theta$$

Für die Abhängigkeit Reflexion - Glanzwinkel - Kristallgitterabstände liefert jedes Mineral unterschiedliche Charakteristika. Die bei bestimmten Glanzwinkeln auftretenden Reflexionen werden als Peaks auf einem Schreiberdiagramm registriert. Über Peaks und Glanzwinkel lassen sich die Gitterabstände eines Minerals bestimmen. Die Identifizierung erfolgte nach der ASTM-Kartei.

Anschließend wurde die Mineralverteilung semiquantitativ durch Flächenberechnungen und Normierung der einzelnen Mineralhauptpeaks durchgeführt. Daraus folgende prozentuale Angaben sind "Flächenprozent", die nicht zwingend dem tatsächlichen Gewichtsprozentgehalt eines Minerals entsprechen, sondern diesen abschätzen.

Die Aufnahmebedingungen des Röntgendiffraktometers lauten wie folgt:

Röhre :  $\text{CuK}\alpha$   
Blende :  $1/4^\circ$   
Spannung : 40 kV  
Stromstärke : 20 mA  
Aufnahmegeschwindigkeit :  $1^\circ 2\theta/\text{min}$   
Papiervorschub : 20 mm/min  
Amplitude :  $2 \cdot 10^3$   
Attenuation : 4  
Zeitkonstante : 1

#### 4.2.2 Präparation der Proben

Repräsentative Unterproben der Sedimente wurden zunächst in einer Kugelmühle vorgemahlen und anschließend in einer RETSCH Mikromühle feingemahlen. Jeweils ca. 1 g des Materials wurde dann vorsichtig in einen Probenhalter gestopft. Dabei ist auf eine möglichst schonende Einpressung zu achten, um eine Texturierung zu vermeiden und eine möglichst statistische Lage der Minerale zu gewährleisten. Das Gesamtprobenmaterial wurde im Bereich  $60^\circ - 0^\circ 2\theta$  geröntgt.

#### 4.2.3 Darstellung der Ergebnisse

Bei den Untersuchungen wurden die Minerale Quarz, Calcit, Dolomit, Plagioklas, Alkalifeldspat, Muskovit, Biotit, Pyrit und Ton (undifferenziert) identifiziert und ihre Verteilung einheitlich ermittelt (Tab. 6 - 8).

Quarz ist in allen Sedimenten vorherrschendes Hauptgemengteil. Variationen der Durchschnittsgehalte sind festzustellen. So besitzen die Nordseeproben im Mittel einen Quarzan-

	P 6	P 9	P 11	P 13	P 14	P 15	P 18	P 19	P 20	P 21	P 23
Quarz	71,6	86,9	85,3	84,1	87,5	86,6	87,0	81,6	79,3	88,1	93,7
Calcit	14,9	5,6	5,1	4,8	4,9	4,3	6,7	4,8	6,2	2,6	6,3
Dolomit	2,9	0,7	1,0	1,8	1,5	1,3	1,1	1,1	2,4	1,4	1,4
Plagioklas	4,5	4,3	3,8	3,4	2,6	1,8	2,6	7,7	4,6	3,5	1,6
Alkalifeldspat	1,5	0,9	2,1	1,6	1,1	4,1	1,1	1,6	3,3	1,9	1,4
Muskovit	0,3	0,2	0,7	1,4	0,4	0,5	0,4	1,6	0,4	0,5	0,5
Biotit	0,4	0,3	0,7	0,5	0,9	0,5	0,4	0,5	0,9	0,9	0,7
Pyrit	0,7	0,2	0,2	0,5	---	0,3	0,6	0,2	0,4	0,5	<0,2
Tone	3,2	1,1	1,5	1,6	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,6	0,6

Tab. 6: Mineralogie der Nordseeproben "P" (RDA)

	Li 1	Li 2	Li 3	Li 4	Li 5	Li 6	Li 7	Li 8	Li 9	Li 10	Li 11
Quarz	% 91,4	90,2	82,5	85,0	86,2	91,9	92,0	92,7	80,3	88,8	91,0
Calcit	% <0,2	0,3	0,4	2,7	0,9	0,3	0,3	0,4	1,0	0,3	0,3
Dolomit	% 0,6	1,2	1,4	0,7	0,9	1,0	0,6	0,4	1,6	1,5	0,6
Plagioklas	% 3,9	3,7	8,7	4,3	5,5	2,3	3,1	2,8	5,7	2,9	4,8
Alkalifeldspat	% 1,1	2,1	2,1	2,7	1,4	1,6	1,9	2,1	3,6	2,7	1,7
Muskovit	% 0,6	0,6	1,7	0,7	1,4	1,0	0,6	0,7	1,0	0,6	0,6
Biotit	% 0,3	0,6	1,0	1,0	0,9	0,6	0,6	0,7	1,0	0,9	0,6
Pyrit	% ---	0,6	1,0	0,7	0,9	0,3	---	0,4	4,1	1,2	0,3
Tone	% 0,1	0,8	1,2	1,0	1,9	0,9	0,7	0,6	1,5	1,2	0,3

Tab. 7: Mineralogie der Ostseeproben "Li" (RDA)

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12
Quarz	% 72,0	71,1	83,6	82,2	64,2	69,4	72,9	77,9	70,6	80,5	90,1	83,2
Calcit	% 1,2	0,5	1,6	0,3	1,1	0,6	0,6	0,6	1,5	0,2	<0,2	0,3
Dolomit	% 0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,8	1,1	0,4	0,9	0,2	2,3
Plagioklas	% 11,8	4,8	3,9	7,9	13,7	8,0	12,4	6,0	7,6	4,1	3,8	4,0
Alkalifeldspat	% 2,8	16,6	2,9	3,9	7,0	10,2	5,9	6,9	15,9	12,0	3,8	7,5
Muskovit	% 1,9	2,3	2,6	1,3	7,0	4,0	2,0	2,6	1,1	1,4	1,0	0,3
Biotit	% ---	0,9	0,3	0,8	1,1	0,6	0,6	0,9	2,2	0,5	0,5	1,7
Pyrit	% 0,3	---	0,6	<0,3	0,5	0,3	<0,3	0,3	0,2	---	---	---
Tone	% 9,2	2,8	3,8	2,8	4,9	4,8	4,7	3,7	0,5	0,3	0,3	0,5

Tab. 8: Mineralogie der Antarktisprouben "A" (RDA)

teil von ca. 85 %, die Ostseeproben ca. 88 % und die Antarktissedimente ca. 77 %. Calcit ist in den Nordseesedimenten mit durchschnittlich 6 % anzutreffen. Die Probe P 6 weist den höchsten Gehalt von 14,9 % auf. Die übrigen Proben zeigen relativ gleichbleibende Calcitanteile. Deutlich werden die niedrigeren Calcitkonzentrationen von durchschnittlich 0,7 % in den Ostsee- und Antarktisproben. Die Gründe dafür werden in den beiden Arbeitsgebieten durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst.

Die Ostsee besitzt wegen ihres Brackwassercharakters eine erheblich niedrige Besiedlungsdichte an Kalkschalern als die Nordsee, THEEDE (1974). Zusätzlich verhindert die haline Schichtung die Sauerstoffzufuhr zum Tiefenwasser. Sauerstoff aber wird bei der Zersetzung organischer Substanz verbraucht und  $\text{CO}_2$  freigesetzt. Bei steigendem  $\text{CO}_2$ -Gehalt fällt der pH-Wert, so daß in den stagnierenden Wässern Kalkschaler gelöst werden können, SEIBOLD (1974).

Die geringen Calcitanteile der Antarktissedimente können zum einen in der relativ großen Ablagerungstiefe begründet sein, da mit zunehmender Tiefe der Druck steigt. Herrschen gleichzeitig sehr niedrige Temperaturen, nimmt die Löslichkeit des  $\text{CaCO}_3$  zu, v.ENGELHARDT (1973), STUMM & MORGAN (1981). Zum anderen nehmen absinkende, kalte Wassermassen, die das antarktische Bodenwasser bilden (s. Kap. 3.3.3), auf ihrem Weg viel  $\text{CO}_2$  auf, so daß  $\text{CaCO}_3$  ebenfalls durch Kohlensäure gelöst werden kann, SEIBOLD (1974).

Die höchsten Gehalte an Dolomit werden wieder in der Nordseeprobe P 6 mit 2,9 % festgestellt. Die Proben "P" weisen mittlere Anteile von 1,4 % gegenüber den Ostseeproben von 1 % und den Proben "A" von 0,8 % auf. Da Dolomit im Vergleich zu Calcit im marinen Milieu die stabilere Karbonatphase darstellt, DEGENS (1968), sind auch keine wesentlichen Abnahmen seiner Gehalte in den Proben "Li" und "A" zu beobachten.

Bei den Feldspäten überwiegen in den Nord- und Ostseeproben die Plagioklase mit durchschnittlich 3,7 und 4,6 % gegenüber den Alkalifeldspäten mit 1,9 und 2,1 %.

Die Antarktissedimente besitzen dagegen deutlich höhere und ungefähr gleichwertige Durchschnittsgehalte an Plagioklasen (7,3 %) und Alkalifeldspäten (8,0 %). Die größten Plagioklasmengen mit 15,7 % zeigt Probe A 5. Der maximale Alkalifeldspatgehalt mit 16,6 % wurde in Probe A 2 gefunden. Diese hohen Gehalte deuten auf die z.T. hochmetamorphe Ostantarktis als Liefergebiet hin, da nach TRÖGER (1969) Plagioklase in Paragenese mit Alkalifeldspäten die Hauptgemengteile granitischer Metamorphite bilden. Zusätzlich ergeben die höheren Feldspatgehalte eine Verschlechterung der kompositionellen Reife dieser Sedimente.

Der ebenfalls recht hohe Gehalt an Muskovit von 2,3 % könnte an die hohen Feldspatanteile und deren Serizitisierung geknüpft sein. Nord- und Ostseeproben besitzen lediglich Hellglimmeranteile von 1 %.

Biotit bleibt in den drei Arbeitsgebieten unter 1 %.

Nicht alle untersuchten Proben führen Pyrit. Er wurde aber mit durchschnittlich 0,9 % in den Ostseeproben gegenüber Werten von 0,3 % in der Nordsee und 0,2 % in den Proben "A" nachgewiesen. Nach DEGENS (1968) und TRÖGER (1969) wird Pyrit bevorzugt in marinem Milieu unter reduzierenden Bedingungen und neutralem bis schwachalkalischem pH gebildet. Wegen der begünstigten Eutrophierung des Tiefenwassers der Ostsee (siehe Kap. 3.3.2) ist hier das verstärkte Vorkommen von Pyrit nicht verwunderlich.

Die Tonanteile sind erwartungsgemäß in den Antarktissedimenten mit einem Mittelwert von 3,2 % am häufigsten vertreten. Den höchsten Gehalt zeigt die Probe A 1 mit 9,2 %

Tonen. Die Proben "P" haben einen mittleren Tongehalt von 1,2 %, die Ostseeproben nur 1 %. In den Tongehalten spiegeln sich zwar die in Kap. 4.1.2 besprochenen sedimentologischen Verhältnisse wieder, doch erscheint eine Diskrepanz zu den jeweiligen Kornfraktionen  $< 2 \mu\text{m}$ . Einerseits liegt dies daran, daß das von MÜLLER (1964) als Tonfraktion definierte Kornintervall  $< 2 \mu\text{m}$  auch hohe Detritusanteile von Quarz, Feldspäten und Karbonaten führen kann, andererseits bringt die semiquantitative Auswertung einen Fehler mit sich. So zeigen die Tongehalte zwar eine richtige Relation untereinander, dürfen aber nicht als absolut betrachtet werden.

#### 4.2.4 Tonmineralogie

##### 4.2.4.1 Methodik

Vom Gesamtprobenmaterial wurde mit einem Plastiksieb die Fraktion  $< 63 \mu\text{m}$  naß abgeschlämmt und aus dem Schlämmkorn in Glaszylindern die Tonfraktion  $< 2 \mu\text{m}$  nach der Atterberg-Methode gewonnen. Von den  $< 2 \mu\text{m}$ -Suspensionen wurden Texturpräparate erstellt.

Für den Nachweis der Tonminerale Kaolinit, Chlorit, Illit und Smektite (undifferenziert) wurden die Texturpräparate zunächst unbehandelt (lufttrocken) im Bereich  $15^\circ - 0^\circ 2\theta$  geröntgt (s. Kap. 4.2.1). Kaolinit zeigt im Röntgendiagramm für seinen  $7,1 \text{ \AA}$  weiten Schichtabstand bei  $12,4^\circ 2\theta$  einen scharfen Reflex. Der Hauptreflex des Illits liegt bei  $8,8^\circ 2\theta$  mit dem Basisabstand von  $10 \text{ \AA}$ . Je schärfer dieser Peak ausgebildet ist, desto besser ist die Kristallinität des Illits, WITTENHAGEN (1980). Der Peak des  $14 \text{ \AA}$  Chlorits wird von den Reflexen der quellbaren Smektite überlagert.

Bei der anschließenden Behandlung der Texturpräparate mit Ethylenglycol (6 Std. bei 60°C) werden die Gitterabstände der quellbaren Smektite von ca. 14 Å auf ca. 17 Å aufgeweitet, was im Röntgendiagramm eine Verschiebung der Reflexe von ca. 7°2θ auf 5°2θ nach sich zieht.

Durch Erhitzen der Texturpräparate auf 560°C wird die Struktur des Kaolinitis zerstört. Im Bereich 14 Å liegt nun der Peak des "normalen Chlorits", der oberhalb von 550°C stabil ist, DÜMMLER & SCHRÖDER (1965).

Die semiquantitative Auswertung der Tonmineralgehalte erfolgte nach BISCAYE (1965), indem die Peakflächen der Tonminerale gewichtet und zueinander in Beziehung gesetzt werden:

- 7 Å Peak für Kaolinit, multipliziert mit 2;
- 14 Å Peak für Chlorit (erhitztes Präparat), multipliziert mit 2;
- 10 Å Peak für Illit (glycolisiertes Präparat), multipliziert mit 4;
- 17 Å Peak für Smektite (glycolisiertes Präparat).

#### 4.2.4.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Verteilung der Tonminerale in den Proben "P", "Li" und "A" ist in den Tabellen 9 - 11 aufgeführt.

Die Größenordnung der Tonmineralgehalte der Nordseesedimente entspricht den von GADOW & SCHÄFER (1973) ermittelten Daten.

Trotz schwankender Gesamttonanteile sind die Durchschnittsgehalte von Kaolinit und Chlorit in den drei Arbeitsgebieten relativ gleichbleibend. Die Illitgehalte sind in den

Ostseesedimenten um durchschnittlich ca. 10 % höher als in den untersuchten Proben "P" und "A".

Die Illite der Antarktisproben zeigen im Röntgendiagramm die schärfsten Reflexe, was auf bessere Kristallinität gegenüber den Illiten der Nord- und Ostseesedimente hindeutet.

Ob die relativ hohen Smektitanteile der Nordseeproben durch die Suspensionsfracht der Flüsse und die Lithologie ihrer Einzugsgebiete geprägt sind, ließ sich im Rahmen dieser Arbeit nicht klären.

Probe	Ges.Tongehalt (Pulverpräp.) %	Kaolinit %	Chlorit (Texturpräp.) %	Illit %	Smektite %
P 6	3,2	27	4	62	9
P 9	1,1	25	2	66	10
P 11	1,5	31	-	55	13
P 13	1,6	42	2	43	13
P 14	1,1	23	3	59	14
P 15	0,9	36	2	50	13
P 18	0,9	36	2	43	19
P 19	0,9	32	-	55	13
P 20	0,9	36	-	52	12
P 21	0,6	22	4	58	16
P 23	0,6	31	2	57	9
Ø	1,2	31	3	55	13
min-max	0,6 - 3,2	22 - 42	2 - 4	43 - 66	9 - 19

Tab. 9: Tonmineralogie der Nordseeproben "P" (RDA)

Probe	Ges.Tongehalt (Pulverpräp.) %	Kaolinit %	Chlorit (Texturpräp.) %	Illit %	Smektite %
Li 1	0,1	52	5	38	5
Li 2	0,8	27	3	69	1
Li 3	1,2	27	3	69	1
Li 4	1,0	25	4	70	1
Li 5	1,9	23	3	72	2
Li 6	0,9	29	3	66	2
Li 7	0,7	42	4	52	2
Li 8	0,6	29	4	66	1
Li 9	1,5	30	6	62	2
Li 10	1,2	28	5	65	2
Li 11	0,3	31	4	62	3
Ø	0,9	(31)	4	63	2
min-max	0,3 - 1,9	23 - 52	3 - 6	38 - 72	1 - 5

Tab. 10: Tonmineralogie der Ostseeproben "Li" (RDA)

Probe	Ges.Tongehalt (Pulverpräp.) %	Kaolinit %	Chlorit (Texturpräp.) %	Illit %	Smektite %
A 1	9,2	35	3	60	2
A 2	2,8	29	5	64	2
A 3	3,8	37	6	55	3
A 4	2,8	36	2	59	3
A 5	4,9	53	1	43	3
A 6	4,8	40	4	53	2
A 7	4,7	28	3	65	4
A 8	3,7	34	4	59	3
A 9	0,5	30	4	63	3
A 10	0,3	39	7	47	7
A 11	0,3	36	4	55	4
A 12	0,5	32	7	54	7
Ø	3,2	36	4	56	4
min-max	0,3 - 9,2	28 - 53	2 - 7	43 - 65	2 - 7

Tab. 11: Tonmineralogie der Antarktischenproben "A" (RDA)

#### 4.2.5 Raster-Elektronenmikroskopie II

##### 4.2.5.1 Präparation der Proben

Um Tonminerale mit dem REM zu beobachten und zu identifizieren, muß die durch Lufttrocknung weitgehend zerstörte Struktur der Minerale "regeneriert" werden.

Angelehnt an ein Verfahren von MATTIAT (1969) wurden je ca. 5 g des Gesamtsediments der Proben P 6, Li 9 und A 1 (hohe Gehalte der Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$ ) mit 100 ml künstlichen Meerwassers nach RÖMPP (1966) versetzt und über 10 Tage täglich neu suspendiert. Anschließend wurde die Suspension auf 1000 ml mit künstlichem Meerwasser aufgefüllt, homogenisiert und in drei gleiche, hochwandige Glasfiltrationsgefäße überführt. Das Probenmaterial sedimentierte über 3 Wochen aus der Suspension. Mit einer Vakuumpumpe wurden dann die überstehenden Meerwasserlösungen abgezogen, darauf die Membranfilter mit den feuchten Sedimentschichten entfernt und in ca. 3 mm breite Streifen geschnitten. Nach einem von HARTMANN & ÖZERLER (1985) entwickelten Arbeitsgang wurden die Sedimentstreifen in 2-Methylbutan, das durch flüssigen Stickstoff auf ca.  $-190^\circ\text{C}$  gekühlt war, schockgefroren und gebrochen. Die Bruchflächen dienen der späteren REM-Untersuchung.

Vor dem Bedampfen mit einer leitenden Goldschicht mußte den tiefgefrorenen Proben ihre Feuchtigkeit entzogen werden, ohne daß die Struktur der Tonminerale gefährdet war. Das geschah über 24 Std. in einer Gefriertrocknungsanlage bei 1 Pa und  $-60^\circ\text{C}$ , wobei das Wasser durch Sublimation entfernt wurde.

Die so behandelten Proben wurden mit den Bruchflächen nach oben auf Objekträgern fixiert und mit Gold bedampft.

#### 4.2.5.2 Dokumentation

Die beobachteten Tonmineralstrukturen zeigen die Abbildungen 25 bis 30. Wie bei MATTIAT (1969) beschrieben, ließen sich die durch Koagulationssedimentation in einer Sedimentierflüssigkeit mit hohem Elektrolytgehalt entstehenden Tonmineralaggregate identifizieren: Kaolinit tritt im Kartenhausgefüge auf, während Illit Wabenstrukturen bildet. Chlorite und Smektite konnten nicht beobachtet werden.

Abb. 25 zeigt ein schlecht ausgebildetes Kaolinit-Kartenhausgefüge der Nordseeprobe P 6. Das Gefüge wird von Illit-Waben durchsetzt und "gestört".

Abb. 26 stellt einen Illit-"Rasen" der Probe P 6 dar, der zu den Bildaußenseiten hin an Mineralkörner geheftet ist. Der "Rasen" wird von schlecht ausgebildeten, dünnwandigen Waben gebildet, zwischen denen sich ein ebenfalls diffus ausgebildetes Netz aus kleineren Waben spannt.

Abb. 27 ist ein diffuses Wabengefüge der Ostseeprobe Li 9. Dünnwandige, größere und kleine Illit-Waben sind zu beobachten. Links im Bild haften unscharfe Wabenkoagulate an einem Mineralkorn.

Abb. 28 zeigt ein gut ausgebildetes, kaolinitisches Kartenhausgefüge in der gleichen Probe. Stellenweise treten zwischen den Kaolinitplättchen kleine Wabenaggregate auf.

Abb. 29 stellt eine Übersichtsaufnahme aus einer Bruchfläche der Antarktisprobe A 1 dar. In einem ungeordneten Korngemenge fällt eine stark ausgeprägte Illitwabenstruktur auf, die

Abb. 30 als Vergrößerung zeigt. Die Struktur ist scharf abgegrenzt und dickwandig. Zwischen dem Korngemenge der Abb. 29 befinden sich zahlreiche kleinere Illit-Waben gleichen Typs.

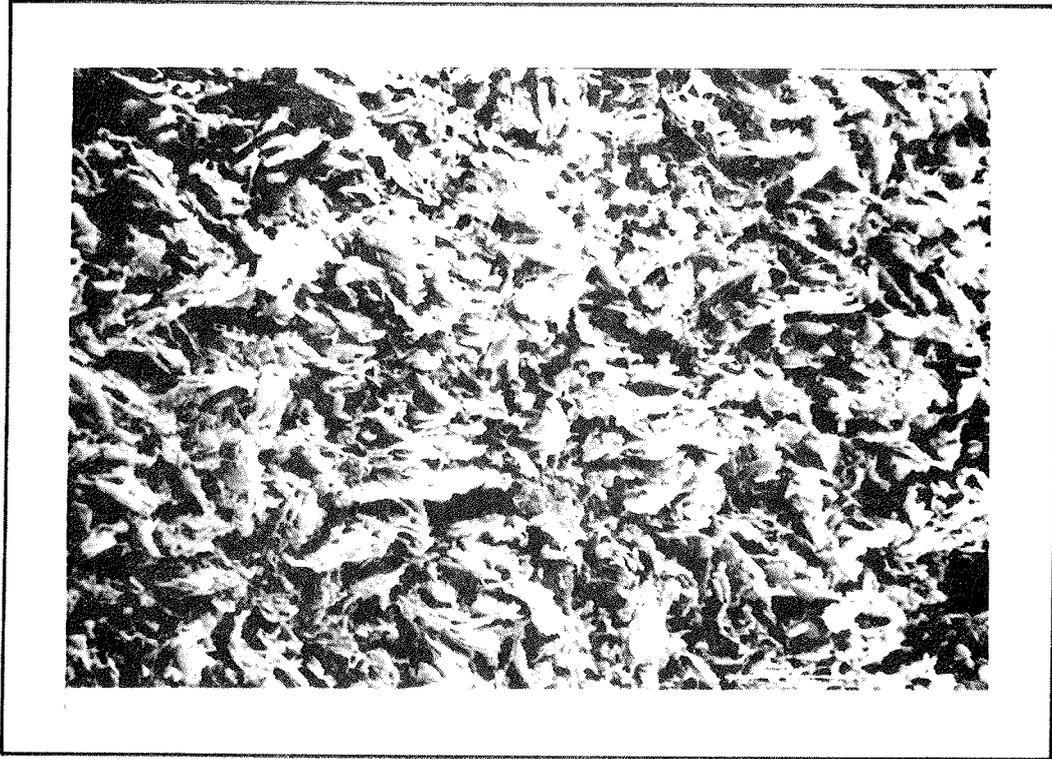


Abb. 25: P 6

┆──┆ 10 μm

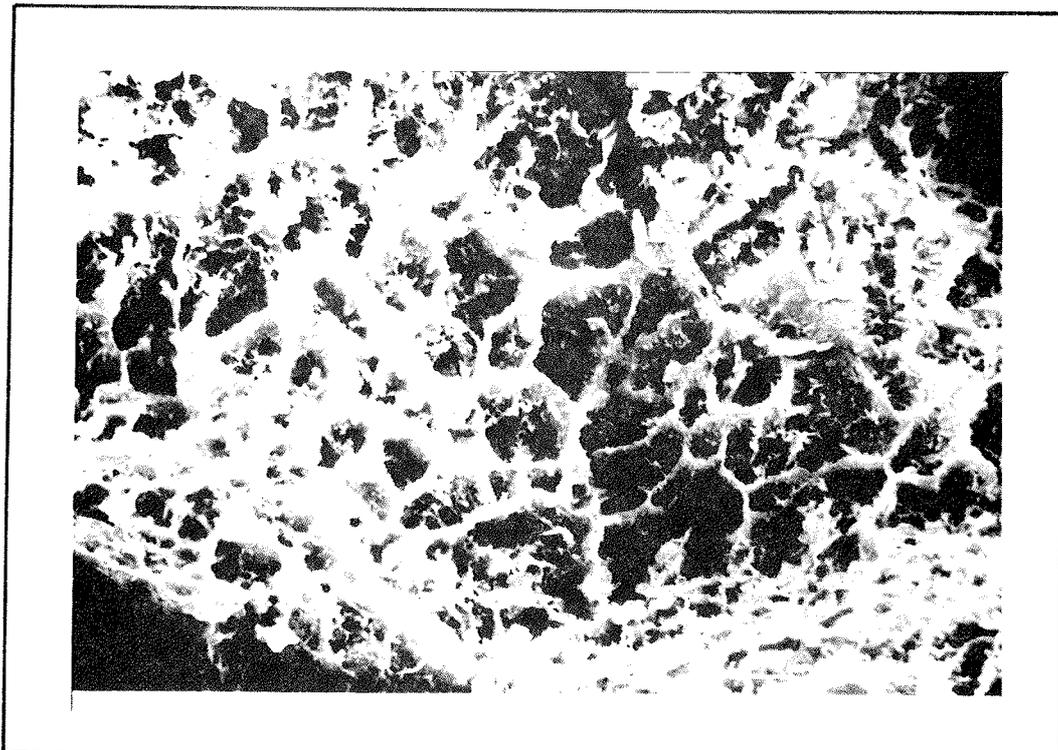


Abb. 26: P 6

┆──┆ 10 μm

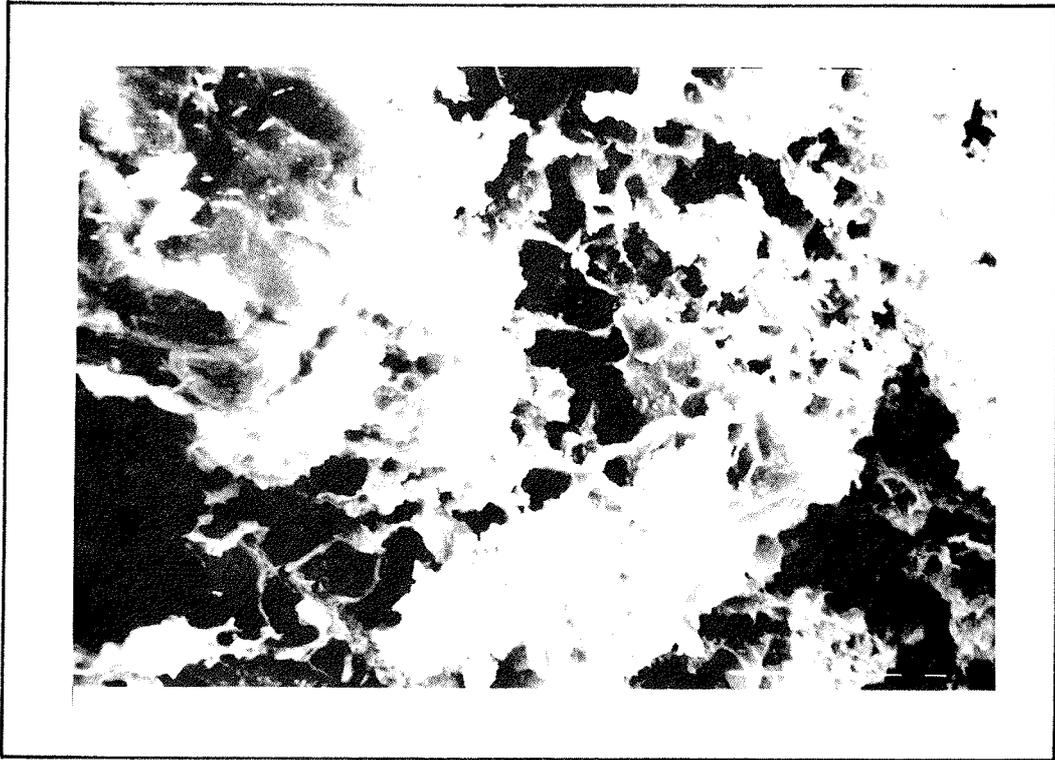


Abb. 27: Li 9

┆──┆ 10 μm

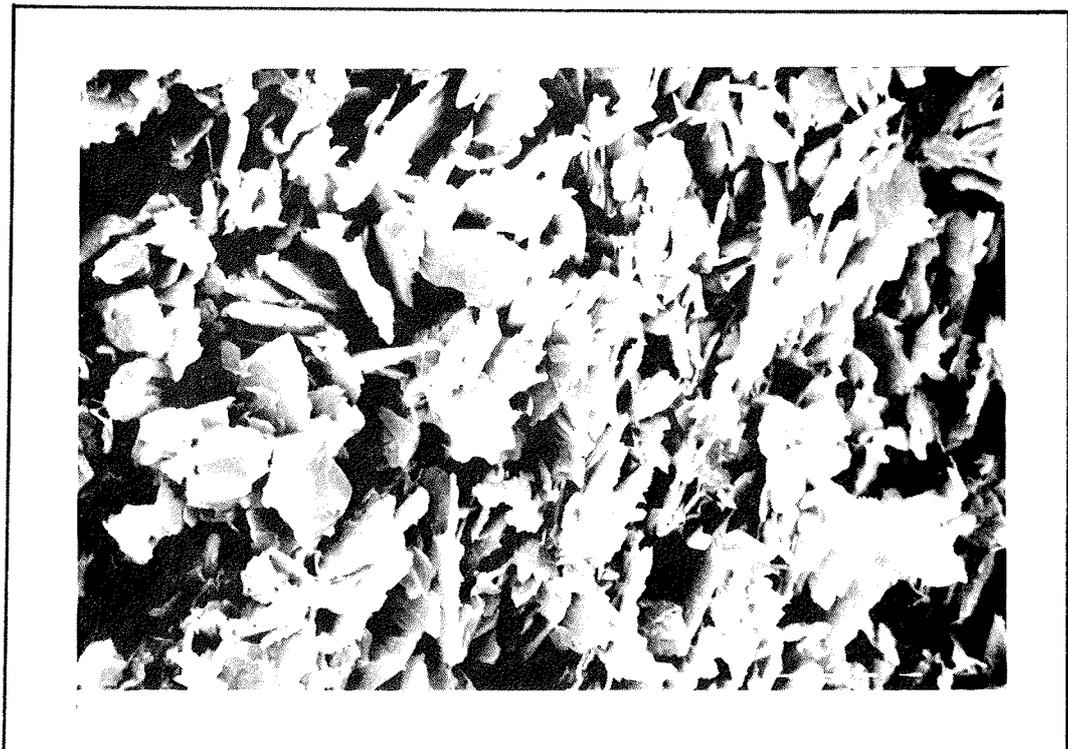


Abb. 28: Li 9

┆──┆ 10 μm

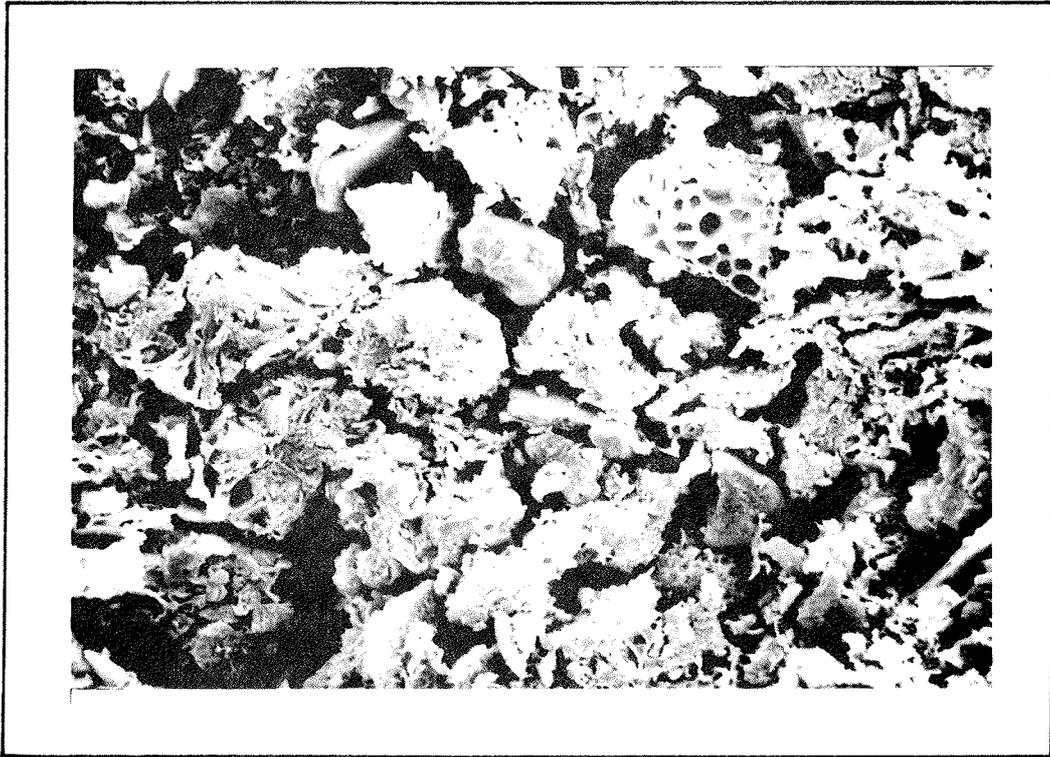


Abb. 29: A 1

┆┆┆ 10 μm

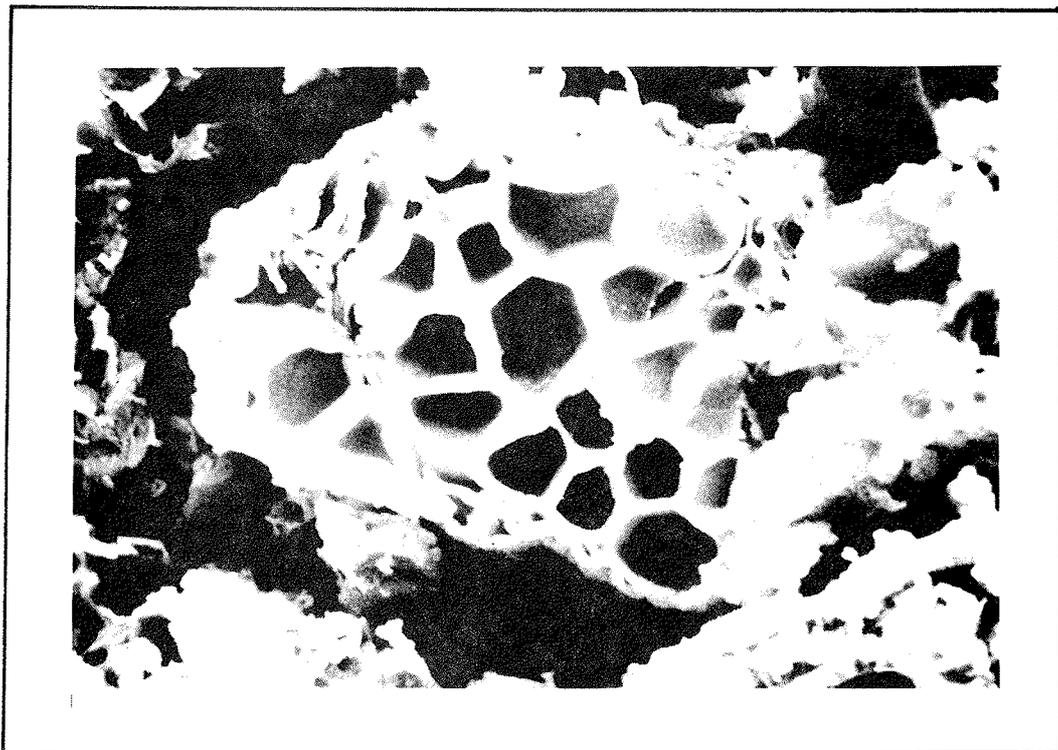


Abb. 30: A 1

┆┆┆ 1 μm

Da nur von jeweils einer Probe der drei Arbeitsgebiete die Tonmineralstrukturen untersucht wurden, können aus diesen Beobachtungen keine differenzierten Schlüsse gezogen werden. Trotzdem soll erwähnt sein, daß die ausgeprägte Wabenstruktur in der Antarktisprobe und die scharfen Illit-Reflexe im dazugehörigen Röntgendiagramm insgesamt auf eine höhere Kristallinität der Illite in den Antarktissedimenten hinweisen.

OSIPOV & SOKOLOV (1978), WELTON (1984) und HARTMANN & ÖZERLER (1985) beschreiben Wabenstrukturen auch von Smektiten. Deshalb wurden, neben der oben angeführten optischen Identifizierung, energiedispersive Röntgen-Analysen (EDX) der beobachteten Strukturen durchgeführt. Die Verhältnisse der Zählraten der dabei entstehenden, elementspezifischen Röntgenstrahlungen wurden nach einem "flow-chart" von MURDOCH et al. (1977) ausgewertet und liegen für alle an Wabenstrukturen vorgenommenen Punktanalysen im Bereich von Illit:

Al/Si	Fe/Al	Fe/Si	Mg/Al	Mg/Si
0,40-0,58	0,17-0,69	0,10-0,34	0,14-0,22	0,06-0,10
Ca/Al	Ca/Si	K/Al	K/Si	
0, -0,32	0, -0,13	0,44-0,55	0,18-0,32	

Die Werte der Kartenhausstrukturen bewegen sich in dem für Kaolinit angegebenen Bereich  $Al/Si = 0,76-0,83$  und bestätigen die optische Ansprache.

### 4.3 Sedimentchemische Analysen

#### 4.3.1 Methodik

Die Untersuchungen wurden mit einer vollautomatischen Titrationsanlage von STRÖHLEIN, Coulomat 701, zur Bestimmung der Gehalte an  $C_{org}$ ,  $C_{carb}$  und  $S_{ges}$  in den Sedimenten durchgeführt.

Zur Kohlenstoffbestimmung wurde das feingemahlene Probenmaterial im Sauerstoffstrom bei ca. 900°C verglüht und das entstehende  $CO_2$  in einer alkalischen Bariumperchloratlösung absorbiert und damit deren pH-Wert erniedrigt. Zur Schwefelbestimmung wurde das entstehende  $SO_2$  zu  $SO_4^{2-}$  oxidiert und damit der pH-Wert einer Natriumsulfatlösung gesenkt. Die Aciditäten wurden automatisch zurücktitriert und die dabei verbrauchte Energie digital angezeigt. Die Zählraten für die Energie wurden in die Gehalte an Kohlenstoff und Schwefel umgerechnet.

Zur Differenzierung von organischem und karbonatischem Kohlenstoff wurde zunächst unbehandeltes Probenmaterial auf den Gesamtkohlenstoffgehalt hin untersucht. Von diesen Werten wurden die Gehalte an  $C_{org}$  aus mit HCl + Hitze entkarbonisiertem Material subtrahiert. Die so erhaltenen Konzentrationen an  $C_{carb}$  wurden stöchiometrisch zu  $CO_3^{2-}$  umgerechnet.

Alle Analysen erfolgten dreifach.

#### 4.3.2 Ergebnisse

Die Analysendaten sind in den Tabellen 12 bis 14 aufgeführt.

Von den Nordseeproben vereint die P 6 die höchsten Gehalte an  $C_{org}$ ,  $CO_3^{2-}$  und  $S_{ges}$  auf sich. Dieses trifft auch auf die Proben mit relativ hohen  $<2 \mu m$ -Anteilen in den Ostsee- und Antarktissedimenten zu. Die Gehalte von  $C_{org}$  und Schwefel zeigen parallele Entwicklungen.

Insgesamt unterstreichen die Analysen die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie: hohe Karbonatgehalte der Nordseeproben gegenüber stark herabgesetzten Werten in den anderen Gebieten. Da hier nur das  $CO_3^{2-}$ -Anion berücksichtigt wurde, sind die Werte allgemein niedriger als die Summen für Calcit und Dolomit aus den Röntgenuntersuchungen.

Schwefel ist parallel zu Pyrit mit höchsten Gehalten in den Ostseesedimenten anzutreffen.

Dabei sind die Mittelwerte für Pyrit (RDA) in den einzelnen Gebieten nahezu identisch mit denen für  $S_{ges}$  dieser Untersuchungen. Daraus folgt, daß ein Teil des Schwefels nicht in sulfidischer Bindung vorliegt.

Probe	C <sub>org</sub> %	Co <sub>3</sub> <sup>2-</sup> %	S <sub>ges</sub> %
P 6	1,54	6,50	1,55
P 9	0,60	1,50	0,23
P 11	0,51	3,80	0,39
P 13	0,55	2,80	0,39
P 14	0,38	3,20	0,27
P 15	0,34	3,30	0,11
P 18	0,16	4,00	0,18
P 19	0,16	4,00	0,19
P 20	0,11	3,50	0,18
P 21	0,13	3,60	0,21
P 23	0,21	4,20	0,29
∅	0,43	3,67	0,36
min-max	0,11 - 1,54	1,50 - 6,50	0,11 - 1,55

Tab. 12: Organischer Kohlenstoff, Karbonatgehalt und Gesamtschwefel der Nordseeproben "P"

Probe	C <sub>org</sub> %	Co <sub>3</sub> <sup>2-</sup> %	S <sub>ges</sub> %
Li 1	0,15	0,70	0,12
Li 2	1,17	1,35	0,72
Li 3	2,60	1,20	1,43
Li 4	0,74	2,00	1,34
Li 5	3,34	1,30	2,14
Li 6	1,63	0,60	0,98
Li 7	0,19	0,15	0,12
Li 8	0,55	1,10	0,39
Li 9	3,42	1,60	1,84
Li 10	1,91	0,10	0,89
Li 11	0,66	0,35	0,42
∅	1,49	0,95	0,94
min-max	0,15 - 3,42	0,10 - 2,00	0,12 - 2,14

Tab. 13: Organischer Kohlenstoff, Karbonatgehalt und Gesamtschwefel der Ostseeproben "Li"

Probe	C <sub>org</sub> %	Co <sub>3</sub> <sup>2-</sup> %	S <sub>ges</sub> %
A 1	0,59	0,15	0,45
A 2	0,21	0,05	0,19
A 3	0,46	0,05	0,40
A 4	0,31	0,20	0,28
A 5	0,46	0,10	0,39
A 6	0,48	0,01	0,46
A 7	0,36	0,30	0,39
A 8	0,37	0,30	0,31
A 9	0,16	0,01	0,19
A 10	0,07	0,01	0,14
A 11	0,13	0,01	0,16
A 12	0,10	0,01	0,16
∅	0,31	0,10	0,29
min-max	0,07 - 0,59	0,01 - 0,30	0,16 - 0,46

Tab. 14: Organischer Kohlenstoff, Karbonatgehalt und Gesamtschwefel der Antarktisproben "A"

#### 4.4 Sedimentphysikalische Analysen

##### 4.4.1 Methodik

In einem geschlossenen System, hier STRÖHLEIN Areameter, werden von den freien Oberflächen der Sedimente bei ca.  $-190^{\circ}\text{C}$  Stickstoffmoleküle des Spülgases adsorbiert. Die Adsorption führt zur Druckminderung in einem U-Rohr und verändert den Stand einer Ölsäule. Die Steighöhe der Ölsäule ist ein Maß für die Menge der adsorbierten  $\text{N}_2$ -Moleküle und wird in die spezifische Oberfläche der Sedimente umgerechnet.

##### 4.4.2 Ergebnisse

Die spezifischen Oberflächen ( $S_g$ ) der Sedimente der Arbeitsgebiete sind nebeneinander in Tab. 15 aufgeführt.

Der Parameter  $S_g$  ist eine sehr sensible Größe, die entscheidend von der Granulometrie der Sedimente und den Mineralstrukturen geprägt wird.

So weisen die Antarktisproben mit ihren hohen  $< 2 \mu\text{m}$ -Gehalten und Schichtsilikatvorkommen die größten spezifischen Oberflächen auf. Ihnen folgen die Ostseeproben, die gegenüber den Nordseesedimenten stärkere Siltanteile besitzen (siehe Abb. 10a - 11b und Tab. 2, 3).

Weiterhin zeigen die Proben P 6, Li 5 und Li 9 sowie A 1, die bei den vorangegangenen Untersuchungen schon durch hohe Konzentrationen an  $\text{Ton}_{\text{ges}}$ ,  $\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  und  $S_{\text{ges}}$  auffielen, ebenfalls große  $S_g$ -Werte.

Probe	$S_g$ [m <sup>2</sup> /g]	Probe	$S_g$ [m <sup>2</sup> /g]	Probe	$S_g$ [m <sup>2</sup> /g]
P 6	4,43	Li 1	0,14	A 1	10,41
P 9	1,99	Li 2	2,66	A 3	2,90
P 11	2,10	Li 3	5,70	A 3	8,06
P 13	3,16	Li 4	1,74	A 4	5,67
P 14	3,67	Li 5	5,88	A 5	9,65
P 15	2,28	Li 6	3,61	A 6	9,15
P 18	1,12	Li 7	0,11	A 7	7,19
P 19	1,04	Li 8	0,89	A 8	5,48
P 20	0,55	Li 9	5,40	A 9	1,25
P 21	0,65	Li 10	3,05	A 10	0,28
P 23	0,92	Li 11	0,96	A 11	0,89
				A 12	0,38
$\emptyset$	1,99		2,74		5,11
min-max	0,55 - 4,43		0,11 - 5,88		0,28 - 10,41

Tab. 15: Spezifische Oberflächen der Proben "P", "Li" und "A"

#### 4.5 Regressionsanalysen II

Die linearen Regressionsanalysen und der Signifikanztest der Korrelationskoeffizienten wurden wie in Kap. 4.1.3 beschrieben durchgeführt.

Die Koeffizienten mit 95 %iger Signifikanz sind einfach, diejenigen mit 99 %iger Signifikanz zweifach unterstrichen.

Die Untersuchungen sollen das Verhalten der Tonanteile und der in Kap. 4.3 ermittelten Parameter gegenüber den Pelitfraktionen der untersuchten Sedimente verdeutlichen sowie die Haupt-Oberflächenbildner der Gesamtproben herausstellen.

Tab. 16 zeigt, daß die Tongehalte der Nord- und Ostseesedimente keine Abhängigkeit von ihren Pelitfraktionen besitzen, wohl aber die Antarktisproben, da diese relativ hohe Tonanteile führen, während sich die Pelite der Proben "P" und "Li" aufgrund der Strömungsdynamik der Sedimentationsgebiete hauptsächlich aus Quarz- und Feldspatdetritus ableiten.

$C_{org}$  und  $S_{ges}$  zeigen gleichermaßen starke Abhängigkeiten von den entsprechenden  $<2 \mu\text{m}$ -Fraktionen der drei Arbeitsgebiete.

Karbonate sind wegen ihres relativ hohen Vorkommens nur bei den Nordseeproben signifikant in den Pelitfraktionen angereichert.

Aus Tab. 17 wird deutlich, daß die spezifischen Oberflächen aller untersuchten Sedimente entscheidend durch die Partikelgrößen beeinflusst werden: je mehr feineres Material, desto größer  $S_g$ .

	Ton <sub>ges</sub>	C <sub>org</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>ges</sub>
< 2 μm				
"P"	0,427	<u>0,897</u>	<u>0,719</u>	<u>0,924</u>
"Li"	0,568	<u>0,911</u>	0,432	<u>0,864</u>
"A"	<u>0,859</u>	<u>0,958</u>	0,232	<u>0,920</u>

Tab. 16: Korrelationskoeffizienten aus linearen Regressionsanalysen: < 2 μm gegen Ton<sub>ges</sub>, C<sub>org</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> und S<sub>ges</sub> der drei Arbeitsgebiete

	< 63 μm	< 2 μm	Ton <sub>ges</sub>	C <sub>org</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	S <sub>ges</sub>
Sg						
"P"	<u>0,787</u>	<u>0,784</u>	0,270	<u>0,814</u>	0,268	<u>0,680</u>
"Li"	<u>0,935</u>	<u>0,932</u>	0,563	<u>0,970</u>	0,405	<u>0,910</u>
"A"	<u>0,951</u>	<u>0,963</u>	<u>0,900</u>	<u>0,984</u>	0,390	<u>0,976</u>

Tab. 17: Korrelationskoeffizienten aus linearen Regressionsanalysen: spezifische Oberflächen gegen < 63 μm, < 2 μm, Ton<sub>ges</sub>, C<sub>org</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, S<sub>ges</sub> der drei Arbeitsgebiete

Die Tone erweisen sich, ihrem relativ geringem Auftreten in den Proben "P" und "Li" entsprechend, nur in den Antarktisproben als signifikant oberflächenbildend.

Die Karbonate sind in allen Proben nicht maßgeblich an deren spezifischen Oberflächen beteiligt, wogegen  $C_{\text{org}}$  und  $S_{\text{ges}}$  sehr gut mit  $S_g$  korrelieren.

Karbonate sind zwar bei entsprechenden Konzentrationen in der Pelitfraktion angereichert, besitzen aber selbst nur eine geringe spezifische Oberfläche. Organischer Kohlenstoff und Schwefel sind Anzeiger für organisches Material, dessen wichtigstes Zersetzungsprodukt Huminsäuren mit sehr hohem  $S_g$  sind. Das führt dazu, daß  $C_{\text{org}}$  und  $S_{\text{ges}}$  trotz relativ geringer Konzentrationen in den Proben die spezifischen Oberflächen besonders stark beeinflussen, während der Beitrag der  $\text{CO}_3^{2-}$ -Gehalte zur Oberflächenbildung zu vernachlässigen ist.

Zur Veranschaulichung seien folgende aus FÖRSTNER & WITTMANN (1979) entnommenen Daten genannt:

Material	$S_g$ [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]
Calcit (<2 $\mu\text{m}$ )	12,5
Kaolinit	12 - 50
Illit	30 - 80
Chlorit	-
Smektite	50 - 150
Huminsäuren	1900

## 5 Geochemische Untersuchungen

### 5.1 Bestandsaufnahme der Schwermetallgehalte

Mit den folgenden Untersuchungen wurden die Totalgehalte der von WOOD (1974) als sehr toxisch eingestuften Elemente Blei, Cadmium, Zink sowie Eisen und Mangan in den Sedimenten der drei Arbeitsgebiete bestimmt.

#### 5.1.1 Methodik

Jeweils 500 mg des mikrogemahlenden Sedimentmaterials wurden in Teflonbecher eingewogen und einem Flußsäure-Perchlorsäure-Aufschluß nach KÖSTER (1979) unterzogen. Die Aufschlußrückstände wurden in 1 n HCl aufgenommen, in 100 ml-Kolben überführt, mit Aqua bidest. verdünnt und in Polyethylenflaschen gefüllt. Die anschließenden Analysen der o.g. Schwermetalle erfolgten mit einem PHILIPS Atom-Absorptions-Spektrophotometer SP 2900. Aus den Probenlösungen entstehen in einer Flamme (Luft-Acetylen) oder einer Graphitrohrküvette durch thermische Dissoziation (ca. 2000°C) freie Atome. Bei gleichzeitiger Durchstrahlung mit dem Licht einer Hohlkathodenlampe, die das Spektrum des zu analysierenden Sedimentes aussendet, werden die entsprechenden freien Atome angeregt, d.h. Lichtenergie durch sie absorbiert. Die Lichtabsorption gehorcht dem LAMBERT-BEERSchen Gesetz. Die Energieabnahme des Hohlkathodenlichtes ist ein Maß für die Konzentration des jeweiligen Elementes.

Die Bestimmungen von Fe und Mn wurden mit der Flammenmethode durchgeführt. Pb-, Cd- und Zn-Analysen erfolgten in der Graphitrohrküvette mit folgenden programmgesteuerten Heizphasen:

	Pb	Cd	Zn
Trocknung (°C):	130	130	130
Veraschung (°C):	600	400	550
Atomisierung (°C):	2400	2050	2500

Alle Analysen wurden mindestens dreifach durchgeführt. Pb-Eichlösungen mußten täglich neu angesetzt werden, da sie wegen der hohen Affinität des Pb zu Feststoffoberflächen, FÖRSTNER & CALMANO (1984), relativ schnell unbrauchbar wurden.

Aus dem Gang der Eichkurven während der gesamten Meßzeit wurden folgende relative Fehler errechnet:

Pb:  $\pm 11,5 \%$ , Cd:  $\pm 15,9 \%$ , Zn:  $\pm 16,8 \%$ , Fe:  $\pm 13,0 \%$ , Mn:  $\pm 15,4 \%$ .

#### 5.1.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Analysendaten zu den Sedimenten der drei Untersuchungsgebiete sind in den Tabellen 18 bis 20 aufgeführt.

Es wird deutlich, daß die Schwermetalle aller untersuchten Sedimente stark in ihren Pelitfraktionen angereichert sind, da die aktiven metallbindenden Substanzen ebenfalls in den Kornfraktionen  $< 2 \mu\text{m}$  angereichert vorkommen, FÖRSTNER & WITTMANN (1979).

Die aus dem Süden Helgolands stammenden Nordseeproben P 6 und P 9 weisen die höchsten Gehalte an Pb und Cd auf, P 6 zusätzlich höchste Konzentrationen an Mn und Fe. Die Proben dieses Bereiches unterliegen der permanenten Metallzulieferung aus der Suspensions- und Lösungsfracht der Flüsse, deren Einfluß in nordwestlicher Richtung abnimmt bzw. nicht zum Tragen kommt.

Auf dem Probenprofil P 13 - P 23 läßt sich deshalb küstenwärts eine mehr oder weniger starke Zunahme der Schwermetallgehalte feststellen, die für Zn besonders deutlich wird.

Zusätzlich können im Verlauf des Elbe-Urstromtals strömungsbedingte Sedimentumlagerungen und -vermischungen mit älteren Sedimenten durch Bioturbation zur Herabsetzung der Metallgehalte in den obersten Sediment-cm führen.

Analysendaten von PATCHINEELAM & FÖRSTNER (1977) aus den obersten Zentimetern eines Sedimentkerns südöstlich von Helgoland zeigen für Pb, Cd und Zn gleiche Größenordnungen wie in der Probe P 6 dieser Arbeit.

GADOW & SCHÄFER (1973) und SOKOLOWSKI (1982) geben in ihren Untersuchungen Mittelwerte für Cd von 15 ppm bzw. 4,2 ppm an. Dabei wurden jedoch hauptsächlich zentralere Teile des Helgoländer Schlickkörpers beprobt, der besonders durch Flußfrachtsedimentation gespeist wird, so daß die Diskrepanz zu den niedrigeren Cd-Werten dieser Arbeit nicht verwundert.

IRION (1982) stellte für Zn in den obersten 5 cm von drei Sedimentkernen aus einem Seegebiet im Südosten Helgolands Konzentrationen von 450 bis 3175 ppm fest.

Die Ostseesedimente fallen gegenüber den Nordseeproben durch ihre wesentlich niedrigeren Pb-Gehalte, dabei aber höheren Cd-Konzentrationen auf. In den Pelitfraktionen besitzt die Probe Li 6 die höchsten Werte an Cd und Zn, die Probe Li 8 den maximalen Pb-Gehalt.

SUESS & ERLLENKEUSER (1975) ermittelten Pb mit 85 ppm, Cd mit 1,9 ppm und Zn mit 345 ppm in den obersten Zentimetern eines Sedimentkerns der Kieler Bucht; MÜLLER et al. (1980) geben für die Oberflächenschicht eines Kerns der Lübecker Bucht Zn-Werte von 315 ppm an.

Von ERGIN (1982) bearbeitete Sedimentkerne besitzen in der Oberflächenschicht Gehalte von 107 ppm Pb, 1,72 ppm Cd und 285 ppm Zn (Eckernförder Bucht). In der Geltinger Bucht ermittelte er Werte von 62 ppm Pb, 2,98 ppm Cd und 172 ppm Zn.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Analysen der Proben "Li" lassen sich in ihrer Schwankungsbreite direkt mit denen der zitierten Verfasser vergleichen.

Die Schwermetallgehalte der Antarktissedimente liegen für Pb und Cd erheblich unterhalb der in Nord- und Ostsee ermittelten Werte. Zn dagegen weist annähernd hohe Konzentrationen wie in den Proben "P" und "Li" auf. Da keine anthropogene Belastung der Proben "A" vorliegt, sind die Ursachen im Liefergebiet und im Ablagerungsmilieu anzunehmen. Dafür sprechen auch die Maximalgehalte an Pb, Cd und Zn der Probe A 10, die aufgrund ihres äußerst geringen Pelitanteils gar nicht für hohe Schwermetallanreicherung prädestiniert ist. Auf dieses Phänomen soll in Kap. 5.4.1 näher eingegangen werden.

Die Fe-Gehalte sind in den Proben "P" am höchsten, Mn hat maximale Konzentrationen in den Antarktisproben.

	Pb [ppm]		Cd [ppm]		Zn [ppm]		Mn [ppm]		Fe [ppm, %]	
	GES	< 2 µm	GES	< 2 µm						
P 6	22,21	141,4	0,668	1,380	121,94	394	734,0	1324	20058,0	5,6
P 9	14,23	104,0	0,588	1,640	64,90	352	165,5	476	7513,0	5,4
P 11	21,10	135,2	0,584	1,300	76,67	344	269,3	511	12442,0	5,3
P 13	16,34	34,8	0,459	0,940	65,16	216	208,3	320	12964,0	5,2
P 14	15,03	80,6	0,517	0,980	53,10	224	187,3	300	10797,0	5,7
P 15	11,95	89,4	0,437	1,140	60,84	244	190,7	296	10984,0	6,0
P 18	14,30	75,4	0,462	1,220	55,22	188	195,1	320	9706,0	3,9
P 19	13,90	44,2	0,546	1,350	65,40	306	195,5	476	9119,0	5,9
P 20	12,16	70,7	0,558	1,100	69,61	422	191,2	640	8676,5	6,1
P 21	11,81	70,2	0,376	1,370	59,47	428	183,8	780	8590,0	6,5
P 23	10,98	49,9	0,590	1,200	68,71	414	205,9	696	9985,5	6,4
∅	14,92	81,4	0,526	1,238	69,18	322	247,9	558	10985,0	5,6
min	10,98	34,8	0,376	0,940	53,10	188	165,5	296	7513,0	3,9
max	22,21	141,4	0,668	1,640	121,94	428	734,0	1324	20058,0	6,5

Tab. 18: Schwermetallkonzentrationen in den Gesamtproben und den Pelitfraktionen der Nordseeproben

Probe	Pb [ppm]		Cd [ppm]		Zn [ppm]		Mn [ppm]		Fe [ppm, %]	
	GES	< 2 µm	GES	< 2 µm						
Li 1	5,57	n.b.	0,823	n.b.	17,97	n.b.	158,0	n.b.	2407,5	n.b.
Li 2	7,36	44,04	0,835	1,140	42,85	220,0	179,8	188,0	7181,7	4,4
Li 3	12,03	n.b.	0,810	n.b.	68,45	n.b.	267,9	n.b.	3844,6	n.b.
Li 4	7,71	17,64	0,940	1,208	40,70	150,0	302,3	596,0	12665,6	4,1
Li 5	4,23	10,50	0,892	1,062	58,02	115,0	436,3	617,0	16049,7	3,1
Li 6	22,58	72,60	0,982	2,912	42,88	546,0	268,1	432,0	9810,5	3,8
Li 7	6,70	n.b.	0,846	n.b.	17,51	n.b.	148,5	n.b.	1912,5	n.b.
Li 8	8,09	93,87	0,809	2,134	23,67	266,7	114,1	296,7	3343,0	5,1
Li 9	8,14	56,76	1,083	2,176	62,36	258,0	384,2	553,3	5456,3	4,5
Li 10	8,40	59,49	1,017	2,201	27,63	277,8	242,4	459,3	9139,6	4,4
Li 11	7,20	34,76	0,840	1,581	21,18	205,0	97,9	310,0	3068,7	4,4
∅	8,40	48,71	0,823	1,802	38,47	254,7	236,3	431,5	6807,2	4,2
min	6,70	10,50	0,809	1,062	17,51	115,0	97,9	188,0	3343,0	3,1
max	22,58	93,87	1,083	2,912	68,45	546,0	436,3	596,0	16049,7	5,1

Tab. 19: Schwermetallkonzentrationen in den Gesamtproben und den Pelitfraktionen der Ostseeproben

Probe	Pb [ppm]		Cd [ppm]		Zn [ppm]		Mn [ppm]		Fe [ppm, %]	
	GES	< 2 µm	GES	< 2 µm						
A 1	4,42	14,70	0,213	0,272	72,99	208,0	370,6	600,0	12433,5	4,3
A 2	4,33	13,80	0,288	0,344	44,47	178,0	138,2	630,0	4327,5	4,0
A 3	4,20	13,70	0,248	0,299	75,98	198,0	447,6	640,0	8865,4	4,6
A 4	5,11	14,00	0,340	0,374	61,75	178,0	185,6	550,0	6351,4	4,7
A 5	5,30	13,50	0,239	0,352	60,04	210,0	539,7	1130,0	10702,4	5,3
A 6	4,28	13,00	0,277	0,386	99,41	176,0	375,5	874,0	9612,4	5,1
A 7	4,67	11,90	0,245	0,400	85,09	180,0	227,4	610,0	6846,9	5,0
A 8	4,70	12,00	0,267	0,422	42,62	202,0	217,6	780,0	4898,4	5,0
A 9	3,69	11,30	0,228	0,355	21,16	216,0	125,5	980,0	2273,9	4,0
A 10	5,09	21,55	0,260	0,538	32,31	675,8	89,7	980,9	2363,5	4,1
A 11	4,53	10,90	0,215	0,340	30,97	204,0	116,2	434,0	3675,9	3,8
A 12	2,19	12,80	0,217	0,288	32,74	194,0	59,5	268,0	1653,5	3,4
∅	4,38	13,60	0,253	0,364	54,96	235,0	241,1	706,4	6167,1	4,4
min	2,19	10,90	0,213	0,272	21,14	178,0	59,5	268,0	1653,5	3,4
max	5,11	21,55	0,340	0,538	99,41	675,8	447,6	1130,0	12433,5	5,3

Tab. 20: Schwermetallkonzentrationen in den Gesamtproben und den Pelitfraktionen der Antarktisprouben

## 5.2 Regionale Schwermetallanreicherungen in Nord- und Ostsee

Für den Vergleich von Schwermetallgehalten in Sedimenten verschiedener Herkunfts- und Ablagerungsräume muß in Betracht gezogen werden, daß unterschiedliche Materialzusammensetzung und variierende Granulometrie "Verdünnungseffekte" hervorrufen (siehe Vergleich der Schwermetallkonzentrationen in den Gesamtproben gegenüber den Pelitfraktionen).

Aus diesem Grunde sollen weiterhin nur die Korngrößenkorrigierten Metallgehalte der  $< 2 \mu\text{m}$ -Fraktionen berücksichtigt werden. Dies ermöglicht die einheitliche Betrachtung der angereicherten Sedimentphasen und erlaubt eine Gegenüberstellung mit den Daten des Tongesteins-Standards von TUREKIAN & WEDEPOHL (1961). Dabei wurden Metallgehalte in fossilen Tongesteinen unterschiedlicher Herkunft und Alters als natürliche "background"-Werte definiert. In Tabelle 21 sind die mittleren Schwermetallgehalte der Sedimente aus den drei Untersuchungsgebieten dem Tongesteins-Standard (TGS) gegenübergestellt und die daraus folgenden Anreicherungsfaktoren (AF) angegeben.

Pb und Cd sind in den Nord- und Ostseeproben deutlich angereichert, die Antarktissedimente zeigen keine Anreicherungen. Den höchsten AF-Wert für Cd besitzen die Ostseeproben.

Zn weist im TGS weitaus geringere Konzentrationen gegenüber den drei Untersuchungsgebieten auf, so daß sich in allen Fällen Anreicherungen ergeben. Die Mn(TGS)-Werte übertreffen diejenigen der hier analysierten Sedimente.

Im folgenden soll den Analysen der Proben "A" für einen Vergleich mit Nord- und Ostseedaten der Vorzug gegeben werden, da es sich damit um die Gegenüberstellung rezent-mariner Sedimente handelt. Die recht hohen Zinkkonzentra-

Probe	$\phi$ Pb (ppm)	$\phi$ Cd (ppm)	$\phi$ Zn (ppm)	$\phi$ Mn (ppm)	$\phi$ Fe (%)
"P"	81,40	1,238	322,0	558,0	5,6
(AF)	(4,1)	(4,1)	(3,4)	(-)	(1,2)
"Li"	48,71	1,802	254,7	441,5	4,2
(AF)	(2,4)	(6,0)	(2,7)	(-)	(-)
"A"	13,60	0,364	235,0	706,4	4,4
(AF)	(-)	(-)	(2,5)	(-)	(-)
TGS	20,00	0,300	95,0	850,0	4,7

Tab. 21: Anreicherungs-faktoren (AF) der Schwermetalle in den Nord-, Ostsee- und Antarktisproben (Fraktion  $<2 \mu\text{m}$ ) gegenüber dem Tongesteins-Standard (TGS)

Probe	$\phi$ Pb (ppm)	$\phi$ Cd (ppm)	$\phi$ Zn (ppm)	$\phi$ Mn (ppm)	$\phi$ Fe (%)
"P"	81,40	1,238	322,0	558,0	5,6
(AF)	(6,0)	(3,4)	(1,4)	(-)	(1,3)
"Li"	48,71	1,802	254,7	441,5	4,2
(AF)	(3,6)	(5,0)	(1,1)	(-)	(-)
"A"	13,60	0,364	235,0	706,0	4,4

Tab. 22: Anreicherungs-faktoren (AF) der Schwermetalle in den Nord- und Ostseeproben gegenüber denen der Antarktis, bezogen auf die Kornfraktion  $<2 \mu\text{m}$

tionen der antarktischen Pelitfraktionen erschweren allerdings die Beurteilung der Anreicherungsfaktoren in Tabelle 22, da noch nicht entschieden werden kann, ob hohe Gehalte an Zn in Nord- und Ostsee anthropogenen Ursprungs sind und in den Proben "A" vom Liefergebiet und Milieu abhängen. Für eine einheitliche Betrachtung werden diese Daten dennoch in Beziehung zueinander gesetzt.

Pb erlangt in den Nordseeproben den höchsten AF-Wert, Cd ist wieder in den Ostseesedimenten deutlich stärker angereichert.

Die sehr geringen Anreicherungsfaktoren des Zn lassen keine Interpretation zu.

Für eine differenzierte Beurteilung der einzelnen Probenahmeplätze der Nord- und Ostsee sind den jeweiligen Analysen die entsprechenden mittleren Schwermetallgehalte der Proben "A" gegenübergestellt worden. Die daraus resultierenden probenspezifischen Anreicherungsfaktoren wurden zur übersichtlicheren Kartendarstellung ganzzahlig gerundet und in Kreissegmenten ausgedrückt (Abb. 31 bis 36).

Die Bleianreicherungen der Proben "P" in Abb. 31 weisen die Sedimente im Süden Helgolands mit AF-Werten von 9 und 10 als am stärksten belastet aus. Das NW-SE-lich verlaufende Probenprofil ist mit Anreicherungsfaktoren von 4 bis 6 insgesamt geringer mit Blei belastet.

Cd ist in diesem Bereich 3- bis 4-fach angereichert (Abb. 32) und erreicht mit einem AF-Wert von 5 wieder südöstlich Helgolands sein Maximum. Besonders auf dem Profil P 13-P 23 wird das küstenwärtige Einsetzen der zweifachen Zn-Anreicherungen deutlich (Abb. 33). In diesem Fall sind auch für die Proben P 6 bis P 11 nur AF-Werte von 2 ermittelt worden.

Von den Ostseeproben sind die Sedimente der Mecklenburger Bucht 3- bis 7-fach Pb-angereichert, in der Lübecker Bucht nur die Proben Li 2 und Li 6 3- bzw. 5-fach (Abb. 34).

Die AF-Werte für Cd sind deutlich höher als in den Nordseeproben und umfassen den Bereich von 3- bis 8-facher Anreicherung (Abb. 35), wobei Li 6 im Süden von Grömitz ein lokales Belastungsmaximum besitzt. Dies zeigt sich auch für Zn mit einem AF-Wert von 2. In den übrigen Ostseeproben wurden keine Zn-Anreicherungen nachgewiesen (Abb. 36).

Insgesamt bleibt festzuhalten, daß maximale Pb-Anreicherungen in den Nordseesedimenten zu finden sind und die Proben "Li" die höchsten Cd-Anreicherungen aufweisen, während die meisten Ostseeproben keine Zn-Anreicherungen zeigen.

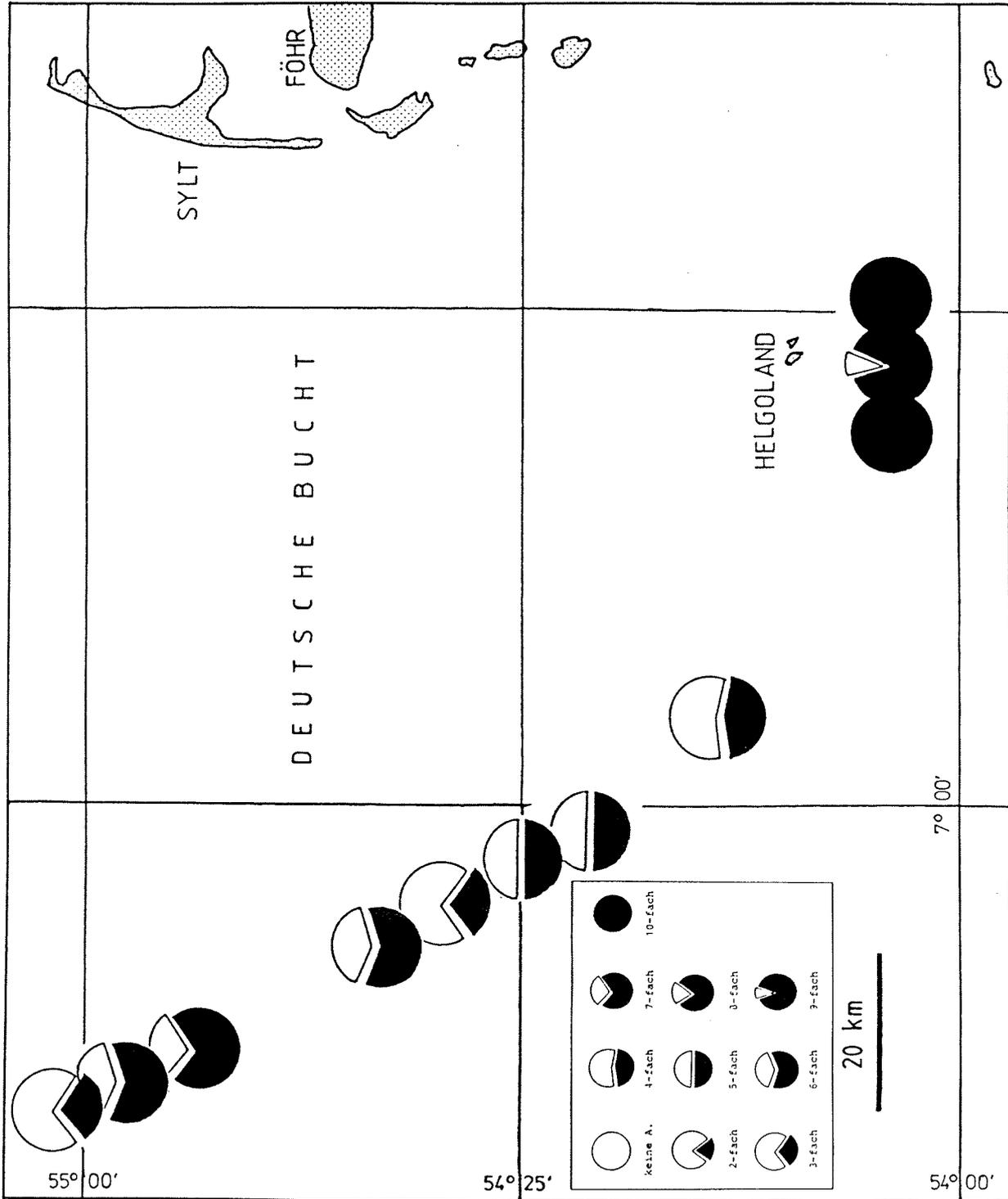


Abb. 31: Bleianreicherungen in den Nordseeproben

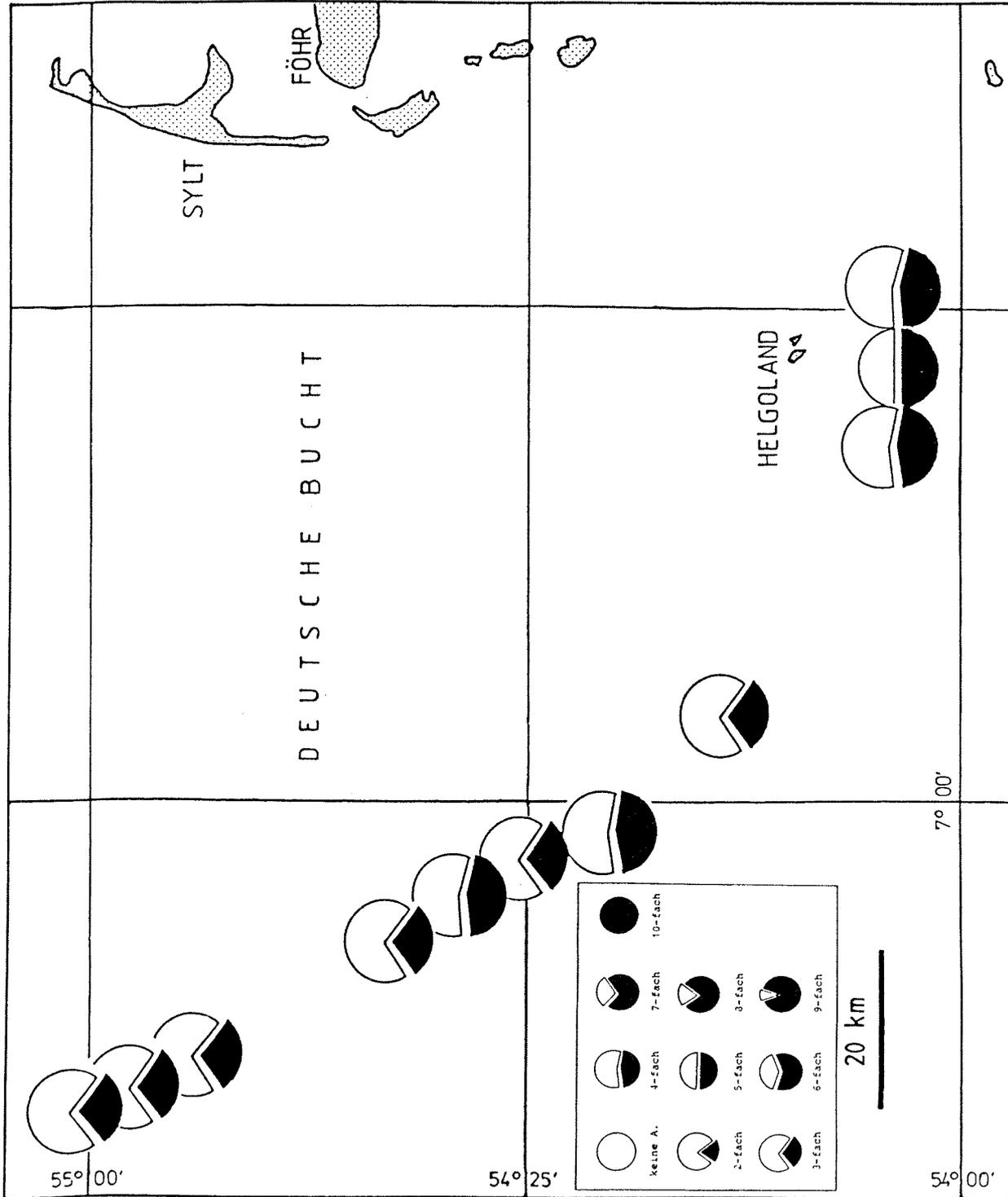


Abb. 32: Cadmianreicherungen in den Nordseeproben

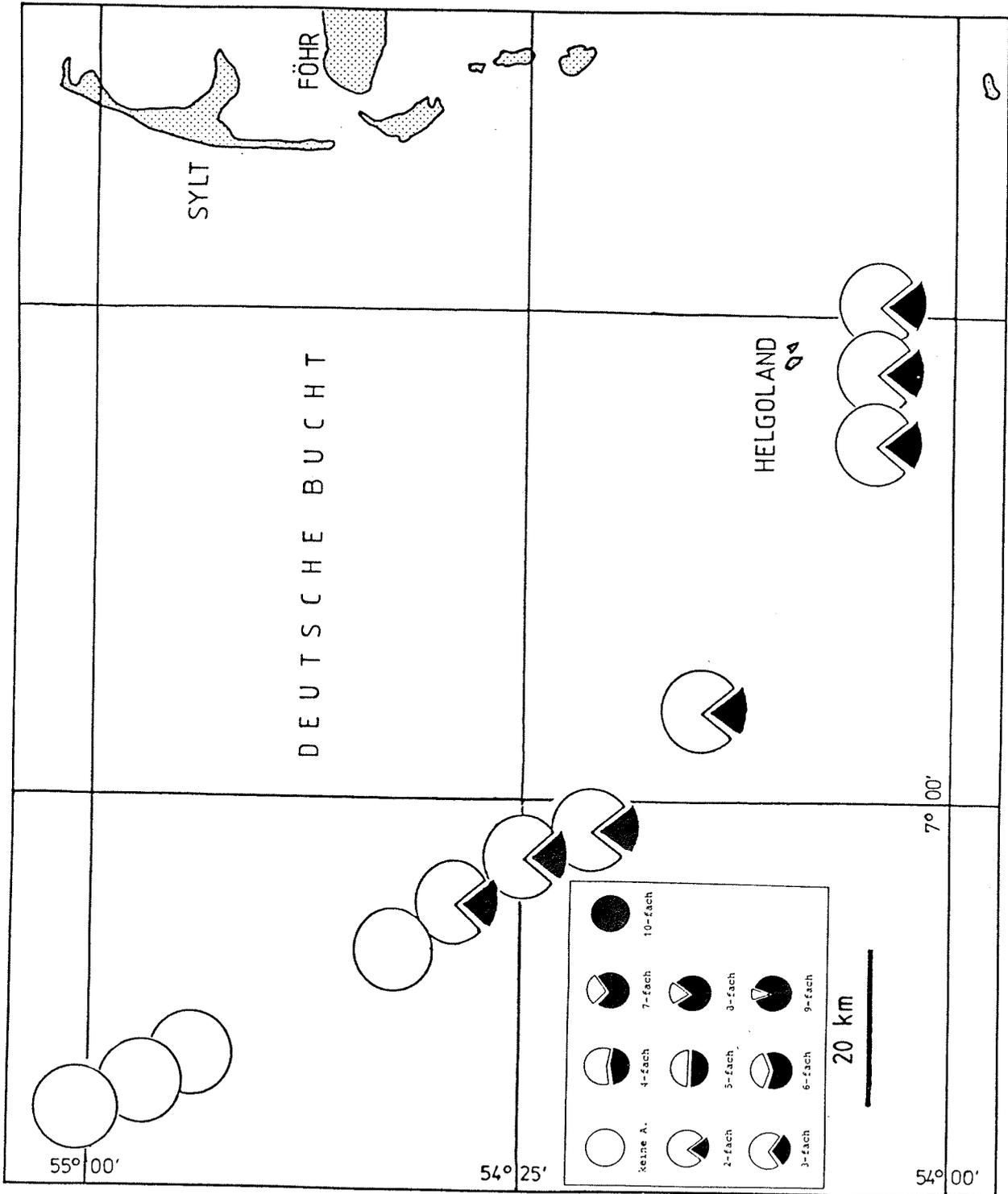


Abb. 33: Zinkanreicherungen in den Nordseeproben

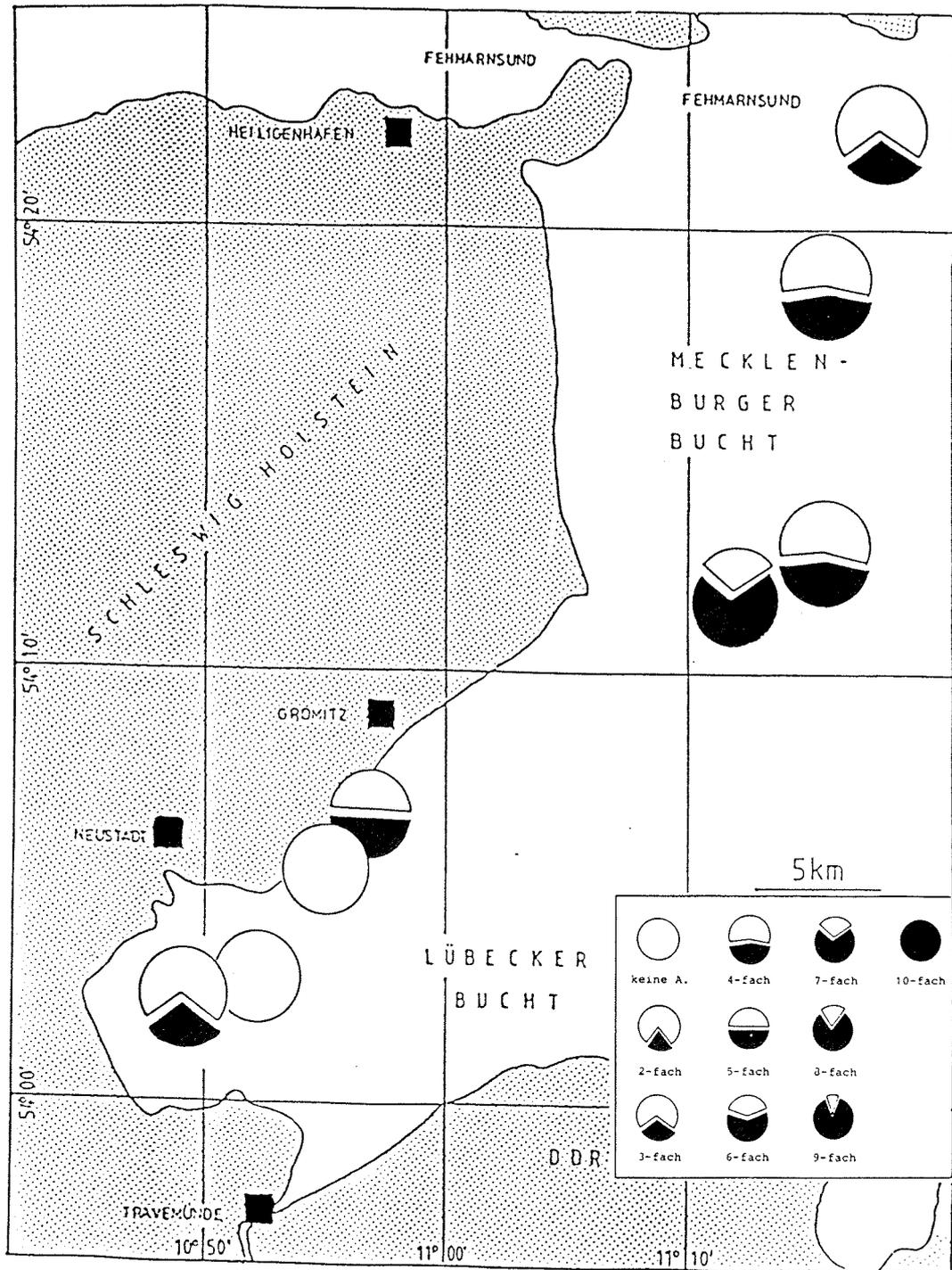


Abb. 34: Bleianreicherungen in den Ostseeproben

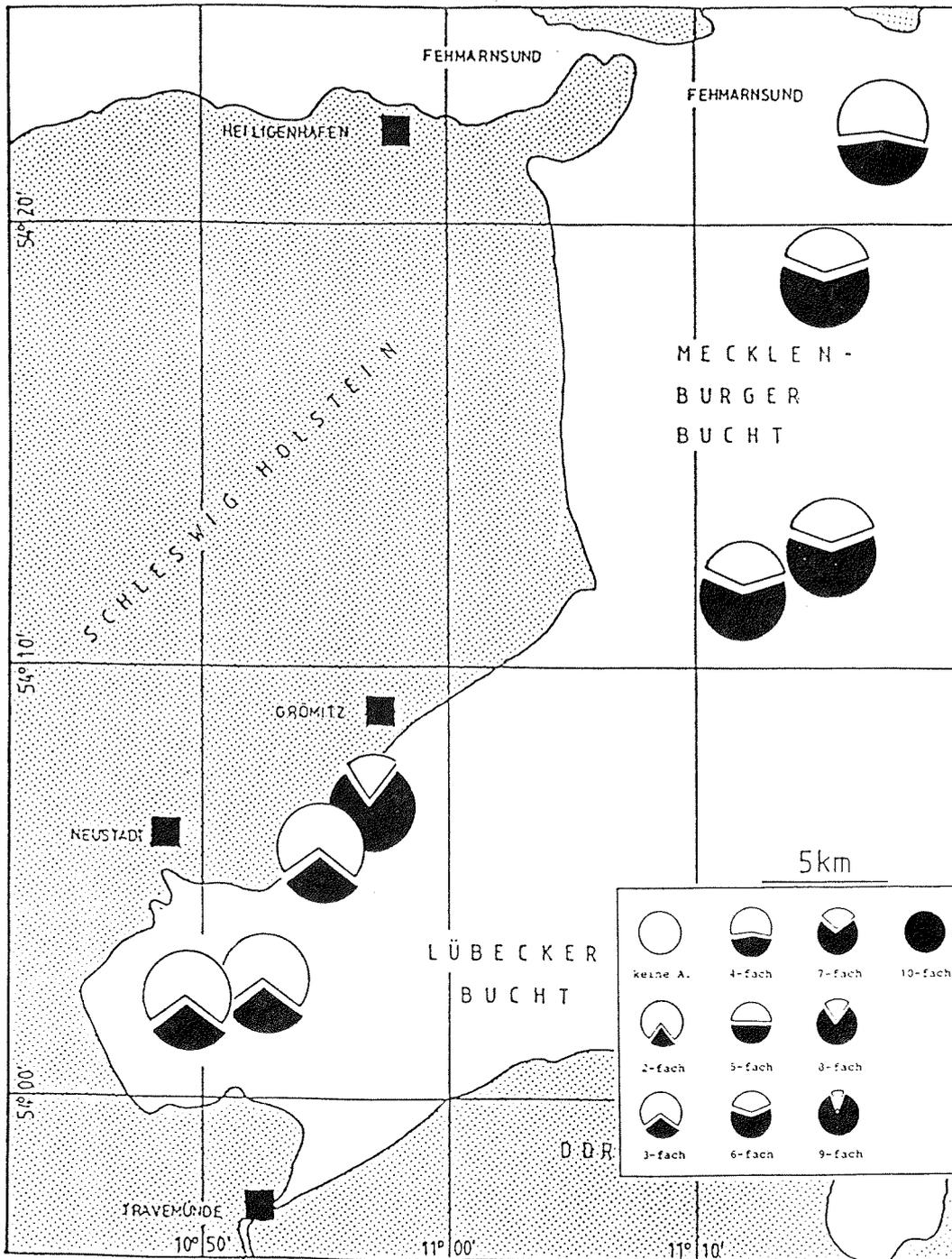


Abb. 35: Cadmianreicherungen in den Ostseeproben

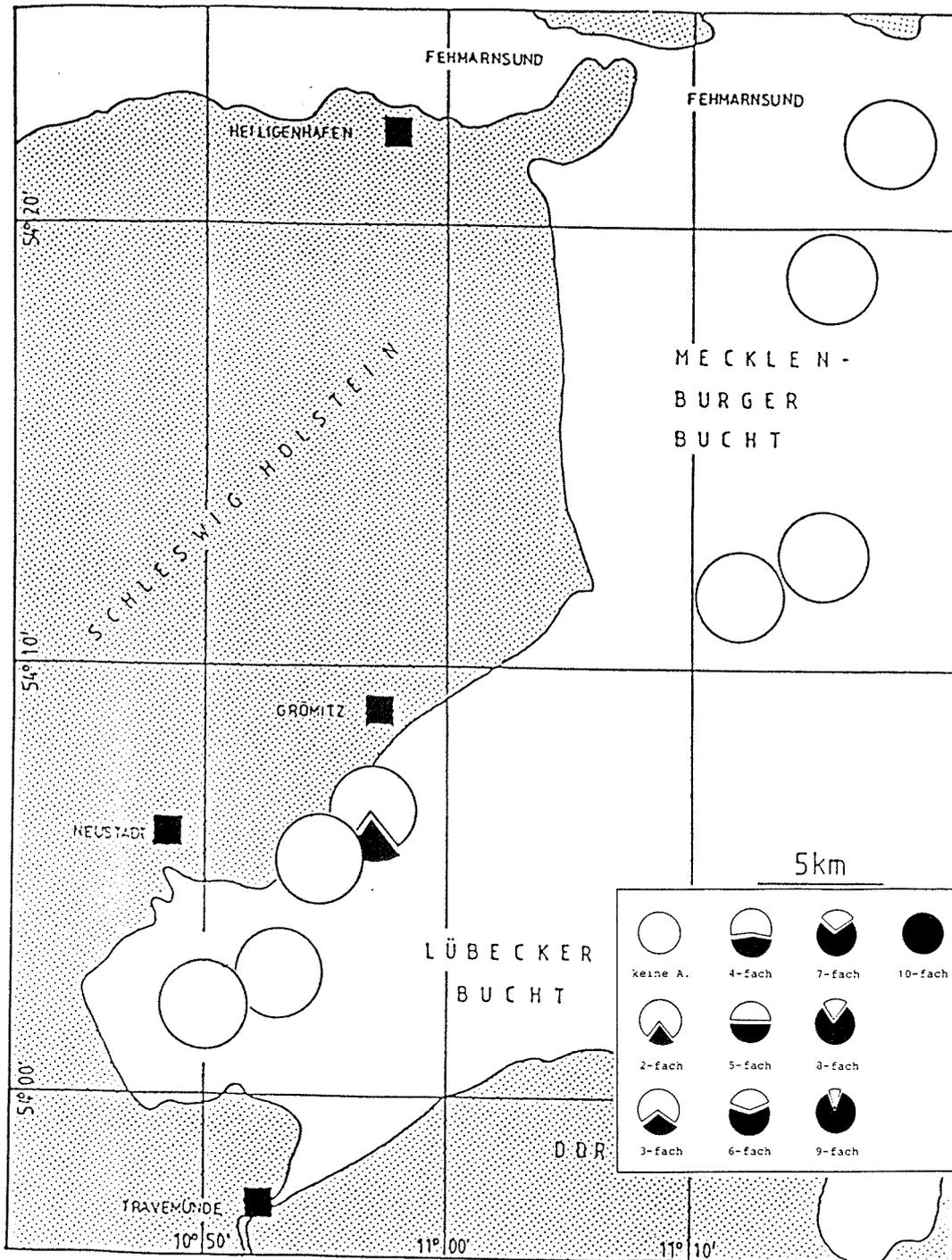


Abb. 36: Zinkanreicherungen in den Ostseeproben

### 5.3 Bindungsmöglichkeiten von Schwermetallen in Sedimenten

Von GIBBS (1973) wurde folgende Gliederung der Bindungsarten von Schwermetallen in natürlichen und umweltbeeinflussten Sedimenten vorgeschlagen:

1. Adsorptive Bindung
2. Kopräzipitation in Eisen- und Manganoxiden und -hydroxiden
3. Organische Bindungsarten
4. Mineralische Bindungsarten

Detaillierte Untersuchungen von FÖRSTNER & PATCHINEELAM (1976) führten zu der in Abbildung 37 gezeigten Einteilung der Schwermetallträgersubstanzen und der Charakterisierung der Bindungsmechanismen.

Dabei ist von wesentlicher Bedeutung, daß alle feinkörnigen Materialien mit großer Oberfläche, insbesondere Tonminerale, Fe/Mn-Oxide und organische Substanz in der Lage sind, Schwermetalle adsorptiv zu binden. Dabei ist zu unterscheiden: a) Physikosorption, die auf elektrostatischer Anziehung der Partikel (van der Waals-Kräfte) beruht, b) Chemisorption, bei der zwischen Ionen/Molekülen aus der Lösung und den Partikeloberflächen chemische Bindungen eingegangen werden.

Ein rein chemischer Prozeß ist der Ionenaustausch. Nach FÖRSTNER (1984) sind typische Stellen für den Ionenaustausch  $\text{SiOH-}$ ,  $\text{Al(OH)}_2^-$  und  $\text{AlOH-}$ -Gruppen bei den Tonmineralen, OH-Gruppen bei den Fe-Hydroxiden, Carboxyl- und phenolische Gruppen bei den organischen Substanzen. Sie sind negativ geladen, wobei diese Ladung durch eine äquivalente Anzahl an Kationen kompensiert wird, die ihrerseits ausgetauscht werden können. Dabei ergibt sich eine besonders hohe Haftfähigkeit der Schwermetallgruppen.

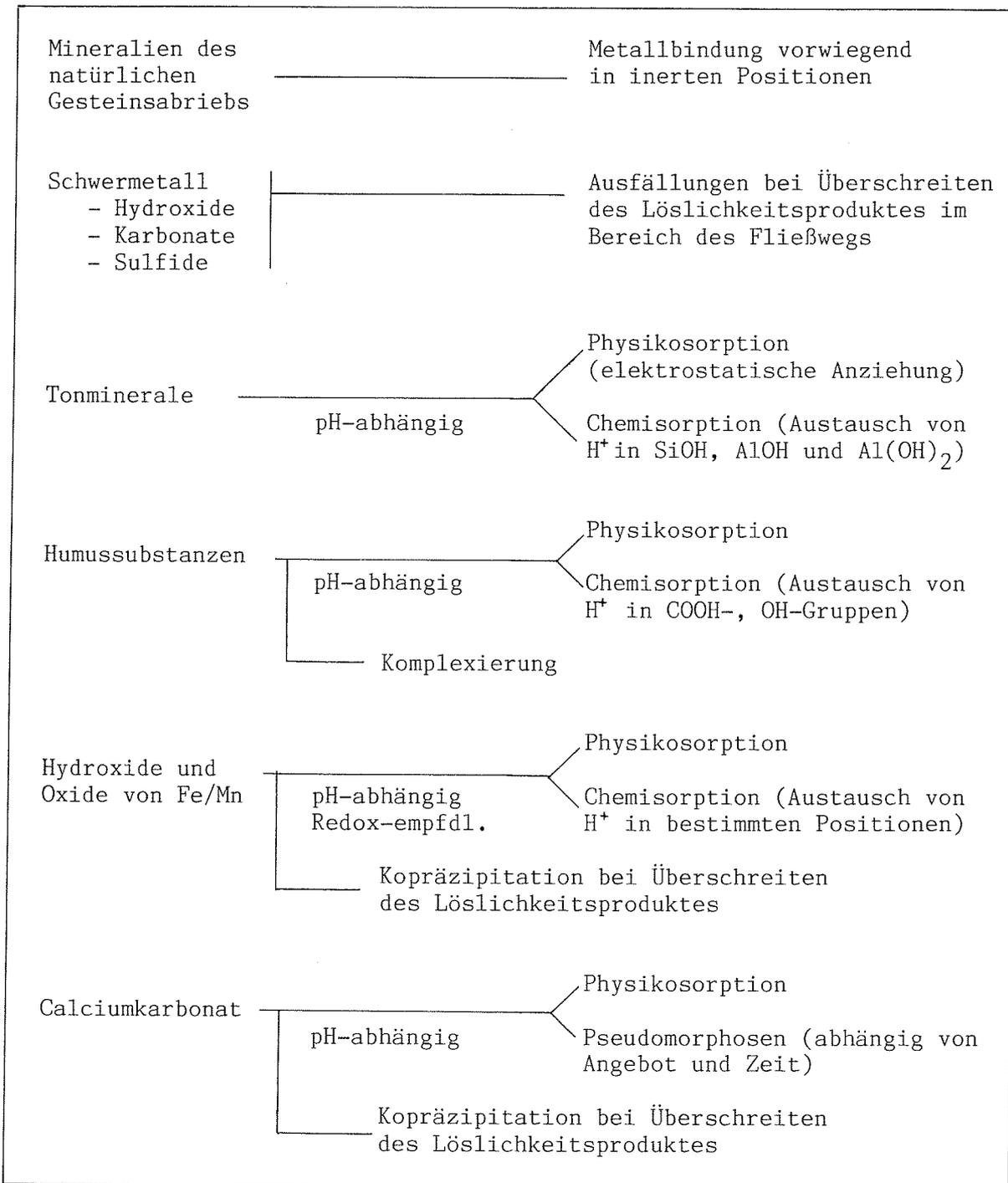


Abb. 37: Trägersubstanzen und Bindungsmechanismen von Schwermetallen nach FÖRSTNER & PATCHINEELAM (1976)

Die Sorptionsvorgänge in natürlichen Gewässern sind stark pH-abhängig. PARKS (1967) stellte das Konzept des Zero Point of Charge (ZPC) vor und fand, daß bei charakteristischen pH-Werten die Oberflächenladung verschiedener Materialien Null ist (Isoelektrischer Punkt). Oberhalb dieses pH-Wertes sind die Partikeloberflächen negativ geladen und damit zur Kationenanlagerung fähig. So beträgt z.B. der pH-ZPC von Fe-Hydroxiden 6,7, STUMM & MORGAN (1981), der Isoelektrische Punkt von Mn-Oxiden liegt bei pH 7,2.

Für Kaolinit und Montmorillonit wurden als pH-ZPC-Werte 4,6 und 2,5 angegeben, Calcitoberflächen besitzen ihre Null-Ladung bei pH-Werten von 8 bis 9,5. Mit den allgemeinen pH-Werten des Meerwassers von 7 bis 9,5 sind die negativen Ladungen der genannten Materialien verwirklicht.

Bei den Tonmineralen begünstigt weiterhin die Anzahl von Fehlstellen im Kristallgitter z.B. bei Kaoliniten das Sorptionsvermögen. Illite ermöglichen durch Substitution von  $Al^{3+}$  in oktaedrischen Schichten 2-wertigen Kationen lockere Bindungsplätze. Die aufweitbaren Schichten der Smektite wirken sich ebenfalls begünstigend auf die Sorption von Kationen aus.

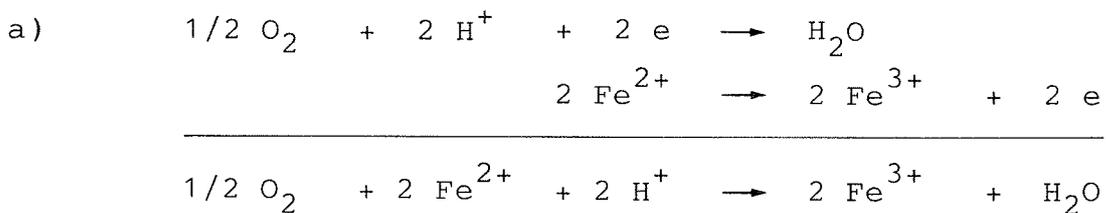
Die Gesamtheit der physikosorbierten Kationen wird als austauschbar bezeichnet. Entsprechend der spezifischen Oberflächen werden die Austauschkapazitäten von Tonmineralen in folgender Reihe beschrieben: Smektite > Illite > Chlorite > Kaolinite. Nach SUESS (1973) ist das Sorptionsvermögen von Calcit von der gleichen Größenordnung wie die des Kaolinit.

Wichtiger Mechanismus zur karbonatischen Schwermetallbindung ist die Kopräzipitation, besonders von Zn und Cd, wenn die Karbonatphase ein Hauptgemengteil im Mineralspektrum darstellt.

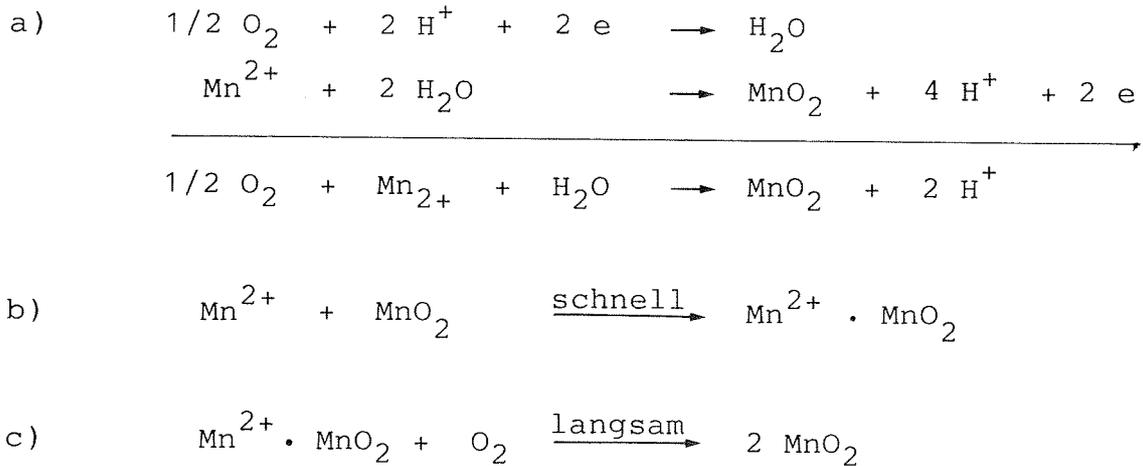
Eine generelle Folge der Sorptionskapazität der aufgeführten Schwermetallträgersubstanzen stellten GUY & CHAKRABARTI (1975) auf:  $\text{MnO}_2 > \text{Huminsäuren} > \text{Fe}(\text{OH})_3 > \text{Tonminerale}$ .

Den Oxiden und Hydroxiden von Mn und Fe fällt als Schwermetallträgersubstanzen eine besondere Bedeutung zu, da sie zum einen hervorragende Schwermetallfänger sind (Physikosorption und Kopräzipitation) und schon in geringen Konzentrationen kontrollierenden Einfluß auf die Schwermetallverteilungen ausüben können. Zum anderen sind ihre Stabilitätsfelder stark begrenzt, da sie sehr empfindlich auf Veränderungen der pH- und Redoxverhältnisse reagieren. Unter Normalbedingungen benötigt  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  bei einem pH von 7 ein Redoxpotential von  $E_0 \sim 200 \text{ mV}$ , um stabile Phase zu sein;  $\text{MnO}_2$  bei gleichem pH ein um das ca. dreifach stärkere Redoxpotential. Bei gleichbleibendem Redoxpotential wird  $\text{MnO}_2$  im sauren Bereich wesentlich schneller instabil als  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  das bei konstantem pH und abnehmendem Redoxpotential länger stabile Phase bleibt, WEDEPOHL (1978).

Unter gleichen pH-Bedingungen ist  $\text{Fe}^{2+}$  leichter oxidierbar als  $\text{Mn}^{2+}$ . Die Bildung von  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  im oxidischen wäßrigen Milieu erfolgt nach STUMM & MORGAN (1981) mit den Reaktionen:



Die Oxidation des gelösten  $Mn^{2+}$  zu  $Mn^{4+}$  erfolgt nach der ersten langsamen Reaktion autokatalytisch, FÖRSTNER & WITTMANN (1979), STUMM & MORGAN (1981):



Wichtige Zersetzungsprodukte organischer Substanzen sind Huminsäuren. Nach NISSENBAUM (1972) bilden die Huminsäuren den Hauptbestandteil organischen Materials in rezentmarinen Sedimenten. Huminsäuren besitzen unterschiedliche Molekulargewichte von  $<700$  bis  $>>200.000$ , wobei im marinen Milieu die höher molekularen Verbindungen überwiegen, PATCHINEELAM (1975). RASHID (1971) fand, daß von der Gesamtzahl der an Huminsäuren gebundenen Kationen ein Drittel in austauschbaren Positionen gebunden ist, zwei Drittel sind durch Komplexierung gebunden. Ebenso stellte er fest, daß Huminsäuren mit einem Molekulargewicht  $<700$  die 2- bis 6-fache Menge an Metallionen gegenüber denen mit einem Molekulargewicht  $>700$  komplexieren können.

Neben den angesprochen Bindungarten für Schwermetalle treten Wechselwirkungen zwischen den Trägersubstanzen auf. So existieren in geeignetem Milieu auf feinkörnigen Partikeln Fe/Mn-Oxidüberzüge, Tonminerale sind mit organischen Überzügen belegt und können tonorganische Komplexe bilden.

All diese Substanzen sind in der Lage, unter den beschriebenen Bedingungen Schwermetalle aus der Lösungsphase zu eliminieren. Einflußnehmend sind dabei ebenfalls die Konzentration der Trägersubstanzen sowie das Metallangebot in der Lösung. In diesem Zusammenhang stellten GUY & CHAKRABARTI (1975) fest, daß die Sorption von Pb, Cd und Zn im Falle von Tonmineralen nach der FREUNDLICHschen Isotherme verläuft, wogegen diese Metalle von Fe/Mn-Oxiden und Huminsäuren nach der LANGMUIR Isotherme sorbiert werden.

### 5.3.1 Chemische Klassifikation der Schwermetallträgersubstanzen

Aus der Bodenkunde sind bereits seit langem Extraktionsverfahren zur selektiven Erfassung von Schwermetallträgersubstanzen bekannt. Sie wurden von den unten genannten Autoren weiterentwickelt und für die Anwendung auf marine Sedimente optimiert. Dabei werden die Trägersubstanzen als chemische Fraktionen klassifiziert:

1. Austauschbare Fraktion
2. Karbonatische Fraktion
3. Leicht reduzierbare Fraktion (Mn-Oxide)
4. Schwer reduzierbare Fraktion (Fe-Oxide und -Hydroxide)
5. Oxidierbare Fraktion (organische Bestandteile und Sulfide)
6. Residualfraktion (lithogene Bindung)

Für diese Arbeit wurde eine entsprechende Extraktionsfolge aus der Literatur zusammengestellt und auf das Gesamtprobenmaterial der drei Arbeitsgebiete angewendet.

#### 1. Als austauschbare Fraktion gebundene Kationen: AK

Extraktion nach JACKSON (1958) mit 0,2 n  $\text{BaCl}_2$ -Triethanolamin bei pH 8,2 erfaßt die Gesamtheit der physikosorbierten Kationen aller Trägersubstanzen.

Methode: 4 g Probeneinwaage, 200 ml Extraktionsmittel,  
6 h Schüttelzeit bei Zimmertemperatur

2. An die karbonatische Fraktion gebundene Kationen: CFK

Extraktion mit 1 n Natriumacetat-Essigsäure-Puffer bei  
pH 5 nach TESSIER et al. (1979), löst alle Karbonate.

Methode: 2 g Probeneinwaage, 20 ml Extraktionsmittel,  
5 h Schüttelzeit bei Zimmertemperatur

3. An die leicht reduzierbare Fraktion gebundene Kationen:  
LRFK

Extraktion nach CHAO (1972) mit 0,1 n Hydroxylaminhydro-  
chlorit in 0,01 n  $\text{HNO}_3$  bei pH 2 durch Reduktion von  
 $\text{MnO}_2$ .

Methode: 2 g Probeneinwaage, 100 ml Extraktionsmittel,  
6 h Schüttelzeit bei Zimmertemperatur

4. An die schwer reduzierbare Fraktion gebundene Kationen:  
SRFK

Extraktion nach HOLMGREN (1967) mit einem Natriumcitrat-  
dithionit-Puffer bei pH 6,5; durch Reduktion von Fe-Oxi-  
den und -Hydroxiden. 2 g Na-Dithionit und 8 g Na-Citrat  
in 100 ml Aqua bidest. gelöst: Na-Dithionit reduziert  
 $\text{Fe}^{3+}$ , Na-Citrat komplexiert  $\text{Fe}^{2+}$ .

Methode: 2 g Probeneinwaage, 100 ml Extraktionsmittel,  
14 h Schüttelzeit bei Zimmertemperatur

5. An organische Substanzen und Sulfide gebundene Kationen:  
OFK

Nach ENGLER et al. (1974) Oxidation der Trägersubstanzen mit 30 %-igem  $H_2O_2$  (durch 0,1 n  $HNO_3$  auf pH 2 eingestellt) bei  $95^\circ C$ , Extraktion mit 1 n Ammoniumacetat.

Methode: Oxidation: 1 g Probeneinwaage + 5 ml  $H_2O_2$ , 5 h  
bei  $95^\circ C$

Extraktion: 100 ml Ammoniumacetat, Schüttelzeit  
24 h bei Zimmertemperatur

6. In der lithogenen Fraktion gebundene Kationen: LiFK

Totalaufschluß nach KÖSTER (1979), vgl. Kap. 5.1.

Die Extraktionslösungen wurden nach jedem Schritt mit einer SARTORIUS Vakuumfiltrationsanlage durch ein Membranfilter von der Probensubstanz abfiltriert, diese mit 50 ml Aqua bidest. nachgewaschen, getrocknet, erneut eingewogen und dem nächsten Extraktionsvorgang zugeführt.

Die Bestimmung der Schwermetalle erfolgte aus den Extraktionsfiltraten mit der AAS, die Eichung im Milieu des jeweiligen Extraktionsschrittes, um Matrixeffekten entgegenzuwirken.

### 5.3.2 Verteilung der Schwermetalle auf ihre Bindungs- partner

Die Analysenergebnisse der in Kap. 5.3.1 beschriebenen Untersuchungen sind für jede Probe der drei Arbeitsgebiete detailliert in den Tabellen 2 bis 35 des Anhangs aufgeführt.

Die ermittelten Konzentrationen der Schwermetalle in den Bindungsarten der einzelnen Proben wurden bezogen auf ihre Totalgehalte normiert und die so erhaltenen prozentualen Verteilungen der Kationen zur übersichtlichen Betrachtung der Verhältnisse in den Probennahmegebieten gemittelt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 23a bis 25b zusammengefaßt und in den Abbildungen 38 bis 40 synoptisch dargestellt.

Eisen liegt in den drei Untersuchungsgebieten gleichermaßen hauptsächlich lithogen gebunden vor, gefolgt von der oxidischen Bindung (SRFK).

Bei Mangan sind karbonatische (CFK), wie oxidische Bindungen (LRFK) besonders in Nordsee- und Antarktissedimenten anzutreffen, die Ostseeproben besitzen herabgesetzte Anteile dieser Bindungsarten. Mn ist in den Proben "A" weniger lithogen fixiert als in Nord- und Ostsee. Organisch-sulfidische Bindungsarten des Mn sind in den Ostseeproben häufiger.

Zink zeigt in den drei Arbeitsgebieten sehr starke Affinität zu den schwer reduzierbaren Fraktionen (SRFK: Fe-Oxide und -Hydroxide). Organisch-sulfidische Bindungen sind wie bei Mn in den Ostseeproben häufiger. Während die lithogenen Bindungen in Ostsee- und Antarktissedimenten dominieren, führen die Nordseeproben stark herabgesetzte Vorkommen von Zn in dieser Bindungsart. In diesen Proben besitzt Zn durchweg höhere Anteile an den übrigen Bindungsarten und wird besonders auffällig durch die Karbonatphasen (CFK) fi-

xiert. Die Verteilung von Zn auf die Bindungsarten der Proben "P" mit minimalen Anteilen der lithogenen Bindung ist als Indiz für eine besondere anthropogene Zn-Beeinflussung der Nordseesedimente zu sehen. Dies wird durch die vorangegangenen Untersuchungen mit häufiger anzutreffenden Zn-Anreicherungen in den Nordseepelitfraktionen (Abb. 33) gegenüber denen der Ostsee (Abb. 36) unterstrichen.

Blei ist in den drei Arbeitsgebieten hauptsächlich auf inerten Positionen der Mineralgitter fixiert (LiFK), wobei die lithogene Bindungsart der Antarktissedimente stärker auftritt. Die Ostseesedimente führen im Vergleich zu den Totalgehalten mehr Blei in organisch-sulfidischer Bindung (OFK) als die Proben "P" und "A" und fallen besonders durch deutlich höhere Anteile von Pb in austauschbaren Positionen (AK) auf.

Cadmium ist in lithogener und karbonatischer Bindung in den Antarktissedimenten dominierend anzutreffen. Die Beteiligung an den Bindungsarten LRFK, SRFK und OFK tritt in den Ostseeproben gegenüber den anderen Gebieten zurück. Besondere Bedeutung fällt der austauschbaren Bindungsart des Cd zu. Während in den Antarktisproben 23 % des gesamten Cd austauschbar gebunden sind, besetzt Cd in den Nordseesedimenten zu 52,0 %, in den Ostseesedimenten sogar zu 74,9 % austauschbare Positionen, wodurch der starke, anthropogene Cd-Einfluß auf diese Gewässer deutlich wird.

An dieser Stelle soll auf das von PEARSON (1963) aufgestellte Konzept der "harten und weichen Säuren und Basen" (HSAB) hingewiesen werden. Demnach sind "weiche" Basen durch eine geringere Elektronegativität und hohe Polarisierbarkeit, "harte" Basen durch hohe Elektronegativität und geringe Polarisierbarkeit gekennzeichnet. Harte Säuren sind Elektronenakzeptoren, die bevorzugt mit harten Basen stabile Verbindungen eingehen, weiche Säuren bilden bevorzugt mit weichen Basen stabile Verbindungen. Weiche Säuren/

harte Basen sowie harte Säuren/weiche Basen verbinden sich nur instabil. Nach dem HSAB-Konzept reagiert Cd als eine weiche Säure, Pb besitzt wie Zn und Fe intermediären Charakter, Mn reagiert als harte Base. Da Cd zum überwiegenden Teil in Nord- und Ostseeproben austauschbare Positionen besetzt, die die schwächste Bindungsart bedeuten, muß angenommen werden, daß die Cd-Bindungspartner harte Basen sind, mit denen Verbindungen nur schwach sein können. Harte Basen sind z.B.  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$ . Mit weichen Basen dagegen, wie Sulfhydryl-( $\text{SH}^-$ )-Gruppen organischer Moleküle, geht Cd stärkere Verbindungen ein.

Pb zeigt wegen seines intermediären Charakters wie Zn ein anderes Bindungsverhalten als Cd. Wie oben beschrieben, kommt es in wesentlich geringeren Konzentrationen in austauschbaren Positionen vor und kann recht starke Verbindungen mit harten und weichen Basen eingehen. Aus diesem Verhalten lassen sich die besonderen Affinitäten zu Feststoffen (bei geringen Pb-Konzentrationen in Eichlösungen störend !) ableiten.

Werden nun die Verteilungen der Schwermetalle auf die untersuchten Bindungsarten zu den Daten der antarktischen Sedimente in Beziehung gesetzt, lassen sich Anreicherungs-faktoren der Schwermetalle in den Bindungsarten der Nord- und Ostseeproben aufstellen, siehe Tab. 26. Da die lithogen gebundenen Schwermetallanteile keinen Aufschluß über anthropogene Einflüsse geben können, sind sie im folgenden nicht aufgeführt.

Pb und Cd sind in den austauschbaren Fraktionen der Ostseesedimente mit AF-Werten von 3,3 am stärksten angereichert, gefolgt von Cd mit 2,3-facher Anreicherung in den Nordseeproben. Für Zn errechnet sich in der karbonatischen Fraktion der Proben "P" der extremste Anreicherungs-faktor von 84,5.

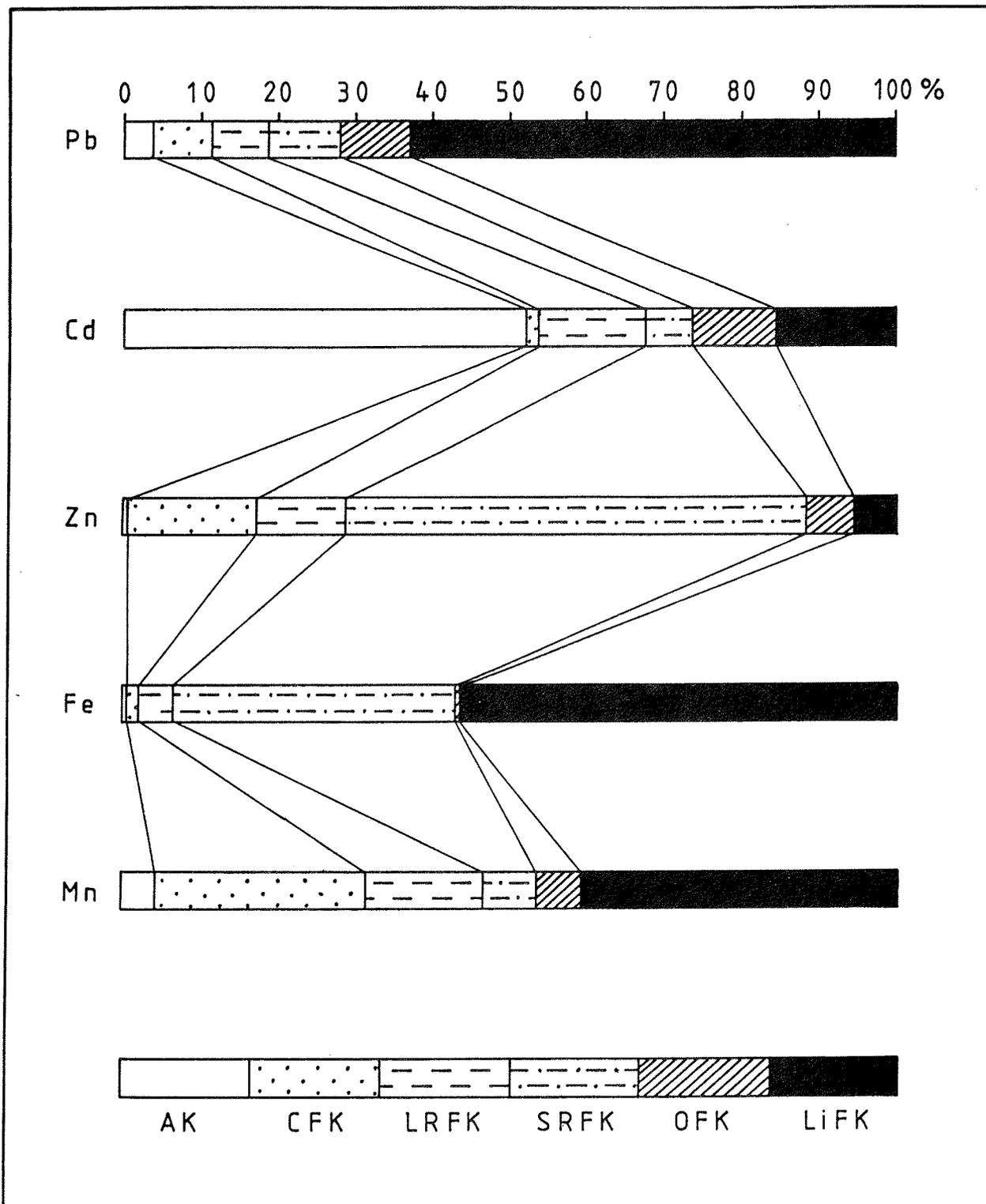


Abb. 38: Mittlere Verteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Proben "P" - Nordsee

	Pb (%)	Cd (%)	Zn (%)	Fe (%)	Mn (%)
AK	3,4	52,0	0,1	0,1	4,1
CFK	7,5	1,5	16,9	1,5	26,9
LRFK	7,2	14,2	10,2	4,5	10,5
SRFK	9,2	5,5	59,7	36,2	6,8
OFK	9,4	11,9	5,1	0,1	5,6
LiFK	63,3	17,2	4,3	57,6	44,6

Tab. 23a: Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Nordseeproben "P"

AK	:	Cd	>	Mn	>	Pb	>	Zn	=	Fe
CFK	:	Mn	>	Zn	>	Pb	>	Cd	=	Fe
LRFK	:	Cd	>	Mn	>	Zn	>	Pb	>	Fe
SRFK	:	Zn	>	Fe	>	Pb	>	Mn	>	Cd
OFK	:	Cd	>	Pb	>	Mn	>	Zn	>	Fe
LiFK	:	Pb	>	Fe	>	Mn	>	Cd	>	Zn

Tab. 23b: Konzentrationsgefälle der Schwermetalle in den Bindungsarten der Nordseeproben "P"

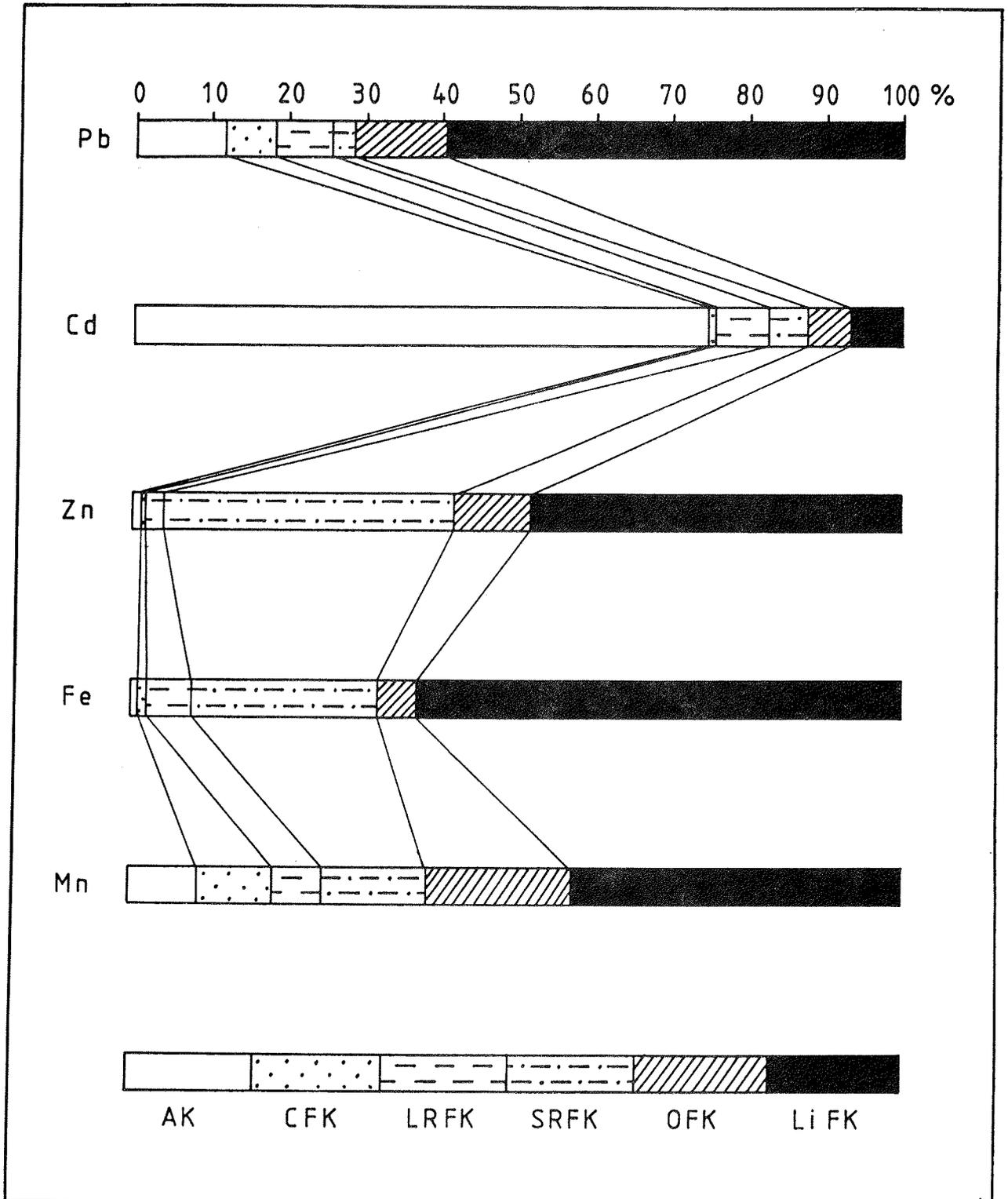


Abb. 39: Mittlere Verteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Proben "Li" - Ostsee

	Pb (%)	Cd (%)	Zn (%)	Fe (%)	Mn (%)
AK	14,5	74,9	1,2	1,0	9,0
CFK	6,4	0,7	0,1	0,6	9,2
LRFK	7,3	6,4	1,7	5,6	6,1
SRFK	2,2	5,9	37,5	23,9	13,4
OFK	10,8	8,9	9,7	4,5	19,0
LiFK	59,1	9,1	49,9	64,4	43,9

Tab. 24a: Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Ostseeproben "Li"

AK	:	Cd	>	Pb	>	Zn	>	Mn	>	Fe
CFK	:	Mn	>	Pb	>	Cd	>	Fe	>	Zn
LRFK	:	Pb	>	Cd	>	Mn	>	Fe	>	Zn
SRFK	:	Zn	>	Fe	>	Mn	>	Cd	>	Pb
OFK	:	Mn	>	Pb	>	Zn	>	Cd	>	Fe
LiFK	:	Fe	>	Pb	>	Zn	>	Mn	>	Cd

Tab. 24b: Konzentrationsgefälle der Schwermetalle in den Bindungsarten der Ostseeproben "Li"

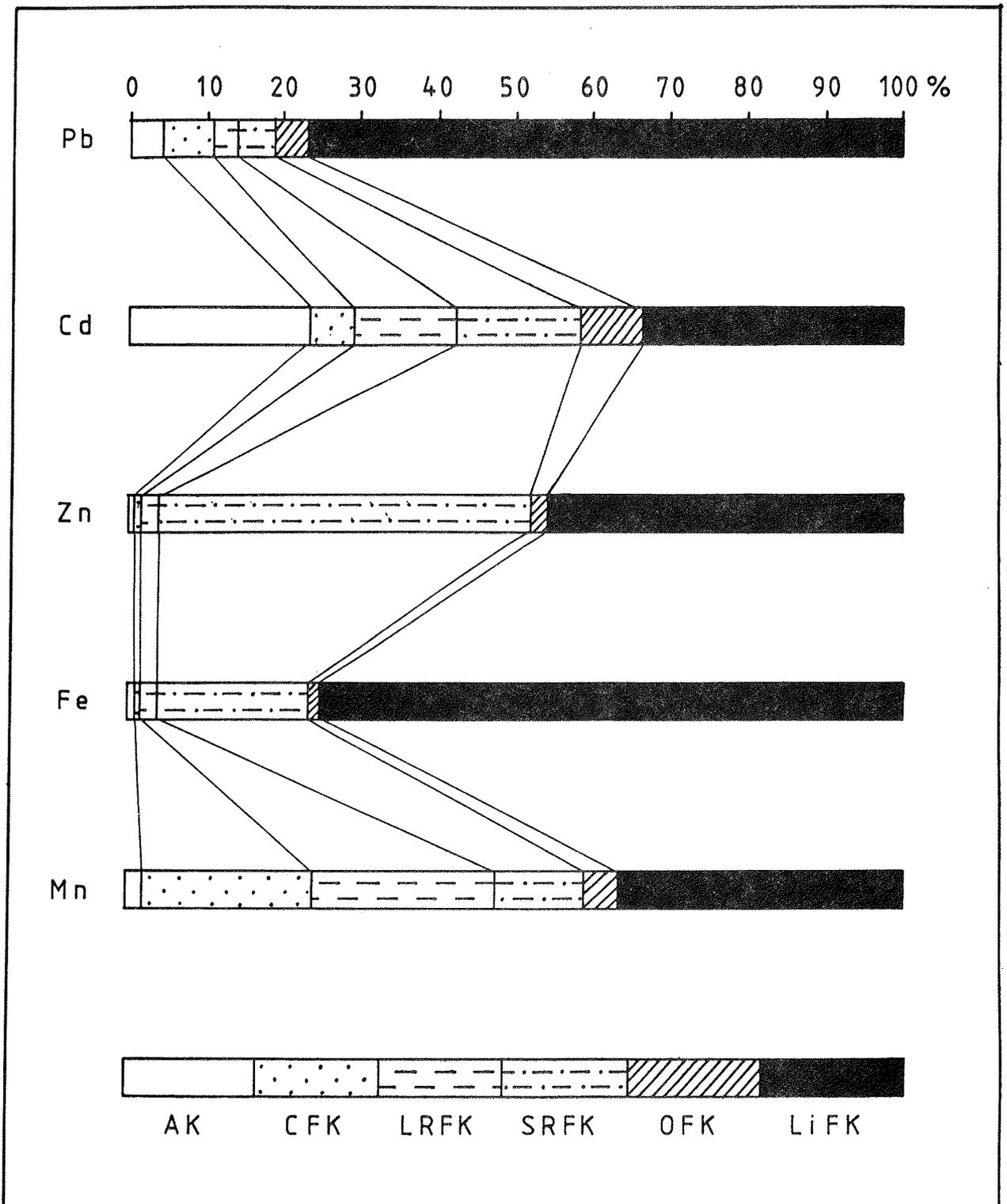


Abb. 40: Mittlere Verteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Proben "A" - Weddell-See

	Pb (%)	Cd (%)	Zn (%)	Fe (%)	Mn (%)
AK	4,4	23,0	0,7	0,9	2,3
CFK	6,4	5,7	0,2	0,3	21,9
LRFK	3,1	13,2	2,4	2,4	23,4
SRFK	4,9	17,3	48,3	19,4	11,2
OFK	4,0	9,9	2,2	1,6	4,2
LiFK	77,4	34,5	45,9	75,7	37,1

Tab. 25a: Durchschnittliche prozentuale Verteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Antarktisproben "A"

AK	:	Cd	>	Pb	>	Mn	>	Fe	>	Zn
CFK	:	Mn	>	Pb	>	Cd	>	Fe	>	Zn
LRFK	:	Mn	>	Cd	>	Pb	>	Fe	=	Zn
SRFK	:	Zn	>	Fe	>	Cd	>	Mn	>	Pb
OFK	:	Cd	>	Mn	>	Pb	>	Zn	>	Fe
LiFK	:	Pb	>	Fe	>	Zn	>	Mn	>	Cd

Tab. 25b: Konzentrationsgefälle der Schwermetalle in den Bindungsarten der Antarktisproben "A"

Bindungsart	AK	CFK	LRFK	SRFK	OFK
Pb (AF) "P"	-	1,2	2,3	1,9	2,4
(AF) "Li"	3,3	-	2,4	-	2,7
Cd (AF) "P"	2,3	-	-	-	1,2
(AF) "Li"	3,3	-	-	-	-
Zn (AF) "P"	-	84,5	4,3	1,2	2,3
(AF) "Li"	1,7	-	-	-	4,4
Fe (AF) "P"	-	5,0	1,9	1,9	-
(AF) "Li"	-	2,0	2,3	1,2	2,8
Mn (AF) "P"	1,9	1,2	-	-	1,3
(AF) "Li"	4,1	-	-	1,2	4,5

Tab. 26: Anreicherungs-faktoren (AF) der Schwermetalle in den Bindungsarten der Nord- und Ostseeproben, bezogen auf ihre prozentuale Verteilung

Bei der Benutzung der AF-Werte in Tabelle 26 muß berücksichtigt werden, daß sich die Daten nur auf die Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten beziehen, dabei aber die Konzentrationen der Trägersubstanzen außer acht gelassen werden.

#### 5.4 Beurteilung des chemischen Milieus der Probennahmegebiete

Ausgehend von den unterschiedlichen Stabilitätsbereichen der Fe-Hydroxide und Mn-Oxide bei veränderten Redox- und pH-Bedingungen des Milieus (s. Kap. 5.3), soll das Verhalten dieser Phasen näher untersucht werden.

Dazu wird vorausgesetzt, daß nach RILEY & CHESTER (1976) oxidiertes Fe und Mn in marinem Milieu als  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  sowie als  $\text{MnO}_2$  vorliegen. Mit den Extraktionsschritten 3 - leicht reduzierbare Fraktion - und 4 - schwer reduzierbare Fraktion - aus Kap. 5.3.1 sind die Konzentrationen von  $\text{Fe}^{3+}$  und  $\text{Mn}^{4+}$  in den einzelnen Proben erfaßt worden und können mit den jeweiligen Gesamtgehalten in Beziehung gesetzt werden.

Mit den vorhandenen Daten (aus den Tab. 2 bis 35 des Anhangs) wurden Diagramme entwickelt, in denen für jede Probe eines Arbeitsgebietes dem Quotienten oxidiertes Fe/Fe gesamt sowie oxidiertes Mn/Mn gesamt der zugehörige Quotient Fe gesamt/Mn gesamt gegenübergestellt wird (Abb. 41).

Dabei ist die Annahme, daß sich bei unterschiedlichen Milieubedingungen die oxidierten Phasen von Fe und Mn zu ihren Gesamtgehalten im wesentlichen gleichläufig verhalten, die Voraussetzung für den Ansatz linearer Regressionen.

Die daraus ermittelten Geraden für Fe und Mn zeigen trotz der geringen Probenanzahl und der Inhomogenitäten in jedem Gebiet regionalspezifische Trends.

Das obere Diagramm der Abbildung 41 weist die Nordseeproben mit Ausnahme der extern liegenden Probe P 6 (südöstlich Helgolands) als relativ homogen aus. Der Einfluß der Metallfracht aus den Flüssen wird gegenüber den anderen Gebieten durch höhere Quotienten Fe gesamt/Mn gesamt doku-

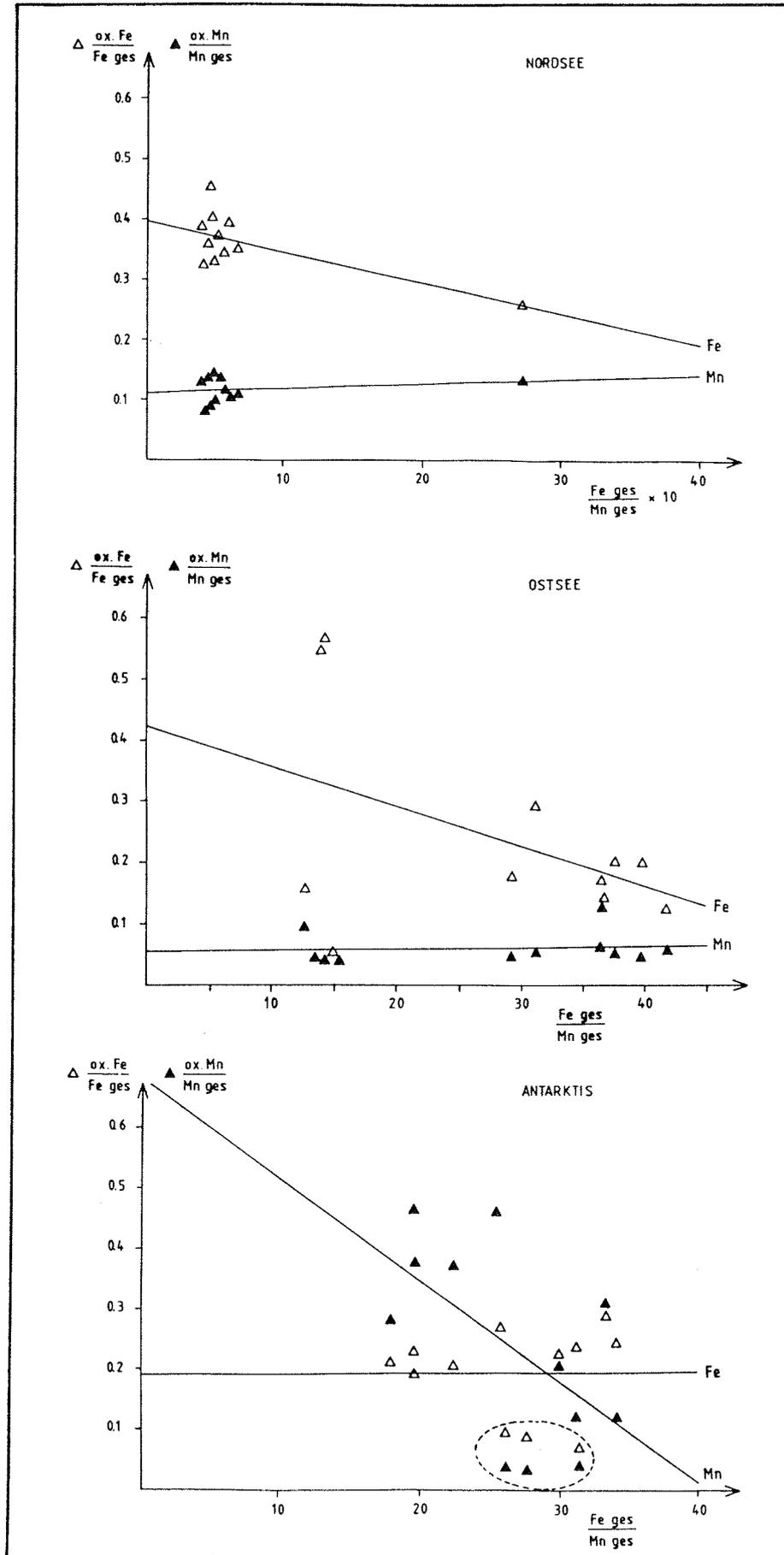


Abb. 41: Chemismus von Eisen und Mangan in den Proben "P", "Li" und "A"

mentiert. Der Verlauf der Geraden für Fe kann folgendermaßen interpretiert werden: mit zunehmendem Fe gesamt bleibt die Menge an oxidiertem Fe entweder konstant oder nimmt geringfügig ab. Bei gegenüber Fe gesamt weniger zunehmendem Mn gesamt ist der geringe Anstieg der Mn-Geraden nur erklärbar, wenn auch mehr oxidiertes Mn gebildet wird. Da dieser Eindruck entscheidend durch die Probe P 6 geprägt wird, muß berücksichtigt werden, daß sie unter besonderem Einfluß des Elbwasserkörpers steht (Kap. 4.1.2), was ebenfalls durch die 2- und 3- fach höheren Totalgehalte an Fe und Mn unterstrichen wird. Es ist anzunehmen, daß dem Probengebiet der P 6 besonders Fe in lithogener Bindung zugeführt wird, während Mn hauptsächlich in gelöster Form vorliegt. So wird bei gleichem Oxidationsmilieu wie in den übrigen Nordseeproben der Quotient oxidiertes Fe/Fe gesamt durch die Vormacht des lithogen gebundenen Fe herabgesetzt, während das verstärkte Angebot an gelöstem Mn unter den oxidierenden Verhältnissen der P 6 auch höhere Gehalte an  $MnO_2$  hervorbringt und damit den Quotienten oxidiertes Mn/Mn gesamt geringfügig hebt. Insgesamt herrschen in den Nordseesedimenten oxidierende Bedingungen, die die Existenz von  $Fe(OH)_3$  und  $MnO_2$  zulassen. Da Fe leichter oxidierbar ist als Mn, liegt die Fe-Gerade über den Mn-Geraden.

Ohne Beachtung der Probe P 6 besitzen die Nordseeproben relative "Oxidationsniveaus" von durchschnittlich 0,36 für Fe und 0,12 für Mn.

Die in Kap. 4.2.2 beschriebenen Gehalte an Pyrit lassen auf alkalische pH-Verhältnisse schließen. Zusätzlich wird seine Bildung nach DEGENS (1968) durch reduzierende "Mikromilieus" in allgemein oxidierender Umgebung begünstigt.

Im mittleren Diagramm der Abbildung 41 wird die inhomogene Verteilung der Quotienten oxidiertes Fe/Fe gesamt der Ostseesedimente deutlich. Der Verlauf der Fe-Geraden zeigt, daß zunehmendes Fe gesamt nicht eine Erhöhung der oxidier-

ten Fe-Anteile nach sich zieht. Der fast abszissenparallele Verlauf der Mn-Geraden besagt, daß sich bei zu- oder abnehmendem Mn.gesamt oxidiertes Mn gleichermaßen verhält, was recht konstante Oxidationsverhältnisse für Mn ausmacht. Gegenüber den Nordseeproben besitzen die einzelnen Ostseeproben stark schwankende "Oxidationsniveaus" für Fe, der Mittelwert liegt mit 0,24 unterhalb dem der Nordseeproben.

Während sich schon beim leicht oxidierbaren Fe von Nord- zu Ostseesedimenten im Durchschnitt deutliche Unterschiede abzeichnen, liegt das "Oxidationsniveau" der Proben "Li" für das schwerer oxidierbare Mn mit durchschnittlich 0,06 sogar um die Hälfte tiefer.

Da in jeder Ostseeprobe oxidiertes Mn nachgewiesen wurde, kann nicht allgemein von reduzierenden Bedingungen gesprochen werden. Das verstärkte Auftreten von Pyrit deutet deshalb auf eine häufigere Ausbildung reduzierender "Mikromilieu" hin und läßt alkalische pH-Werte annehmen.

Im unteren Diagramm der Abbildung 41 streuen sowohl die Fe- als auch die Mn-Quotienten der Antarktisproben stark. Die Fe- und Mn-Ausgleichsgeraden zeigen vollkommen unterschiedliche Trends zu Nord- und Ostsee an. Die abszissenparallele Fe-Gerade dokumentiert ein relativ konstantes Fe-Oxidationsmilieu, bei steigendem Fe gesamt nimmt gleichermaßen oxidiertes Fe zu. Da die Antarktissedimente insgesamt weniger Fe führen, erscheint das "Oxidationsniveau" von durchschnittlich 0,22 geringer als in Nord- und Ostsee. Dies ist jedoch materialbedingt, denn das "Oxidationsniveau" des schwerer oxidierbaren Mn überschreitet die Durchschnittswerte der Nordseesedimente maximal um das 4-fache. Im Falle der maximalen "Oxidationsniveaus" (A 5, A 6) liegen knapp 50 % des Mn gesamt als  $MnO_2$  vor. Der Grund für die  $MnO_2$ -Anreicherungen in einigen der Antarktissedimente ist in der diagenetischen Mobilisation des Mn zu sehen. In tieferen Sedimentschichten herrschende negative Redoxpotentiale

bewirken bei gleichzeitigem Mn-Angebot dessen Reduktion zu  $Mn^{2+}$ , das in die obersten Sedimentzentimeter migriert und dort unter  $O_2$ -Einfluß als  $MnO_2$  ausfällt.

Neben den sehr hohen Anreicherungen an  $MnO_2$  existieren aber auch Bereiche, in denen nur ca. 5 % des Mn.gesamt in oxidiert Form vorliegen. Dies trifft für die Proben A 10, A 11 und A 12 zu (umstricheltes Feld). Gleichzeitig sind hier sehr niedrige Quotienten oxidiertes Fe/Fe gesamt anzutreffen. Zusammengenommen weist dies auf ungünstige Stabilitätsbedingungen für  $MnO_2$  und  $Fe(OH)_3$  hin.

Da die Wassertemperaturen im Probennahmegebiet keine wesentlichen Schwankungen zeigen (Tab. 1), wird vorausgesetzt, daß die  $CO_2$ - und  $O_2$ -Sättigungen des Weddell-Meerwassers im wesentlichen homogen sind. Wenn aber im genannten Probenbereich ebenfalls stark oxidierende Verhältnisse vorliegen, können die Stabilitätsbereiche von  $Fe(OH)_3$  und  $MnO_2$  nur von schwach sauren pH-Werten negativ beeinflusst werden. Dafür spricht, daß in den drei Proben bei gegebenem positiven Redoxpotential der Quotient oxidiertes Fe/Fe gesamt größer als oxidiertes Mn/Mn gesamt ist, denn:  $Fe(O)_3$  ist bei pH-Senkungen stabiler als  $MnO_2$ . Ein weiteres Indiz für schwach saure pH-Werte in diesem Bereich ist das gänzliche Fehlen von Pyrit in den Proben A 10, A 11 und A 12.

Ausgehend von den beschriebenen Beobachtungen kann eine Grobansprache der chemischen Verhältnisse in den Untersuchungsgebieten relativ zueinander vorgenommen werden:

Nordsee schwach alkalisch - mittelmäßig oxidierend  
(homogen)

Ostsee schwach alkalisch - schwach oxidierend  
(homogen)

Antarktis schwach alkalisch - stark oxidierend  
schwach sauer - stark oxidierend  
(inhomogen)

#### 5.4.1 Verhalten der Schwermetalle zu ihren Trägersubstanzen

Für die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen sind folgende Bedingungen als erfüllt vorauszusetzen:

1. Keine Beeinflussung des Stoffbestands der Proben durch:
  - a) Probennahme,
  - b) Konservierung und Lagerung,
  - c) Aufbereitung.
2. Repräsentanz der Teilproben
3. Effektive Selektivität der angewandten Extraktionssequenz

Unter diesen Prämissen sind für die einzelnen Bindungsarten die zugehörigen Bindungspartner definiert worden. Im Falle der austauschbaren Fraktion (AK) konnte dies nur indirekt geschehen, da diese Bindungsart die physikosorbierten Schwermetalle aller Trägersubstanzen zusammenfaßt. Da die Trägersubstanzen besonders in den Kornfraktionen  $< 2 \mu\text{m}$  angereichert sind, wurde diese allgemein als Bindungspartner der in AK gebundenen Schwermetallgehalte angesprochen.

Insgesamt wurden folgende quantitative Zuordnungen von Bindungspartnern und Schwermetallen vorgenommen:

Konzentration Me AK	-	Konzentration $< 2 \mu\text{m}$
Konzentration Me CFK	-	Konzentration $\text{CO}_3^{2-}$
Konzentration Me LRFK	-	Konzentration Mn LRFK
Konzentration Me SRFK	-	Konzentration Fe SRFK
Konzentration Me OFK	-	Konzentration $C_{\text{org}} + S_{\text{ges}}$

Die Konzentrationen der jeweiligen Paarungen sind für jedes Element und alle Proben in den Tabellen 2 bis 35 des Anhangs und unter den Kap. 4.1.2 sowie 4.3.2 aufgeführt. Die synoptischen Darstellungen der Ergebnisse sind für Nord- und Ostseesedimente in den Abbildungen 1a bis 2e des Anhangs, für die Antarktisproben in den Abbildungen 42a bis 42e dieses Abschnittes dokumentiert.

Es wird sofort deutlich, daß sich die Schwermetalle zu ihren Bindungspartnern von Probe zu Probe sehr variabel verhalten. Probenspezifisch führen relativ hohe Konzentrationen an Trägersubstanzen niedrige Schwermetallgehalte. Ebenso sind bei sehr geringen Trägersubstanzvorkommen relativ hohe Schwermetallanteile anzutreffen und verschiedenste Übergangszustände zwischen den beiden Extremen zu beobachten.

Einflußnehmend auf die Sorption von Schwermetallen wirken sich aus:

1. die Konzentration der Trägersubstanzen in situ,
2. das Metallangebot im Meerwasser,
3. das Metallangebot durch suspendierte Trägersubstanzen und
4. das in situ herrschende chemische Milieu der Probennahmestationen.

Letzteres ist für die einzelnen Proben nicht bekannt und konnte nur großregional kalkuliert werden (Kap. 5.4).

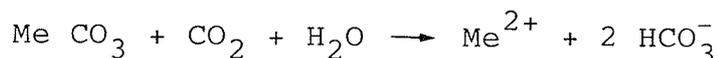
Weiterhin muß als wichtiger Punkt 5. angeführt werden, daß bei den Sorptionsvorgängen nicht nur ein Wettbewerb zwischen Oberflächen und Liganden in der Lösungsphase besteht, sondern auch die verschiedenen Sedimentphasen miteinander konkurrieren. Dieses Bild bestimmt nach FÖRSTNER (1984) das reale Geschehen in Gewässern. Da es sich bei den untersuch-

ten Sedimenten um inhomogene Materialgemische in z.T. inhomogenen chemischen Milieus handelt und zusätzlich nicht von konstantem Metallangebot ausgegangen werden kann, gestaltet sich das Bindungsverhalten der Schwermetalle überaus komplex, so daß dessen Klärung größtenteils nicht erfolgen kann.

Eine Ausnahme stellt bei den Antarktissedimenten der Bereich der Probe A 10 dar. Für diese Probenumgebung wurde in Kap. 5.4 ein schwach saures - stark oxidierendes Milieu postuliert. Zusätzlich fiel speziell A 10 schon in Kap. 5.1.2 durch ungewöhnlich hohe Konzentrationen an Pb, Cd und Zn auf. Von den Antarktissedimenten besitzen einige bei minimalen Karbonatkonzentrationen sehr hohe Schwermetallgehalte in der Fraktion CFK (Tab. 42a bis 42e). Dies gilt besonders in folgenden Proben für die Schwermetalle:

Pb:	A 2	A 3	A 6	A 9	A 10	A 11	A 12
Cd:	A 2	A 3	A 6			A 11	A 12
Zn:		A 3	A 6	A 9	A 10	A 11	
Mn:		A 3	A 6	A 9			
Fe:	A 2	A 3	A 6	A 9	A 10	A 11	A 12

Damit wird der Schluß nahegelegt, daß die genannten Proben detritische Schwermetallkarbonate führen, die wegen ihrer geringeren Löslichkeit gegenüber  $\text{CaCO}_3$  in schwach alkalischem Milieu stabil sind.  $\text{CaCO}_3$  neigt nach MASON et al. (1985) dazu, bei pH-Werten  $\leq 7,8$  in Lösung zu gehen. Die schwach sauren Bedingungen speziell im Bereich der A.10 fördern die Löslichkeit der Schwermetallkarbonate nach der Reaktion:



Die auf diese Weise natürlich mobilisierten Metallionen gehen mit den verbleibenden, z.T. nur sehr gering konzentrierten Trägersubstanzen neue Bindungen ein. Dabei sind

die Bindungspartner der A 10 besonders angereichert worden, was auf ehemals recht hohe Anteile an detritischen Schwermetallkarbonaten schließen läßt und die höheren Totalgehalte erklärt.

Um dennoch eventuelle Proportionalentwicklungen der umweltrelevanten Schwermetalle Pb, Cd und Zn in einer Bindungsart gegenüber der zugehörigen Trägersubstanz genauer fassen zu können, sind die entsprechenden Daten linearen Regressionsanalysen unterzogen worden. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten zeigt die Tabelle 27, Werte mit 99 %-iger Signifikanz sind zweifach unterstrichen.

Lineare Abhängigkeiten treten nur untergeordnet auf und verdeutlichen einmal mehr die komplexen Bindungsverhältnisse in den untersuchten Sedimenten. Es ist besonders auffällig, daß Pb in allen Bindungsarten keine hochsignifikanten Abhängigkeiten besitzt. Cd zeigt keine Abhängigkeit zur Fraktion AK. Dies ist um so bemerkenswerter, da Cd zu sehr hohen Anteilen austauschbare Bindungsplätze besetzt und spricht für ein stark "vagabundierendes" Verhalten in dieser Bindungsart. Zu den vermehrt vorkommenden Karbonaten der Nordseesedimente besitzt Cd wie Zn hohe Affinität, die für letzteres Element auch zu den Karbonatphasen der Antarktisproben festzustellen ist (Schwermetallkarbonate). Cd verhält sich weiterhin gleichsinnig zu den Konzentrationen der Fraktion OFK in Ostsee- und Antarktissedimenten. Zn zeigt neben der karbonatischen Fixierung signifikante Affinitäten zu den leicht und schwer reduzierbaren Phasen.

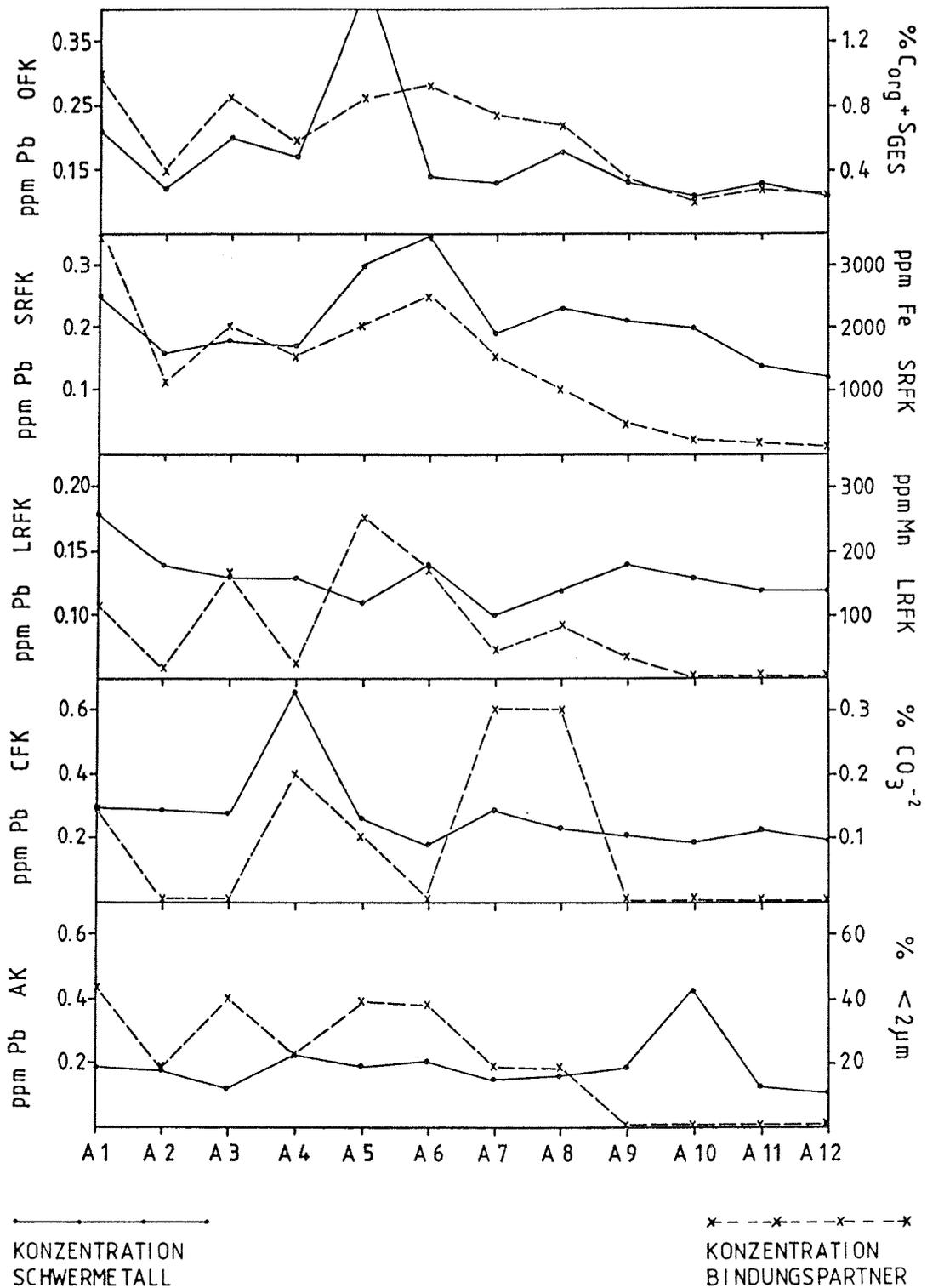


Abb. 42a: Blei mit Bindungspartnern in den Proben "A"

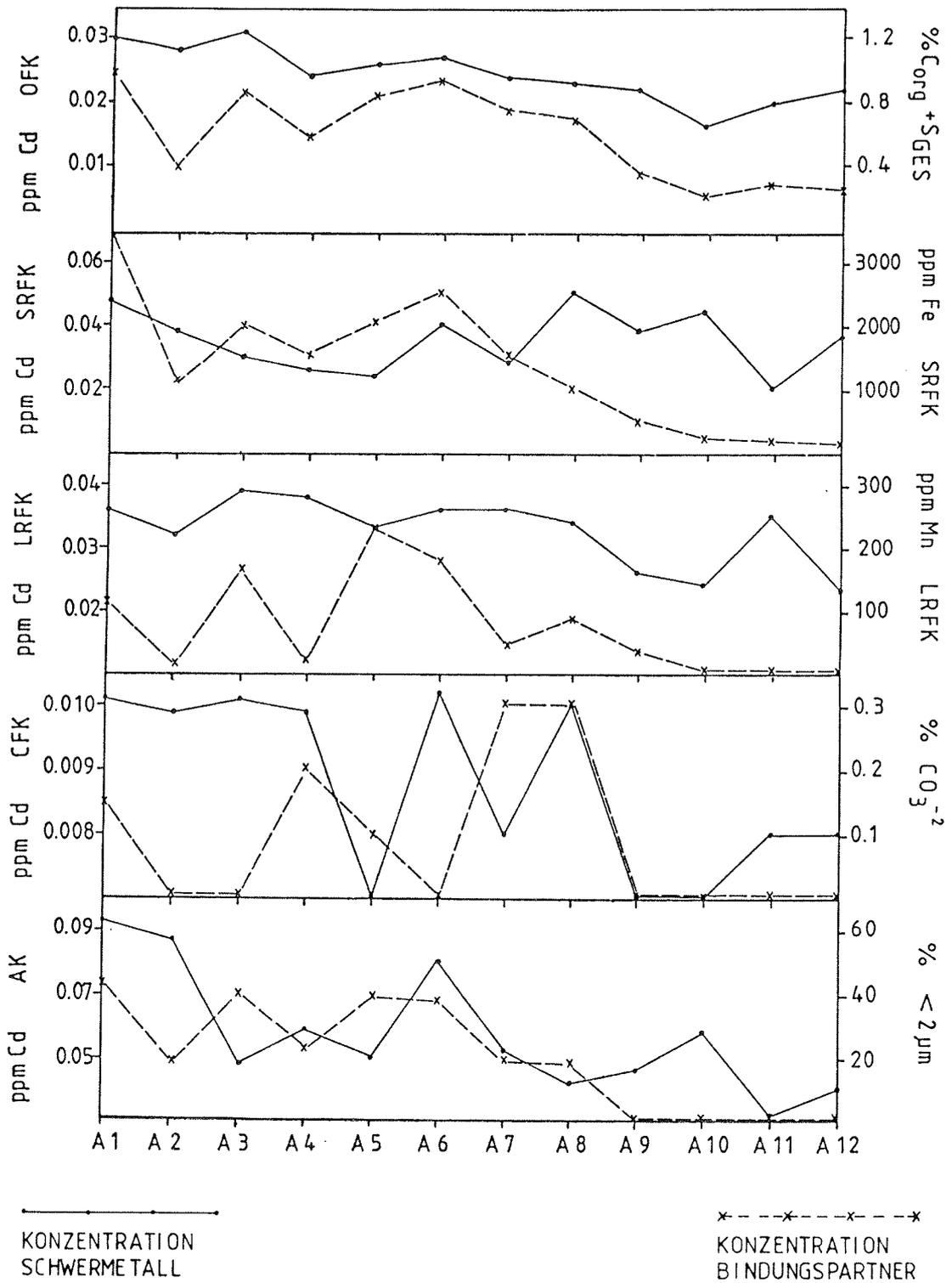


Abb. 42b: Cadmium mit Bindungspartnern in den Proben "A"

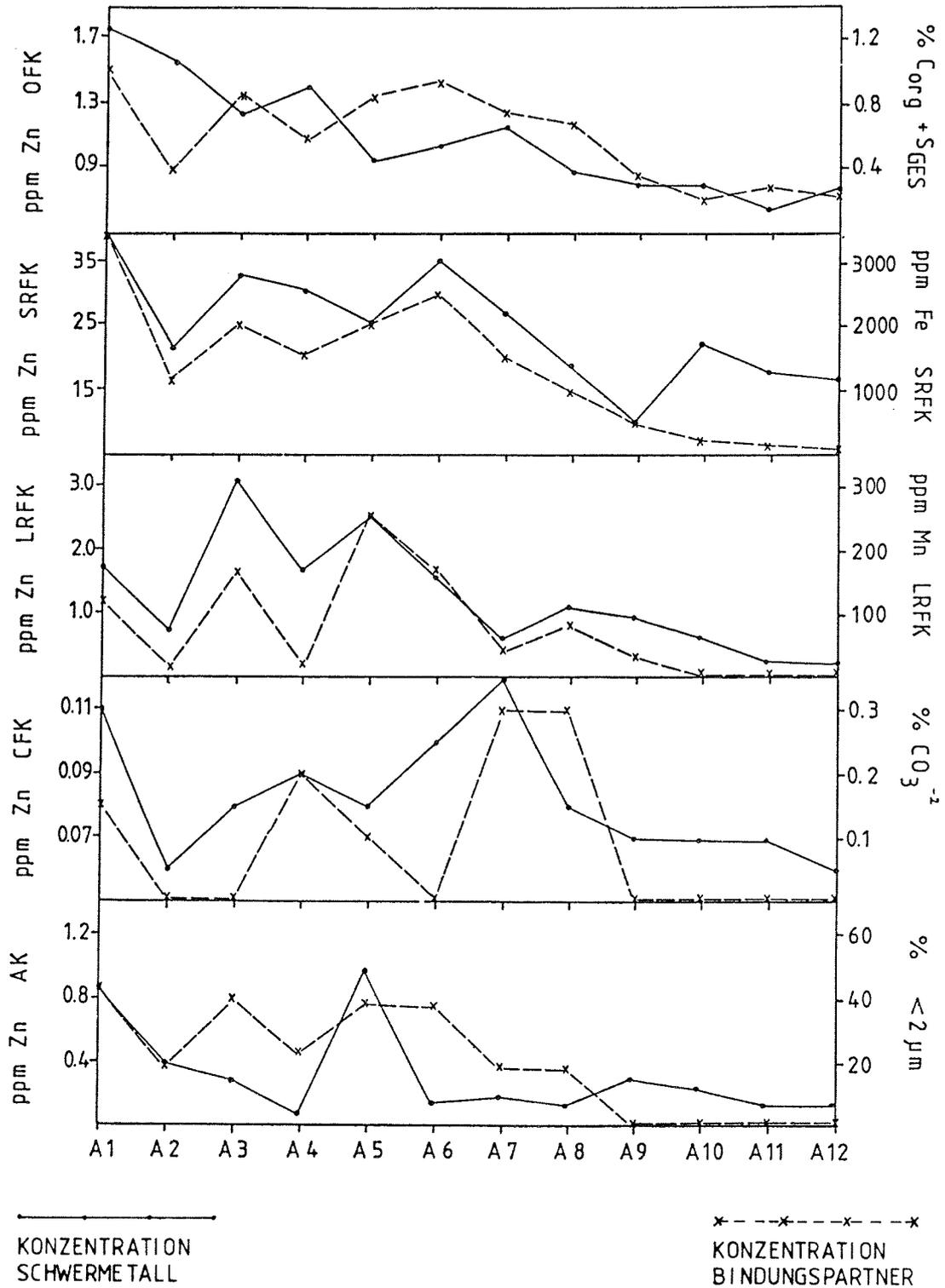


Abb. 42c: Zink mit Bindungspartnern in den Proben "A"

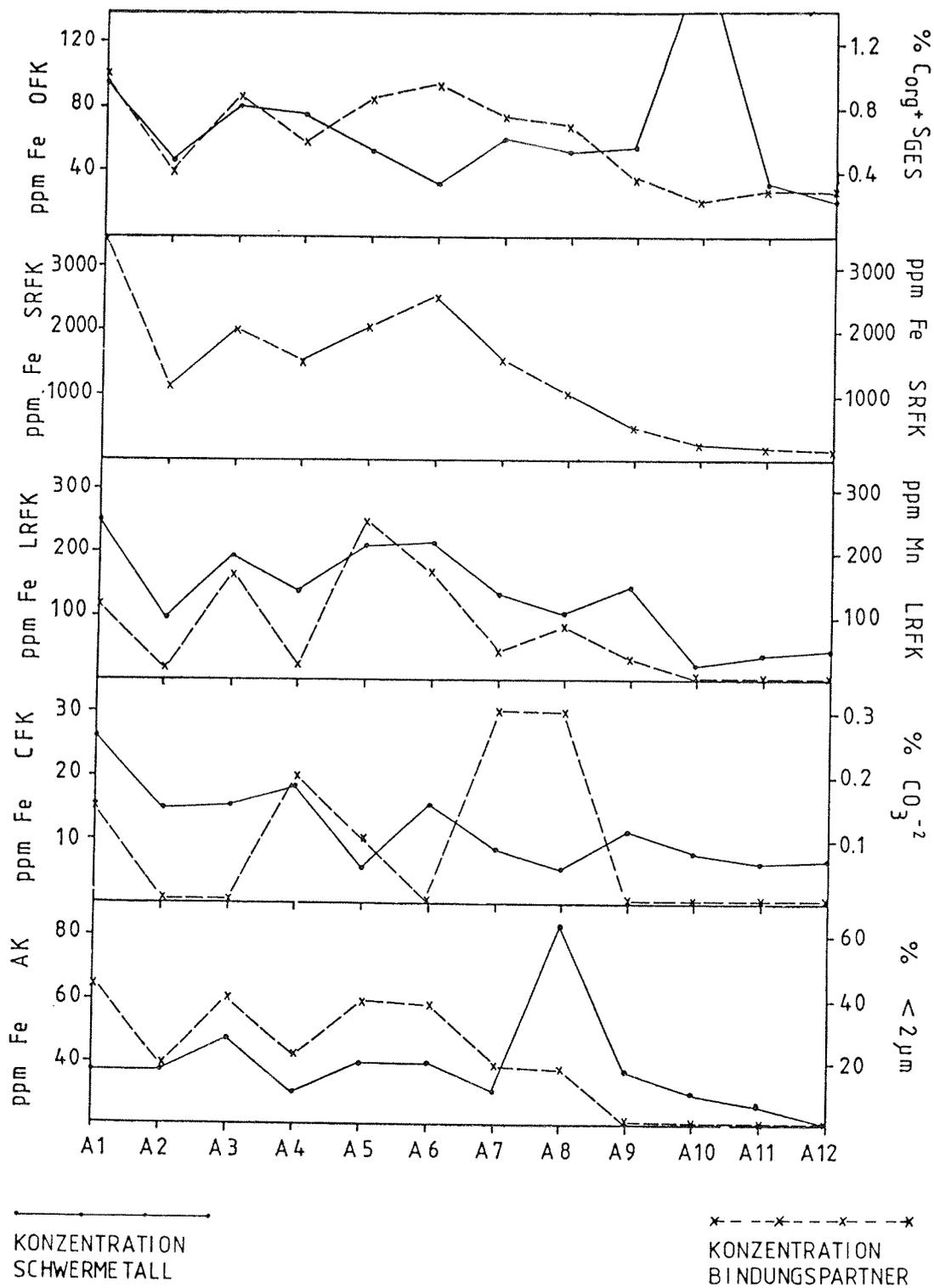


Abb. 42d: Eisen mit Bindungspartnern in den Proben "A"

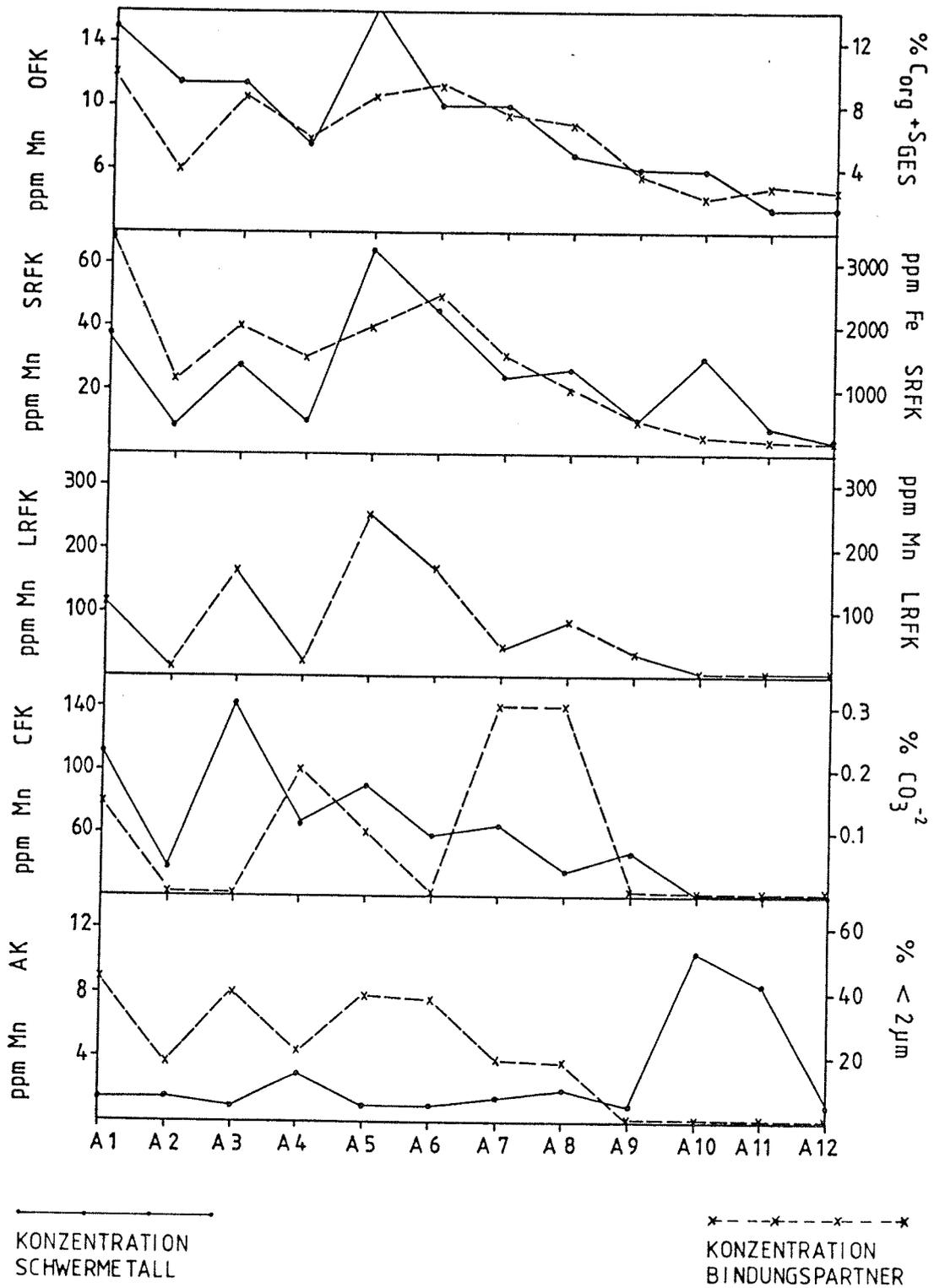


Abb. 42e: Mangan mit Bindungspartnern in den Proben "A"

	Pb	Cd	Zn
<u>AK</u>			
"P"	0,665	0,289	0,290
"Li"	-0,041	-0,388	0,257
"A"	-0,184	-0,275	0,541
<u>CFK</u>			
"P"	-0,172	<u>0,750</u>	<u>0,760</u> <u>D</u>
"Li"	0,024	0,084	-0,188
"A"	0,407	0,283	<u>0,721</u> <u>C</u>
<u>LRFK</u>			
"P"	-0,242	0,435	<u>0,861</u> <u>F</u>
"Li"	-0,483	0,609	-0,041
"A"	0,110	0,447	<u>0,830</u> <u>E</u>
<u>SRFK</u>			
"P"	0,066	0,208	0,398
"Li"	0,236	0,376	<u>0,800</u> <u>H</u>
"A"	0,642	0,156	<u>0,883</u> <u>G</u>
<u>OFK</u>			
"P"	0,111	-0,037	0,477
"Li"	0,651	<u>0,807</u> <u>B</u>	-0,142
"A"	0,527	<u>0,776</u> <u>A</u>	0,554

Tab. 27: Korrelationskoeffizienten aus linearen Regressionsanalysen: Pb, Cd und Zn gegen ihre Bindungspartner

#### 5.4.2 Korrigierte regionale Schwermetallanreicherungen in einigen Trägersubstanzen der Nord- und Ostsee-sedimente

Die in der Tabelle 27 ermittelten linearen Abhängigkeiten können im Sinne des HSAB-Konzeptes gedeutet werden: Cd besitzt als "weiche" Säure Affinität zu Karbonaten ("harte" Base), wenn diese genügend hoch konzentriert sind, geht aber mit ihnen nur schwache Bindungen ein. Demgegenüber sind die Bindungen von Cd mit den "weichen" Basen der organischen Bestandteile sehr stabil.

Zn zeigt aufgrund seines nach PEARSON "intermediären" Charakters häufiger lineare Abhängigkeiten zu seinen Trägersubstanzen, mit denen es stärkere Bindungen eingeht.

In den Fällen, in denen eine gleichläufige Entwicklung von Schwermetallen und Trägersubstanzen genügend gesichert ist (99 %-ige Signifikanz), kann die Schwermetalllast einer Trägersubstanz mit dem Quotienten Konzentration Schwermetall/Konzentration Trägersubstanz als dimensionsloser Materialfaktor F absolut erfaßt werden.

Mit den Paarungen A - H der Tabelle 27 (siehe Abb. 43 bis 46) kann eine Gegenüberstellung der Daten aus Nordsee- und Ostsee- zu den Antarktissedimenten erfolgen (Tab. 28 bis 31).

Da die antarktischen Sedimente nicht anthropogen beeinflusst sind, können unter Berücksichtigung des chemischen Milieus sowie des Materials "ausreißende" Materialfaktoren F eliminiert werden.

Tabelle 28 weist den mittleren Materialfaktor für Cd in organisch-sulfidischer Bindung der Proben "A" mit 5,3 aus. Da die gekennzeichneten Proben, wie in Kap. 5.4.1 beschrieben, Cd angereicherte Schwermetallkarbonate führen, ist

eine Abwanderung von Cd aufgrund seiner instabilen Karbonatbindung zur Fraktion OFK anzunehmen. Zusätzlich liegt im Bereich der Proben A 9 bis A 12 karbonatlösendes Milieu vor, was insgesamt zu den relativ hohen Materialfaktoren dieser Proben führt. Bleiben die material- und milieugeprägten Faktoren unberücksichtigt, wird  $\phi$  F der Antarktis-sedimente 3,3. Damit erweist sich die Fraktion OFK der Ostseesedimente als 1,6-fach Cd angereichert.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß ein Bemühen um die Ermittlung von Schwermetallbelastungen der Trägersubstanzen in Nord- und Ostseesedimenten dadurch erschwert wird, daß eventuelle Materialeffekte in diesen Proben nicht von anthropogener Beeinflussung differenziert werden können.

In Tabelle 29 wurde für die Karbonatphase der Nordseesedimente ein materialkorrigierter Zn-Anreicherungsfaktor von 7,8 errechnet. An diesem Beispiel zeigt sich sehr kraß die Möglichkeit einer Fehlinterpretation der entsprechenden Daten aus Tabelle 26. Ohne Berücksichtigung der Trägersubstanzgehalte ergab sich hier eine "dramatisch" anmutende 84,5-fache Zn-Anreicherung der Fraktion CFK.

Die Berechnung des korrigierten Zn-Anreicherungsfaktors in den Mn-oxidischen Phasen der Nordseeproben ist problematisch, da die Proben A 2 und A 4 neben den gekennzeichneten ebenfalls relativ hohe Materialfaktoren besitzen (Tab. 30). Für diese Proben konnte wegen der relativ hohen Vorkommen an  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  nicht auf ein schwach saures Milieu geschlossen werden, zusätzlich sind in diesen Proben auch keine Zn-führenden Schwermetallkarbonate zu erwarten. Aus diesem Grunde wurden zur Berechnung des korrigierten Materialfaktors nur die Werte der aus schwach saurem Milieu stammenden Proben mit  $F > 0,1$  eliminiert. Dadurch folgt für die Fraktion LRFK der Nordseesedimente eine Zn-Anreicherung von 9,3.

Die in Tabelle 31 durchgeführten Berechnungen zeigen, daß die Fraktion SRFK der Ostseesedimente nicht Zn angereichert ist.

Werden die hier ermittelten korrigierten Anreicherungsfaktoren anthropogenen Einflüssen zugeordnet, so ergibt sich eine besonders deutliche Zn-Belastung der karbonatischen und Mn-oxidischen Phasen in den Nordseesedimenten sowie eine Cd-Belastung der organischen Bestandteile in den Ostseesedimenten.

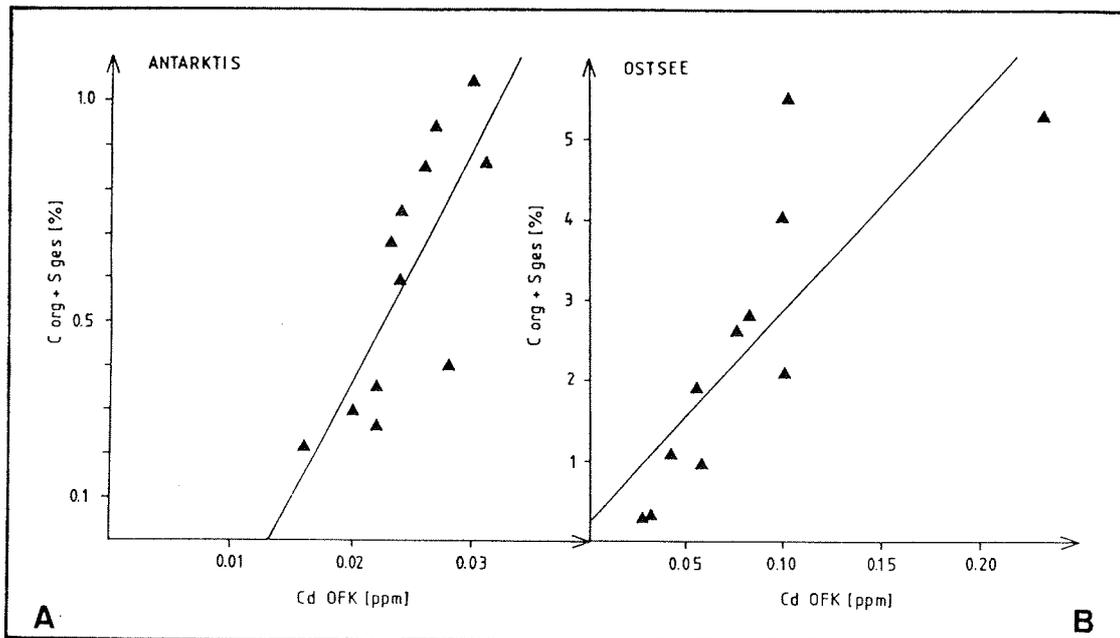


Abb. 43:  $Cd_{OFK}$  mit Bindungspartner in den Proben "A" und "Li"

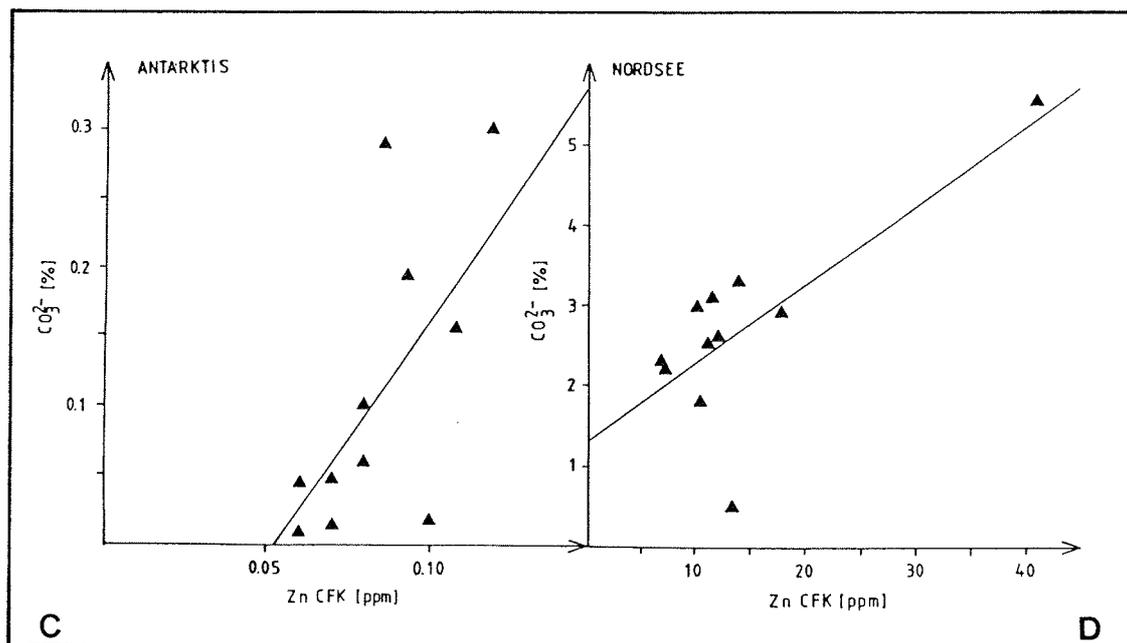


Abb. 44:  $Zn_{CFK}$  mit Bindungspartner in den Proben "A" und "P"

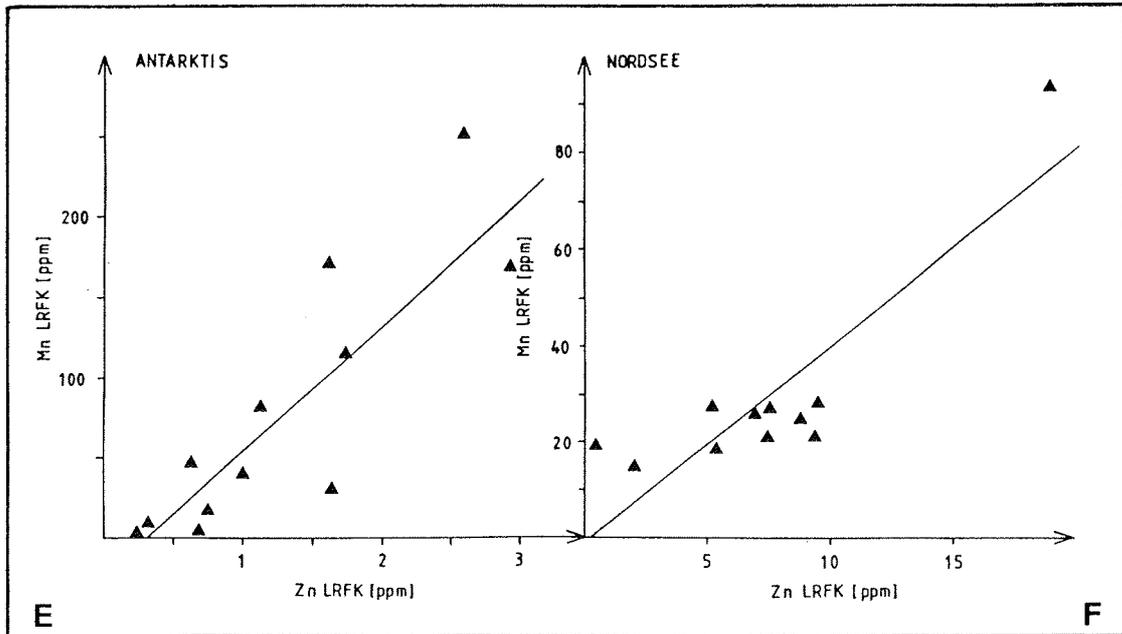


Abb. 45:  $Zn_{LRFK}$  mit Bindungspartner in den Proben "A" und "P"

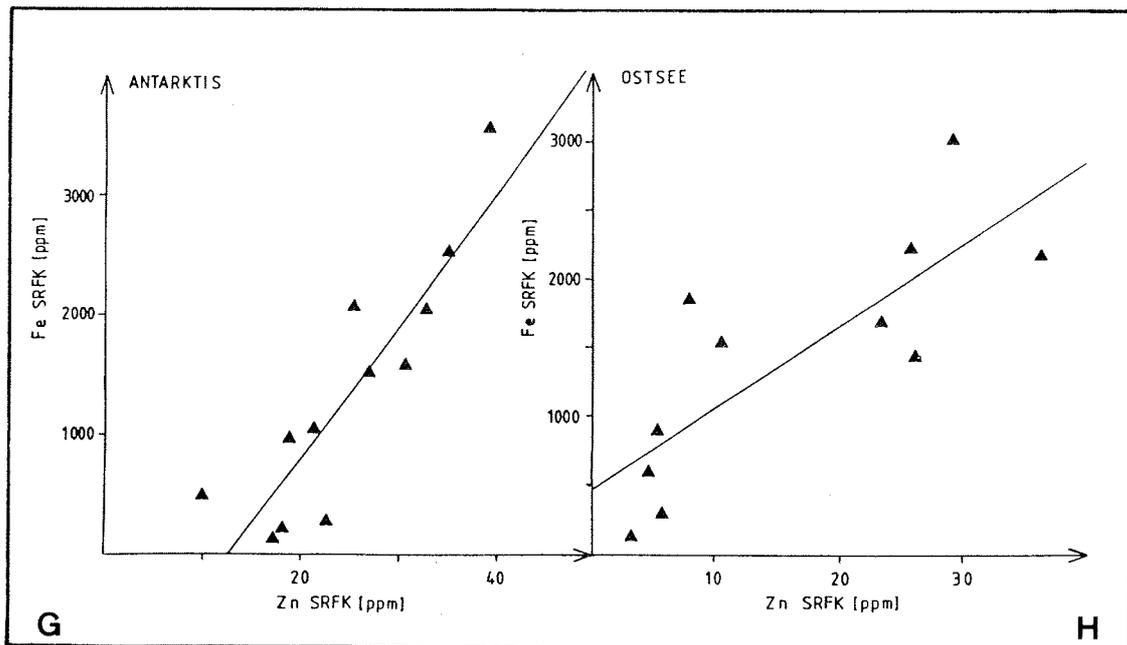


Abb. 46:  $Zn_{SRFK}$  mit Bindungspartner in den Proben "A" und "Li"

	Li 1	Li 2	Li 3	Li 4	Li 5	Li 6	Li 7	Li 8	Li 9	Li 10	Li 11
Cd <sub>OFK</sub> (ppm)	0,028	0,055	0,100	0,100	0,103	0,076	0,031	0,058	0,233	0,082	0,043
C <sub>org</sub> +S <sub>ges</sub> (ppm)	2700	18900	40300	20800	54800	26100	3100	9400	52600	20800	10800
F(Li) · 10 <sup>-6</sup>	10,4	2,9	2,5	4,8	1,9	2,9	10,0	6,2	4,4	3,9	4,0

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12
Cd <sub>OFK</sub> (ppm)	0,030	0,028	0,031	0,024	0,026	0,027	0,024	0,023	0,022	0,016	0,020	0,022
C <sub>org</sub> +S <sub>ges</sub> (ppm)	10400	4000	8600	5900	8500	9400	7500	6800	3500	2100	2900	2600
F(A) · 10 <sup>-6</sup>	2,9	7,0	3,6	4,1	3,1	2,9	3,2	3,4	6,3	7,6	6,9	8,5

∅ F(Li) : 4,9    a) ∅ F(A) :    5,3 → AF Cd<sub>OFK</sub>(Li) : 0,9

b) ∅ F(A) ohne ♦ : 3,3 → AF Cd<sub>OFK</sub>(Li) : 1,6

Tab. 28: Korrigierte Cadmium-Anreicherungen der Bindungsart OFK in den Ostseeproben

	P 6	P 9	P 11	P 13	P 14	P 15	P 18	P 19	P 20	P 21	P 23
Zn <sub>CFK</sub> (ppm)	41,0	13,3	16,4	10,4	7,2	6,8	10,8	11,2	11,2	12,0	13,0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	65000	15000	38000	28000	32000	33000	40000	40000	35000	36000	42000
F(P) · 10 <sup>-4</sup>	6,3	8,9	4,3	3,7	2,3	2,1	2,7	2,8	3,2	3,3	3,1

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12
Zn <sub>CFK</sub> (ppm)	0,11	0,06	0,08	0,09	0,08	0,10	0,12	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	1500	500	500	2000	1000	100	3000	3000	100	100	100	100
F(A) · 10 <sup>-4</sup>	0,7	1,2	1,6	0,5	0,8	10,4	0,4	0,3	7,0	7,0	7,0	6,0

∅ F(P) : 3,9 a) ∅ F(A) : 3,6 → AF Zn<sub>CFK</sub> (P) : 1,1

b) ∅ F(A) ohne ♦ : 0,5 → AF Zn<sub>CFK</sub> (P) : 7,8

Tab. 29: Korrigierte Zink-Anreicherungen der Bindungsart CFK in den Nordseeproben

	P 6	P 9	P 11	P 13	P 14	P 15	P 18	P 19	P 20	P 21	P 23
Zn <sub>LRFK</sub> (ppm)	19,5	2,0	7,0	7,5	0,5	9,4	7,5	7,5	8,8	5,4	5,3
Mn <sub>LRFK</sub> (ppm)	98,5	14,5	26,5	21,5	19,0	21,5	26,5	27,0	25,1	18,5	29,0
F(P)	0,2	0,1	0,3	0,4	0,03	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12
Zn <sub>LRFK</sub> (ppm)	1,75	0,75	3,08	1,68	2,58	1,58	0,63	1,13	0,98	0,69	0,30	0,25
Mn <sub>LRFK</sub> (ppm)	114,0	16,5	166,5	21,5	250,0	171,5	46,5	80,5	35,0	3,5	5,0	2,0
F(A)	0,02	0,05	0,02	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,2	0,06	0,13

$\phi$  F(P) : 0,28 a)  $\phi$  F(A) : 0,05  $\rightarrow$  AF Zn<sub>LRFK</sub> (P) : 5,6

b)  $\phi$  F(A) ohne  $\blacklozenge$  : 0,03  $\rightarrow$  AF Zn<sub>LRFK</sub> (P) : 9,3

Tab. 30: Korrigierte Zink-Anreicherungen der Bindungsart LRFK in den Nordseeproben

	Li 1	Li 2	Li 3	Li 4	Li 5	Li 6	Li 7	Li 8	Li 9	Li 10	Li 11
Zn <sub>SRFK</sub> (ppm)	3,25	26,25	36,25	10,80	25,75	23,50	5,90	4,6	29,30	8,00	5,35
Fe <sub>SRFK</sub> (ppm)	120,0	1435,0	2180,0	1575,0	2225,0	1690,5	300,0	600,0	3002,5	1850,0	900,0
F(Li)	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01

	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	A 9	A 10	A 11	A 12
Zn <sub>SRFK</sub> (ppm)	39,5	21,5	33,0	30,5	25,5	35,5	27,0	19,0	10,0	22,5	18,5	17,5
Fe <sub>SRFK</sub> (ppm)	3520	1015	2025	1540	2045	2510	1515	1005	475	225	200	160
F(A)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,1	0,09	0,1

$\phi$  F(Li) : 0,02 a)  $\phi$  F(A) : 0,04  $\rightarrow$  AF Zn<sub>SRFK</sub> (Li) : 0,25

b)  $\phi$  F(A) ohne  $\blacklozenge$  : 0,02  $\rightarrow$  AF Zn<sub>SRFK</sub> (Li) : 1,00

Tab. 31: Korrigierte Zink-Anreicherungen der Bindungsart SRFK in den Ostseeproben

## 6 Schlußbetrachtung

Durch die vorangegangenen Untersuchungen werden die Arbeitsgebiete der Nord- und Ostsee als z.T. stark schwermetallangereichert ausgewiesen. Besonders durch die Gegenüberstellung der korngößenkorrigierten Schwermetallgehalte in Nord- und Ostseeproben mit den Konzentrationen in den antarktischen Sedimenten werden die Größenordnungen der Schwermetallanreicherungen aufgezeigt. Zusätzlich ermöglicht dieses Verfahren das Auffinden lokaler Anreicherungsmaxima. So treten die Proben südlich Helgolands durch starke Pb-Anreicherungen und das Probengebiet südlich von Grömitz durch starke Cd-Anreicherungen hervor.

Weitere Hinweise auf anthropogene Beeinflussung der Nord- und Ostsee liefern die Ergebnisse aus den Analysen der Bindungsarten, die die hohe Anreicherung von Cd auf austauschbaren Positionen verdeutlichen. Dies ist hervorzuheben, da durch Milieuänderungen hohe Anteile an Cd mobilisiert werden können.

Nach FÖRSTNER (1984) kommen als Faktoren für Metallfreisetzungen fünf Arten von chemischen Veränderungen in Betracht:

1. Erhöhte Salzkonzentration
2. Senkung der pH-Werte
3. Veränderung der Redox-Verhältnisse
4. Eintrag natürlicher und synthetischer Komplexbildner
5. Mikrobielle Aktivitäten

Bezogen auf die Durchschnittskonzentrationen des Cd in den untersuchten Nord- und Ostseeproben könnte bei einer totalen Mobilisation der austauschbaren Cd-Anteile der Trinkwassergrenzwert von 6 µg/l Cd, FÖRSTNER & WITTMANN (1979), im Falle der Nordsee um das maximal 45-fache, im Falle der Ostsee sogar um das maximal 100-fache in den bodennahen Wasserschichten überschritten werden.

Selbst bei den zu erwartenden Verdünnungseffekten durch Strömung und Durchmischung der Wasserkörper, stellt das mobilisierbare Metallpotential eine Gefahrenquelle für die In- und Epifauna dar.

Die in Kap. 5.4.2 dargestellten Untersuchungen machen deutlich, daß die Kenntnis des Materials und Milieus in situ eine wichtige Voraussetzung für die seriöse Beurteilung der Belastungssituation in marinen Sedimenten ist. Durch die Kenntnis und den Nachweis von Abhängigkeiten der Schwermetalle zu ihren Trägersubstanzen können anthropogene Anreicherungen der verschiedenen Sedimentphasen sicher erfaßt werden.

Im Falle der untersuchten Proben zeigen die Ergebnisse, daß nur eine geringe Cd-Anreicherung der organisch-sulfidischen Fraktion in den Ostseesedimenten nachzuweisen ist, aber deutliche Zn-Anreicherungen der karbonatischen und leicht reduzierbaren Nordseesedimentphasen vorliegen.

Die Einleitung von Schadstoffen in die deutschen Küstengewässer kann die unter 1. - 5. aufgeführten chemischen Veränderungen hervorrufen. Die Bindungsfähigkeit sowie die Stabilität der behandelten Schwermetallträgersubstanzen können hierdurch negativ beeinflusst werden, so daß Metallfreisetzungen stattfinden. Unter solchen Bedingungen wird die Möglichkeit einer Metallaufnahme durch die Organismen in Nord- und Ostsee erhöht.

7 Literaturverzeichnis

- ASTM (1974): Selected powder diffraction data for minerals - Data book. - Joint Commit. on Powder Diffraction Standards; Pennsylvania.
- BARCKHAUSEN, J. (1969): Entstehung und Entwicklung der Insel Langeoog. - In: SINDOWSKI, K.H. (1973): Das Ostfriesische Küstengebiet. - Samml. geol. Führer, 57: Berlin, Stuttgart.
- BISCAYE, P.E. (1965): Mineralogy and sedimentation of recent deep sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans.- Geol. Soc. Am. Bull., 76.
- BRINKMANN, R. (1977): Abriß der Geologie - Bd. II Historische Geologie. - 10./11. Aufl.: 400 S. Stuttgart (Enke).
- CASTON, V.N.D. (1979): The Quaternary sediments of the North Sea. - In: BANNER, F.T. et al.: The North-West European shelf seas: The sea bed and the sea in motion, I. Geology and sedimentology; Amsterdam, Oxford, New York (Elsevier).
- CHAO, T.T. (1972): Selective dissolution of manganese oxides from soils and sediments acidifies hydroxylaminhydrochloride. - Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36.
- CRADDOCK, C. (1977): Antarctica and Gondwana-land. - Votr. Symp. Antarctic Geol. Geophys.; Madison.
- DEGENS, E.T. (1968): Geochemie der Sedimente. - Stuttgart (Enke).
- DEUTSCHES HYDROGRAPHISCHES INSTITUT (1978b): Externes Gutachten für den Rat von Sachverständigen für Umweltfragen.
- DIETRICH, G. (1974): In: MAGAARD, L. & RHEINHEIMER, G.: Meereskunde der Ostsee. - Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRASS, W. & SIEDLER, G. (1975): Allgemeine Meereskunde - Eine Einführung in die Ozeanographie. - Berlin, Stuttgart (Bornträger).
- DOMINIK, J., FÖRSTNER, U., MANGINI, A. & REINECK, H.-E. (1978): <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs chronology of heavy metal pollution in a sediment core from the German Bight (North Sea). - Senckenbergiana Marit., 10 (4/6): 213-227; Frankfurt.
- DÜMMLER, H. & SCHRÖDER, D. (1965): Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Dreischicht-Tonmineralen in Böden. - Z. Pflanzenernährung Düng. Bodenkde., 109.

- EISMA, D. (1981): Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. - Spec. Publ. intern. Assoc. Sedimentologists, 5: 415-428; Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne.
- ENGELHARDT, W. VON (1973): Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen - Sediment-Petrologie, Teil 3. - 378 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- ENGLER, R.M., BRANNON, J.M. & ROSE, J. (1974): A practical selective extraction procedure for sediment characterization. - Symp. on chem. marine sediments presented before the Division of Petrol. Chem., Inc. amer. chem. Soc., Atlantic City meeting.
- ERGIN, M. (1982): Mineralogisch-sedimentologische und geochemische Untersuchungen an zwei Sedimentkernen aus Schlickgebieten der westlichen Ostsee. - Diss. Univ. Heidelberg.
- FAIRBRIDGE (1966): The encyclopedia of oceanography - Encyclopedia of earth sciences series, volume 1. - Dowden, Hutchinson, Ross, Ing Stroudsburg, Pennsylvania.
- FIGGE K. (1981): Begleitheft zur Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht. - DHI, Hamburg.
- (1981): Karte der Sedimentverteilung in der Deutschen Bucht, 1:250.000. - DHI, Hamburg.
- FÖRSTNER, U. & CALMANO, W. (1984): Remobilisierung und Bindung von Schwermetallen in Sedimenten und im Baggergut. - Literaturber. Arbeitsbereich Umweltschutztechnik TU Hamburg.
- FÖRSTNER, U. & PATCHENEELAM, S.R. (1976): Bindung und Mobilisation von Schwermetallen in fluviatilen Sedimenten. - Chemiker Z., 100: 49-57.
- (1981): Chemical association of heavy metals in marine deposits with special reference to pollution in the German North Sea. - Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer., 181: 49-58.
- FÖRSTNER, U. & WITTMANN, G.T.W. (1979): Metall pollution in the aquatic environment. - Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- FÜCHTBAUER, H. (1959): Zur Nomenklatur der Sedimentgesteine. - Erdöl und Kohle, 12: 605-613.
- GADOW, S. & SCHÄFER, A. (1973): Die Sedimente der Deutschen Bucht, Korngrößen, Tonminerale und Schwermetalle. - Senckenbergiana Maritima, 5; Frankfurt.
- GIBBS, R. (1973): Mechanisms of trace metal transport in rivers. - Science 180: 71-73

- GUY, R.D. & CHARABARTI, C.L. (1975): Distribution of metal ions between soluble and particulate forms. - Abstr. int. Conf. Heavy Met. Environ.; Toronto/Ont.
- HAASE, G.M. (1983): Sedimentological and geochemical investigations in the dumping area for wastes of Titaniumdioxide production in the Helgoland Bight. - Veröff. Inst. Meeresforsch., 19; Bremerhaven
- HAASE, G. (1985): Glaciomarine sediments along the Filchner/Ronne Ice Shelf, southern Weddell Sea - first results of the 1983/84 Antarktis -II/4 Expedition. - Veröff. Alfred Wegener-Inst. für Polarforsch.; Bremerhaven.
- HARTMANN, A. & ÖZERLER, M. (1985): Verfahren zur Strukturuntersuchung von Filterkuchen aus Bohrspülungen. - Erdöl-Erdgas, 9; Hamburg, Wien (Urban).
- HERTWECK, G. (1983): Das Schlickgebiet in der inneren Deutschen Bucht. Aufnahme mit dem Sedimentechographen. - Senckenbergiana Merit., 15 (4/6): 219-249; Frankfurt.
- HEUER, M. & LESCHONSKI, K. (1984): Verfahren zur Berechnung der Partikelgrößenverteilung aus Beugungspektren. - Votr. Partec, 3. Europ. Symp. "Partikelmeßtechnik" Nürnberg.
- HÖBEL, CH. (1984): Zum Schwermetallgehalt im Ökosystem der Deutschen Bucht, mit besonderer Berücksichtigung rezentmariner, benthischer Foraminiferen. - Diss. TU Clausthal.
- HOLMGREN, G.S. (1967): A rapid Citrate-Dithionite extractable iron procedure. - Soil Sci. Soc. amer. Proc., 31: 210-211.
- ILLING, L.V. & HOBSEN, G.D. (1981): Petroleum geology of the continental shelf of Northwest Europe. - Inst. Petrol.; London (Heyden).
- IRION, G. (1982): Sedimentdatierung durch anthropogene Schwermetalle. - Senckenbergiana Marit., 13 (4/6).
- JACKSON, M.L. (1958): Soil chemical analysis. - Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New York.
- JENKINS, R. (1977): Einführung in die Röntgenspektroskopie. - London (Heyden).
- JOHNSON, G.L., VAYINEY, J.R., ELVERHOI, A. & LaBREQUE (1981): Morphology of the Weddell Sea and southwest Indian Ocean. - Dtsch. Hydrgr. Z., 34: 263-272.

- KÖSTER, H.M. (1979): Die chemische Silikatanalyse. - Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- KOHNEN, H. (1981): Bathymetrical measurement in the southern Weddell-Sea during the german antarctic expedition 1979/80 to the Filchner/Ronne Ice Shelf. - Polarforsch., 51 (1): 39-42.
- (1981): Die Forschungsaktivitäten der Bundesrepublik Deutschland in der Westantarktis. - Natur und Museum III, (12); Frankfurt.
- KRINSLEY, D.H. & DOORNKAMP, J.L. (1973): Atlas of quartz sand surface textures. - Cambridge (University Press).
- LANGE, M.A. & KOHNEN, H. (1984): Ice-front fluctuations in the eastern and southern Weddell-Sea. - Ann. of Glaciol., 6.
- MARSAL, D. (1967): Statistische Methoden für Erdwissenschaftler. - 152 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- MATTIAT, B. (1969): Eine Methode zur elektronenmikroskopischen Untersuchung des Mikrogefüges in tonigen Sedimenten. - Geol. Jb., 88; Hannover.
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sedimentuntersuchung. - Sedimentpetrologie Teil I. - Stuttgart (Schweizerbart).
- (1969a): Das Sand-Silt-Ton-Verhältnis in rezenten marinen Sedimenten. - N. Jb. Miner., Mh.: 148-163.
- MÜLLER, G., DOMINIK, J. & REUTHER, R. (1980): Sedimentary record of environmental pollution in the western Baltic Sea. - Naturwissenschaften, 67: 595-600; Berlin (Springer).
- MURDOCH, A., ZEMEN, A.J. & SANDILAND, R. (1977): Identification of mineral particles in finegrained lacustrine sediments with transmission electron microscope and X-ray energy dispersive spectroscopy. - J. Sediment. Petrol., 47, 1.
- NATIONALKOMITEE FÜR GEODÄSIE UND GEOPHYSIK BEI DER AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR (1981): Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969 bis 1978. - Geodät. Geophys. Veröff., R. IV, 35.
- NILSSON, T. (1983): The Pleistocene geology and life in the Quaternary ice-age. - Stuttgart (Enke).

- NISSENBAUM, A. (1972): Distribution of several metals in chemical fractions of a sediment core from the sea of Okhotsk. - *Isr. J. Earth Sci.*, 21: 143-154.
- OSIPOV, V.I. & SOKOLOV, V.N. (1978): Relation between the microfabric of clay soils and their origin and degree of compaction. - *Bull. Int. Assoc. Engin. Geol.*, **18**: 73-81,; Krefeld.
- PARKS, G.A. (1967): Aqueous surface chemistry of oxides and complex oxides minerals. - In: *Equilibrium concepts in natural water systems*. - *Adv. chem. Ser.: Amer. chem. Soc.*: 121-160; Washington, D.C.
- PATCHINEELAM, S.R. (1975): Untersuchungen über die Bindungsarten und die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen in fluviatilen Sedimenten. - *Diss. Univ. Heidelberg*.
- PATCHINEELAM, S.R. & FÖRSTNER, U. (1977): Bindungsformen von Schwermetallen in marinen Sedimenten. - *Senckenbergiana Marit.*, 9 (1/2); Frankfurt.
- PEARSAN, R.G. (1963): Hard and soft acids and bases. - *J. amer. chem. Soc.*, 85: 3533-3539.
- PFEFFERKORN, G. (1978): Oberflächenuntersuchung mit dem Raster-Elektronenmikroskop. - *Radex-Rdsch.*, 3/4; Münster.
- PRATJE, O. (1948): Die Bodenbedeckung der südlichen und mittleren Ostsee und ihre Bedeutung für die Ausdeutung fossiler Sedimente. - *Dtsch. Hydrogr. Z.*, 1:45-61.
- RASHID, M.A. (1971): Role of humic acids of marin origin and their different molecular weight fractionones in complexing di- and trivalent metals. - *Soil Sci.*, 111: 298-305.
- RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN (1980): *Umweltprobleme der Nordsee*; Stuttgart, Mainz (Kohlhammer).
- REINHEIMER, G. (1974): In: *Meereskunde der Ostsee*. - Berlin, Heidelberg New York (Springer).
- RILEY, J.P. & CHESTER, R. (1976): *Chemical Oceanography* - Vol. 6. - 2nd Edit.; London, New York, San Francisco (Academic Press).
- ROHARD, D. (1985): *Hydrographische Daten aus dem südlichen Weddell-Meer*. - Alfred-Wegener-Inst. f. Polarforsch; Bremerhaven. - (schriftl. Mitteilung)
- RÖMPP (1966): *Chemie Lexikon*, 4 Bde. - 6. Aufl.; Stuttgart (Franck)

- ROLAND, N.W. (1983): Mineralische Ressourcen der Antarktis - Kenntnisstand und Nutzungsmöglichkeiten. - Geogr. Rdsch., 3: 120-122; Braunschweig.
- SCHWEITZER, M. (1976): Erosionshäufigkeit in der westlichen Ostsee als Folge des Seegangs. - Rep. Sonderforsch.-Ber., 95, Wechselwirkung Meer-Meeressediment, 21; Kiel.
- SEIBOLD, E. (1974): Das Meer. - In: BRINKMANN, R. (1974): Lehrbuch der Allgemeinen Geologie, Bd. I; Stuttgart (Enke).
- SEIBOLD, E. & BERGER, W.H. (1982): The sea floor - An introduction to marine geology. - Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- SINDOWSKI, K.H. (1962): Nordseevorstöße und Sturmfluten an der ostfriesischen Küste seit 7000 Jahren. - Geogr. Rdsch., 14, Jg. 8: 322-329.
- SOKOLOWSKI, B.F. (1982): Untersuchungen an Tonmineralen und Schwermetallen in Oberflächensedimenten der Deutschen Bucht. - Dipl.-Arb. TU Clausthal. - (unveröff.)
- STREIF, H.J. (1978): In: REINECK, H.E.: Das Watt. - Frankfurt (Kramer).
- SUESS, E. (1973): Interactions of organic compounds with calcium carbonate - II. Organo-association in recent sediments. - Geochim. Cosmochim. Acta 37: 157-168.
- SUESS, E. & ERLLENKEUSER, H. (1975): History of metal pollution and carbon input in Baltic Sea sediments. - Meyniana, 27; Kiel.
- TESSIER, A., CAMPBELL, P.G.A. & BISSON, M. (1979): Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. - Analytical Chem., 51, 7.
- THOMAS, R.H. (1979): West antarctic ice sheet: present day thinning and Holocen retreat of the margins. - Science, 205: 1257 f.
- TESSENSOHN, F. (1979): Passive "gondwanische" und aktive "pazifische" Tektonik der antarktischen Platte. - Clausthaler Geol. Abh., 30, Schönenberg Festschr.: 164-191.
- THEEDE, H. (1974): Die Tierwelt, I. Ökologie. - In: MAGAARD, L. & RHEINHEIMER, G. (1974): Meereskunde der Ostsee. - Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- TRASK, P.D. (1932): Origin and environment of source sediments of petroleum. - Houston (Gulf Publ. Co.).

- TRÖGER, W.E. (1969): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. - Teil 2: Textband. - 822. S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- TUREKIAN, K.K. & WEDEPOHL, K.H. (1961): Distribution of the elements in some major units of the earth's. - Bull. geol. Soc. Amer., 72: 175-192.
- WALGER, E. (1966): Untersuchungen zum Vorgang der Transportsonderung von Mineralen am Beispiel von Strandsanden der westlichen Ostsee. - Meyniana, 16: 55-106; Kiel.
- WATTENBERG, H. (1949): Entwurf einer natürlichen Einteilung der Ostsee. - Kieler Meeresforsch., 6: 10-15.
- WEDEPOHL, K.H. (1978): Handbook of geochemistry, Vol. II/3. - Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- WELTON, J.E. (1984): SEM petrology atlas - Methods in exploration series.- Amer. Assoc. Petrol. Geologists: 237 S.; Tulsa/Okla.
- WITTENHAGEN, S. (1980): Sedimentologisch- petrographische Untersuchungen des Bentheimer Sandsteins im Erdölfeld Bramberge/Emsland. - Clausthaler Geowiss. Diss., 5; Clausthal-Zellerfeld.
- WOLDSTEDT, P. (1958): Das Eiszeitalter I + II. - Stuttgart (Enke).
- WOLDSTEDT, P. & DUPHORN, K. (1974): Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter. - Stuttgart (Enke).
- WOOD, J.M. (1974): Biological cycles for toxic elements in the environment. - Science, 183: 1049-1052.
- WURSTER, P. (1962): Geologisches Porträt Helgolands. - Die Natur, 70, 7/8: 135-150; Schwäbisch-Hall.
- ZIEGLER, P.A. (1977): Geology and hydrocarbon provinces of the North Sea. - Geol. J., 1.1; Wiesbaden (Akad. Verl.-Ges.).



8 A N H A N G

*ohne blanko*

	nördliche Breite	östliche Länge	Wasser- tiefe (m)
P 6	54° 4,2'	8° 1,4'	28
P 9	54° 4,0'	7°51,4'	39
P 11	54° 3,9'	7°45,0'	34
P 13	55° 1,6'	6°21,2'	45
P 14	54°58,4'	6°24,0'	44
P 15	54°55,3'	6°27,4'	43
P 18	54°41,5'	6°40,5'	41
P 19	54°36,5'	6°45,4'	37
P 20	54°31,8'	6°50,0'	36
P 21	54°24,8'	6°56,4'	36
P 23	54°13,9'	7°11,5'	34
Li 1	54° 0,9'	10°49,0'	13
Li 2	54° 2,3'	10°49,3'	18
Li 3	54° 3,3'	10°49,3'	20
Li 4	54° 2,9'	10°52,1'	20
Li 5	54° 5,7'	10°55,1'	18
Li 6	54° 6,2'	10°56,2'	14
Li 7	54° 7,3'	10°57,7'	11
Li 8	54°11,8'	11°11,1'	18
Li 9	54°12,2'	11°14,2'	21
Li 10	54°18,9'	11°14,8'	19
Li 11	54°20,7'	11°17,5'	17
A 1	75° 0,3'	59°38,8'	624
A 2	75°28,2'	58° 9,3'	564
A 3	75°31,13'	56°53,8'	325
A 4	75°46,62'	56°51,51'	348
A 5	75°59,10'	55°13,39'	466
A 6	76°21,4'	53°12,8'	450
A 7	76°27,8'	52°58,8'	451
A 8	76°31,5'	52°42,6'	374
A 9	76°38,03'	52°10,09'	306
A 10	76°45,1'	51°30,3'	287
A 11	76°53,1'	50°33,8'	257
A 12	77° 6,22'	48°36,48'	241

Tab. 1: Positionen und Wassertiefen der Nordseeproben "P",  
der Ostseeproben "Li" und der Antarktisproben "A"

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%											
Pb	0,65	2,9	1,20	5,4	0,3	1,4	1,33	6,0	0,93	4,2	17,8	80,2	22,21
Cd	0,360	53,9	0,022	3,3	0,080	12,0	0,021	3,1	0,100	15,0	0,085	12,7	0,668
Zn	0,29	<0,1	41,0	33,6	19,5	16,0	48,5	40,1	4,65	3,8	3,5	2,9	121,94
Fe	170,0	<0,1	114,0	<0,1	600	3,0	5150	25,7	64,0	<0,1	13960	69,6	20058,0
Mn	37,0	5,0	290,0	39,5	98,5	13,4	401,5	6,7	20,0	2,7	242,0	33,9	734,0

Tab. 2: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 6 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%											
Pb	0,53	3,7	1,18	8,3	0,8	5,6	1,27	8,9	1,35	9,5	9,1	63,9	14,23
Cd	0,340	57,8	0,007	1,2	0,070	11,9	0,025	4,3	0,051	8,7	0,095	16,2	0,588
Zn	0,30	<0,1	13,3	20,5	2,0	3,1	38,8	59,8	6,35	9,8	4,15	6,4	64,9
Fe	94,0	1,25	69,0	<0,1	355	4,7	2700	35,9	45,0	<0,1	4250	56,6	7513
Mn	7,5	4,5	51,0	30,8	145	8,8	13,0	7,9	11,5	7,0	68,0	41,1	165,5

Tab. 3: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 9 – Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%									
Pb	0,57	2,7	1,25	5,0	0,7	3,3	1,6	6,6	4,0	18,86	13,2	62,6	21,1
Cd	0,330	56,5	0,010	1,8	0,070	12,0	0,022	3,8	0,065	11,1	0,87	14,9	0,584
Zn	0,29	<0,1	16,4	21,4	7,0	9,1	47,8	62,4	3,05	4,0	2,1	2,1	76,67
Fe	80,0	<0,1	80,0	<0,1	450	3,5	3950	31,8	12,0	<0,1	7890	63,4	12442
Mn	11,5	4,3	69,8	25,9	26,5	9,8	23,5	8,7	20,0	7,4	118	43,8	269,3

Tab. 4: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 11 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%											
Pb	0,52	3,2	1,42	8,7	0,6	3,7	1,43	8,8	1,23	7,5	11,1	67,9	16,34
Cd	0,220	48,0	0,008	1,7	0,060	13,1	0,039	8,5	0,063	13,7	0,067	14,6	0,459
Zn	0,31	<0,1	10,4	16,0	7,5	11,5	39,0	49,9	5,95	9,1	2,0	3,1	65,16
Fe	75,0	<0,1	98,0	<0,1	400	3,1	4550	35,1	41,0	<0,1	7800	60,2	12964
Mn	8,0	3,8	44,8	21,5	21,0	10,1	19,0	9,1	11,5	5,5	100,0	48,0	208,3

Tab. 5: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 13 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%											
Pb	0,42	2,8	1,18	7,9	0,5	3,3	1,3	8,7	5,23	21,5	8,4	55,9	15,03
Cd	0,240	46,4	0,008	1,5	0,070	13,5	0,037	7,1	0,078	15,1	0,084	16,3	0,517
Zn	0,28	<0,1	7,2	13,6	0,5	<0,1	36,3	68,4	4,5	8,5	4,3	8,1	53,08
Fe	60,0	<0,1	98,0	<0,1	310	2,9	4250	39,4	29,0	<0,1	6050	56,0	10797
Mn	6,5	3,5	43,8	23,4	19,0	10,1	13,0	6,9	5,0	2,7	95,0	50,7	187,3

Tab. 6: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 14 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%									
Pb	0,42	3,6	1,1	9,5	0,6	5,2	1,2	10,4	0,37	3,2	7,9	68,2	11,59
Cd	0,160	36,6	0,004	<0,1	0,080	18,3	0,024	5,5	0,059	13,5	0,11	25,2	0,437
Zn	0,24	<0,1	6,8	11,2	9,4	15,5	40,8	67,1	0,97	1,6	2,65	4,3	60,84
Fe	65,0	<0,1	98,0	<0,1	320	2,9	3700	33,7	41,0	<0,1	6760	61,5	10984
Mn	8,0	4,2	45,2	23,7	21,5	11,3	8,0	4,2	13,0	6,8	95,0	49,8	190,7

Tab. 7: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 15 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%											
Pb	0,57	3,9	1,0	7,0	2,7	18,9	1,2	8,4	1,13	7,9	7,7	53,8	14,3
Cd	0,180	38,9	0,006	1,4	0,080	17,3	0,039	8,4	0,070	15,1	0,087	18,8	0,462
Zn	0,22	<0,1	10,8	18,6	9,4	16,1	31,8	54,6	2,20	3,8	3,8	6,5	58,22
Fe	55,0	<0,1	106,0	1,1	750	7,7	3600	37,1	45,9	<0,1	5150	53,1	9706
Mn	7,0	3,6	51,6	26,4	26,5	13,6	9,0	4,6	5,0	2,6	96,0	49,2	195,1

Tab. 8: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 18 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%									
Pb	0,43	3,1	0,97	7,0	0,9	6,5	1,4	10,1	1,65	11,9	8,52	61,4	13,87
Cd	0,310	56,8	0,006	1,2	0,070	12,8	0,020	3,7	0,049	9,0	0,09	16,5	0,545
Zn	0,14	<0,1	11,2	17,1	7,5	11,5	40,5	61,9	5,01	7,7	1,05	1,6	65,4
Fe	45,0	<0,1	106,0	1,2	425	4,7	2950	32,4	93,0	1,0	5500	60,3	9119
Mn	5,0	2,6	49,0	25,1	27,0	19,8	12,5	6,4	14,0	7,2	88,0	45,0	195,5

Tab. 9: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 19 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%											
Pb	0,45	3,7	0,89	7,3	1,6	13,2	1,45	11,9	0,67	5,5	7,1	58,4	12,16
Cd	0,330	59,1	0,007	1,3	0,070	12,5	0,027	4,8	0,049	8,8	0,075	13,4	0,558
Zn	0,26	<0,1	11,2	16,1	8,8	12,6	39,1	56,2	0,90	1,3	0,85	1,2	69,61
Fe	57,5	<0,1	120,0	1,4	615	7,1	3310	58,2	24,0	<0,1	4550	52,4	8676,5
Mn	7,5	3,9	46,6	24,4	25,5	13,1	11,0	5,8	10,0	5,2	91,0	47,6	191,2

Tab. 10: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 20 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,36	3,1	0,94	8,0	0,8	6,7	1,13	9,6	0,78	6,6	7,8	66,0	11,81
Cd	0,140	32,2	0,006	1,6	0,07	18,6	0,024	6,4	0,045	12,0	0,091	24,2	0,376
Zn	0,26	<0,1	12,0	20,2	5,4	9,1	37,5	63,0	0,91	1,5	3,4	5,7	59,47
Fe	40,0	<0,1	126,0	1,5	350	4,1	3900	45,4	24,0	<0,1	4150	48,3	8590
Mn	10,5	5,7	46,8	25,5	18,5	10,1	9,0	4,9	14,0	7,6	85,0	46,3	182,8

Tab. 11: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 21 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,49	4,5	0,8	7,3	1,2	10,9	1,36	12,4	0,75	6,7	6,4	58,3	10,98
Cd	0,32	54,3	0,009	1,5	0,08	13,6	0,028	4,7	0,053	9,9	0,1	17,0	0,590
Zn	0,26	<0,1	13,0	18,9	5,3	7,7	43,8	63,8	3,50	5,1	2,85	4,1	68,71
Fe	52,5	<0,1	114	1,1	555	5,6	4000	40,1	64,0	<0,1	5200	52,1	9985,5
Mn	8,5	4,1	60,4	29,3	29,0	14,1	19,0	9,2	15,0	7,3	74,0	35,9	205,9

Tab. 12: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe P 23 - Nordsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%									
Pb	0,83	14,9	0,21	3,8	1,08	19,4	0,15	2,7	0,5	9,0	2,8	50,3	5,57
Cd	0,625	75,9	0,006	0,7	0,036	4,4	0,039	4,7	0,028	3,4	0,089	10,8	0,823
Zn	0,27	1,5	<0,01	<0,1	0,24	1,3	3,25	18,1	4,2	23,4	10,0	55,6	17,97
Fe	22,50	0,9	57,00	2,4	110,0	4,6	120,0	5,0	88,0	3,7	2010,0	83,5	2407,5
Mn	29,00	18,4	12,20	7,7	7,0	4,4	20,8	13,2	26,0	16,5	65,0	41,1	158,0

Tab. 13: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 1 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	2,00	27,2	0,67	9,1	1,08	14,7	0,15	2,0	0,66	9,0	2,80	38,0	7,36
Cd	0,585	70,1	0,006	0,7	0,053	6,3	0,049	5,9	0,055	6,6	0,087	10,4	0,835
Zn	0,36	0,8	0,01	< 0,1	0,38	0,9	26,25	61,4	0,75	1,8	15,0	35,1	42,75
Fe	22,5	0,3	37,2	0,5	242,0	3,4	1435,0	20,0	45,0	0,6	5400,0	75,2	7181,7
Mn	10,5	5,8	12,0	6,7	8,0	4,4	39,3	22,0	25,0	13,9	85,0	47,3	179,8

Tab. 14: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 2 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	1,80	15,0	0,90	7,5	0,45	3,7	0,20	1,7	0,58	4,8	8,10	67,3	12,03
Cd	0,495	61,1	0,006	0,7	0,066	8,1	0,062	7,7	0,100	12,3	0,081	10,0	0,810
Zn	0,19	0,3	>0,01	>0,1	4,75	6,9	36,25	53,0	1,75	2,6	25,5	37,3	68,45
Fe	63,0	1,6	33,6	0,8	345,0	9,0	2180,0	56,7	25,0	0,7	1200,0	31,2	3844,6
Mn	9,8	3,7	22,6	8,4	13,8	5,2	57,8	21,6	45,9	17,1	118,0	44,0	267,9

Tab. 15: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 3 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,40	5,2	0,39	5,1	0,24	1,8	0,13	1,7	1,30	16,9	5,25	68,1	7,71
Cd	0,680	72,3	0,004	0,4	0,045	0,8	0,045	0,8	0,100	10,6	0,066	7,0	0,940
Zn	0,23	0,6	<0,01	<0,1	0,22	0,5	10,8	26,5	13,94	34,3	15,50	38,1	40,70
Fe	55,0	0,4	86,6	0,7	431,0	3,4	1575,0	12,4	4618,9	36,5	5900,0	46,6	12665,6
Mn	24,5	8,1	70,6	23,4	16,5	5,5	37,8	12,5	72,9	24,1	80,0	26,5	302,3

Tab. 16: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 4 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,25	5,9	0,29	6,9	0,19	4,5	0,25	5,9	0,95	22,5	2,30	54,4	4,23
Cd	0,520	60,5	0,008	0,9	0,082	9,5	0,065	7,6	0,103	12,0	0,082	9,5	0,860
Zn	0,48	0,8	<0,01	<0,1	0,28	0,5	25,75	44,4	2,50	4,3	29,0	50,0	58,02
Fe	81,5	0,5	23,2	0,1	665,0	4,1	2225,0	13,9	55,0	0,3	13000,0	81,0	16049,7
Mn	19,0	4,4	25,0	5,7	57,0	13,1	51,3	11,8	100,0	22,9	184,0	42,2	436,3

Tab. 17: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 5 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	2,75	12,2	1,58	7,0	0,77	3,4	0,16	0,7	1,32	9,8	16,0	70,9	22,58
Cd	0,605	67,8	0,007	0,8	0,064	7,2	0,068	7,6	0,076	8,5	0,072	8,1	0,892
Zn	0,39	0,9	0,02	<0,1	1,30	3,0	23,50	54,8	0,67	1,6	17,00	39,6	42,88
Fe	85,0	0,9	12,0	0,1	313,0	3,2	1690,5	17,2	60,0	0,6	7650,0	78,0	9810,5
Mn	17,5	6,5	10,8	4,0	16,1	6,0	51,8	19,3	59,4	22,2	130,0	48,5	268,1

Tab. 18: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 6 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,85	12,7	0,28	4,2	0,78	11,6	0,26	3,9	0,23	3,4	4,30	64,2	6,70
Cd	0,640	75,7	0,004	0,5	0,038	4,5	0,039	4,6	0,031	3,7	0,094	11,1	0,846
Zn	0,32	1,8	<0,01	<0,1	0,18	1,0	5,90	33,7	1,10	6,3	10,00	57,1	17,51
Fe	33,5	1,8	20,0	1,0	135,0	7,1	300,0	15,7	74,0	3,9	1350,0	70,6	1912,5
Mn	41,4	27,9	21,4	14,4	13,8	9,3	17,3	11,6	14,5	9,8	40,0	26,9	148,5

Tab. 19: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 7 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	1,83	22,6	0,49	6,1	0,64	7,9	0,13	1,6	0,40	4,9	4,6	56,9	8,09
Cd	0,640	73,1	0,005	0,6	0,048	5,5	0,058	6,6	0,058	6,6	0,066	7,5	0,875
Zn	0,27	1,1	<0,01	<0,1	0,41	1,7	4,60	19,4	5,38	22,7	13,0	54,9	23,67
Fe	36,0	1,1	12,0	0,4	170,0	5,1	600,0	17,9	45,0	1,3	2480,0	74,2	3343,0
Mn	6,8	6,0	4,8	4,2	5,0	4,4	15,0	13,1	22,5	19,7	60,0	52,6	114,1

Tab. 20: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 8 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	1,18	14,4	0,73	8,9	0,380	4,7	0,20	2,4	2,13	26,1	3,55	43,5	8,17
Cd	0,650	60,0	0,009	0,8	0,069	6,4	0,045	4,2	0,233	21,5	0,077	7,1	1,083
Zn	0,23	0,4	<0,01	<0,1	0,27	0,4	29,3	47,0	1,55	2,5	31,0	49,7	62,36
Fe	36,0	0,7	7,80	0,1	570,0	10,4	3002,5	55,0	40,0	0,7	1800,0	33,0	5456,3
Mn	6,5	1,7	30,0	7,8	16,1	4,2	25,0	6,5	106,6	27,7	200,0	52,1	384,2

Tab. 21: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 9 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,85	10,1	0,50	6,0	0,31	3,7	0,11	1,3	0,53	6,3	6,10	72,6	8,40
Cd	0,740	72,8	0,007	0,7	0,068	6,7	0,046	4,5	0,082	8,1	0,074	7,3	1,017
Zn	0,20	0,7	<0,01	<0,1	0,29	1,0	8,00	29,0	1,13	4,1	18,0	65,1	27,62
Fe	92,0	1,0	13,6	0,1	420,0	4,6	1850,0	20,2	46,8	0,5	6800,0	74,5	9139,6
Mn	12,5	5,2	24,4	10,1	12,0	5,0	24,8	10,2	26,7	11,0	142,0	58,6	242,4

Tab. 22: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 10 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	1,37	19,0	0,40	5,6	0,38	5,3	0,01	0,1	0,44	6,1	4,60	63,9	7,20
Cd	0,585	69,6	0,006	0,7	0,056	6,7	0,054	6,4	0,043	5,1	0,096	11,4	0,840
Zn	0,95	4,5	<0,01	<0,1	0,29	1,4	5,35	25,3	0,58	2,7	14,00	66,1	21,18
Fe	50,0	1,6	16,2	0,5	212,5	6,9	400,0	29,3	30,0	1,0	1860,0	60,6	3068,7
Mn	11,0	11,2	8,8	9,0	5,5	5,6	5,8	5,9	23,8	24,3	43,0	43,9	97,9

Tab. 23: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe Li 11 - Ostsee

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,19	4,3	0,30	6,8	0,18	4,1	0,25	5,7	0,21	4,8	3,29	74,4	4,42
Cd	0,093	43,7	0,011	5,2	0,036	16,9	0,049	23,0	0,030	14,1	0,087	40,9	0,213
Zn	0,87	1,2	0,11	0,2	1,75	0,4	39,5	54,1	1,76	2,4	29,0	39,7	72,99
Fe	37,5	0,3	26,0	0,2	250,0	2,0	3525,0	28,4	95,0	0,8	8500,0	68,4	12433,5
Mn	1,5	0,4	112,6	30,4	114,0	30,8	37,5	10,1	15,0	4,1	90,0	24,5	370,6

Tab. 24: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 1 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,18	4,2	0,29	6,7	0,14	3,2	0,16	3,7	0,12	2,8	3,44	79,5	4,33
Cd	0,087	30,2	0,009	3,1	0,032	11,1	0,044	15,3	0,028	9,7	0,088	30,6	0,288
Zn	0,40	0,9	0,06	0,1	0,75	1,7	21,50	48,4	1,56	3,5	20,20	45,4	44,47
Fe	37,5	0,9	15,0	0,4	95,0	2,2	1015,0	23,5	45,0	1,0	3120,0	72,1	4327,5
Mn	1,5	1,1	38,2	27,6	16,5	11,9	8,5	6,2	11,5	8,3	62,0	44,9	138,2

Tab. 25: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 2 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,12	2,9	0,28	6,7	0,13	3,1	0,18	4,3	0,20	4,8	3,29	78,3	4,20
Cd	0,048	19,4	0,011	4,4	0,039	15,7	0,040	16,1	0,031	12,5	0,079	31,9	0,248
Zn	0,29	0,4	0,08	0,1	3,08	4,1	33,00	43,4	1,23	1,6	38,3	50,4	75,98
Fe	48,0	0,5	15,4	0,2	195,0	2,2	2025,0	22,8	82,0	0,9	6500,0	73,3	8865,4
Mn	1,0	0,2	143,6	32,1	166,5	37,2	28,0	6,3	11,5	2,6	97,0	21,7	447,6

Tab. 26: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 3 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,23	4,5	0,66	12,9	0,13	2,5	0,17	3,3	0,17	3,3	3,75	73,4	5,11
Cd	0,059	17,4	0,099	29,1	0,038	11,2	0,038	11,2	0,024	7,1	0,082	24,1	0,340
Zn	0,08	0,1	0,09	0,2	1,68	2,7	30,50	49,6	1,40	2,3	27,7	45,1	61,45
Fe	30,5	0,5	18,4	0,3	137,5	2,2	1540,0	24,3	75,0	1,2	4550,0	71,6	6351,4
Mn	3,0	1,6	65,6	35,3	21,5	11,6	10,0	5,4	7,5	4,0	78,0	42,0	185,6

Tab. 27: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 4 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,19	3,6	0,26	4,9	0,11	2,1	0,30	5,7	0,44	8,3	4,00	75,5	5,3
Cd	0,050	20,9	0,007	2,9	0,053	13,8	0,057	15,5	0,026	10,9	0,086	36,0	0,239
Zn	0,98	1,6	0,08	0,1	2,53	4,2	25,50	42,5	0,95	1,6	30,0	50,0	60,04
Fe	40,0	0,4	5,4	0,1	210,0	2,0	2045,0	19,1	52,0	0,5	8350,0	78,0	10702,4
Mn	1,0	0,2	90,2	16,7	250,0	46,3	64,0	11,9	16,5	3,1	118,0	21,9	539,7

Tab. 28: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 5 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,21	4,9	0,18	4,2	0,14	3,3	0,35	8,2	0,14	3,3	3,26	76,2	4,28
Cd	0,080	28,9	0,012	4,3	0,036	13,0	0,045	16,3	0,027	9,8	0,077	27,8	0,277
Zn	0,15	0,2	0,10	0,1	1,58	1,6	35,50	35,7	1,08	1,1	55,0	55,3	99,41
Fe	40,0	0,4	15,4	0,2	215,0	2,2	2510,0	26,1	32,0	0,3	6800,0	70,7	9612,4
Mn	1,0	0,3	58,0	15,5	171,5	45,7	45,0	12,0	10,0	2,7	90,0	24,0	375,5

Tab. 29: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 6 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,15	3,2	0,29	6,2	0,10	2,1	0,19	4,1	0,13	2,8	3,81	81,4	4,67
Cd	0,052	21,2	0,008	3,3	0,036	14,7	0,039	15,9	0,024	9,8	0,086	35,1	0,245
Zn	0,19	0,2	0,12	0,1	0,63	0,7	27,00	31,7	1,15	1,4	56,00	65,8	85,09
Fe	31,0	0,5	8,4	0,1	132,5	1,9	1515,0	22,1	60,0	0,9	5100,0	74,5	6846,9
Mn	1,5	0,7	64,4	28,3	46,5	20,5	24,0	10,6	10,0	4,4	81,0	35,6	227,4

Tab. 30: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 7 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,16	3,4	0,23	4,9	0,12	2,6	0,23	4,9	0,18	3,8	3,78	80,4	4,70
Cd	0,042	17,1	0,010	4,1	0,034	13,9	0,050	20,4	0,023	9,4	0,086	35,1	0,245
Zn	0,14	0,3	0,08	0,2	1,13	2,7	19,0	44,6	0,87	2,0	21,4	50,2	42,62
Fe	83,5	1,7	5,4	0,1	102,5	2,1	1005,0	20,5	52,0	1,1	3650,0	74,5	4898,4
Mn	2,0	0,9	34,8	16,0	80,5	37,0	26,5	12,2	6,8	3,1	67,0	30,8	217,6

Tab. 31: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 8 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,19	5,2	0,21	5,7	0,14	3,8	0,21	5,7	0,13	3,5	2,81	76,0	3,69
Cd	0,046	20,2	0,007	3,1	0,026	11,4	0,044	19,3	0,022	9,7	0,083	36,4	0,228
Zn	0,31	1,5	0,07	0,3	0,98	4,6	10,0	47,3	0,80	3,8	9,0	42,5	21,16
Fe	37,5	1,7	11,4	0,5	145,0	6,4	475,0	20,9	55,0	2,4	1550,0	68,2	2273,9
Mn	1,0	0,8	46,6	37,1	35,0	27,9	10,0	8,0	4,9	3,9	28,0	22,3	125,5

Tab. 32: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 9 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,43	8,5	0,19	3,8	0,13	2,6	0,20	4,0	0,11	2,2	4,00	79,1	5,06
Cd	0,058	22,3	0,007	2,7	0,024	9,2	0,047	18,1	0,016	6,2	0,108	41,5	0,260
Zn	0,25	0,8	0,07	0,2	0,69	2,1	22,50	69,6	0,80	2,5	8,0	24,8	32,31
Fe	30,5	1,3	8,0	0,3	25,0	1,1	225,0	9,5	175,0	7,4	1900,0	80,4	2363,5
Mn	10,5	11,7	4,8	5,4	3,5	3,9	30,0	33,4	4,9	5,5	36,0	40,1	89,7

Tab. 33: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 10 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,13	2,9	0,23	5,1	0,12	2,7	0,14	3,1	0,13	2,9	3,87	83,4	4,53
Cd	0,036	16,7	0,008	3,7	0,035	16,3	0,035	16,3	0,020	9,3	0,081	37,7	0,215
Zn	0,15	0,5	0,07	0,2	0,30	1,0	18,00	58,1	0,65	2,1	11,8	38,1	30,97
Fe	27,5	0,8	6,4	0,2	40,0	1,1	200,0	5,4	32,0	0,9	3370,0	91,7	3675,9
Mn	8,5	7,3	15,2	13,1	5,0	4,3	8,0	6,9	3,5	3,0	76,0	65,4	116,2

Tab. 34: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 11 - Antarktis

Kation	AK		CFK		LRFK		SRFK		OFK		LiFK		Ges.-Konz. ppm
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
Pb	0,11	5,0	0,19	8,7	0,10	4,6	0,12	5,5	0,11	5,0	1,56	71,2	2,19
Cd	0,040	18,4	0,008	3,7	0,023	10,6	0,043	19,8	0,022	10,1	0,081	37,3	0,217
Zn	0,15	0,5	0,06	0,2	0,25	0,8	17,5	54,4	0,78	2,4	14,0	43,5	32,74
Fe	19,0	1,2	7,0	0,4	47,5	2,9	160,0	9,7	20,0	1,2	1400,0	84,7	1653,5
Mn	1,0	1,7	3,0	5,1	2,0	3,4	7,0	11,7	3,5	5,9	43,0	72,2	59,5

Tab. 35: Konzentrationsverteilung der Schwermetalle in den Bindungsarten der Probe A 12 - Antarktis

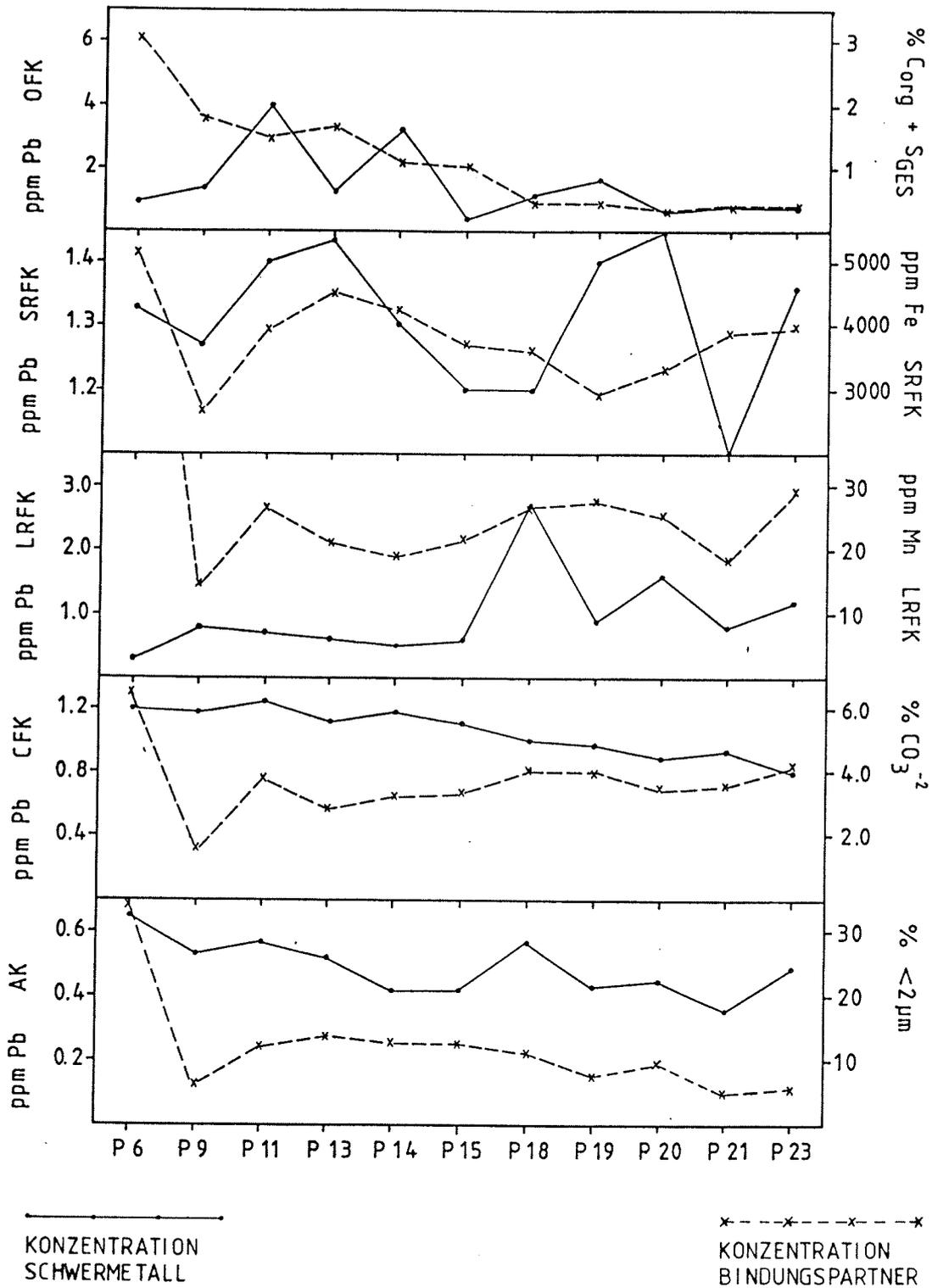


Abb. 1a: Blei mit Bindungspartnern in den Proben "P"

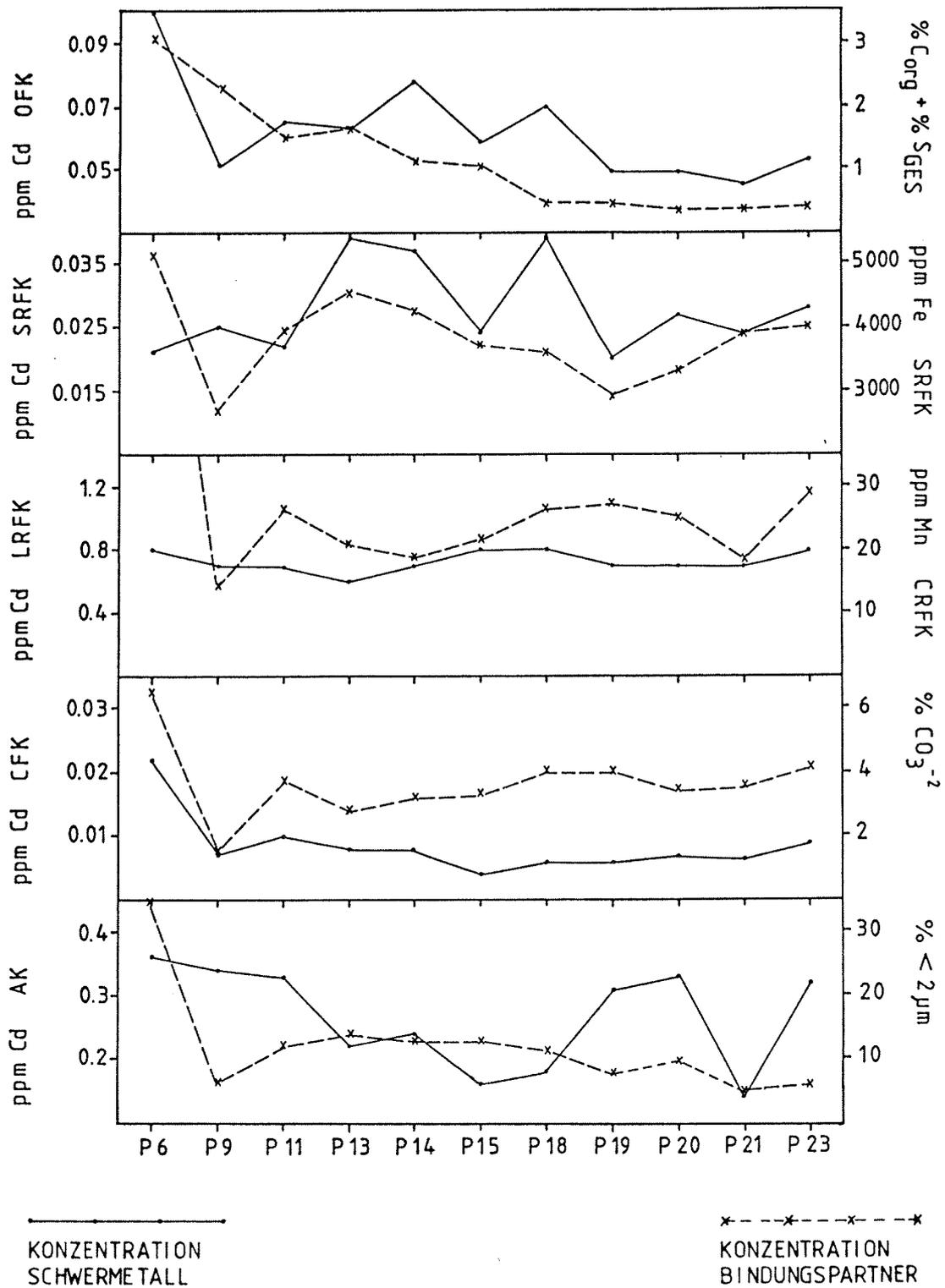


Abb. 1b: Cadmium mit Bindungspartnern in den Proben "P"

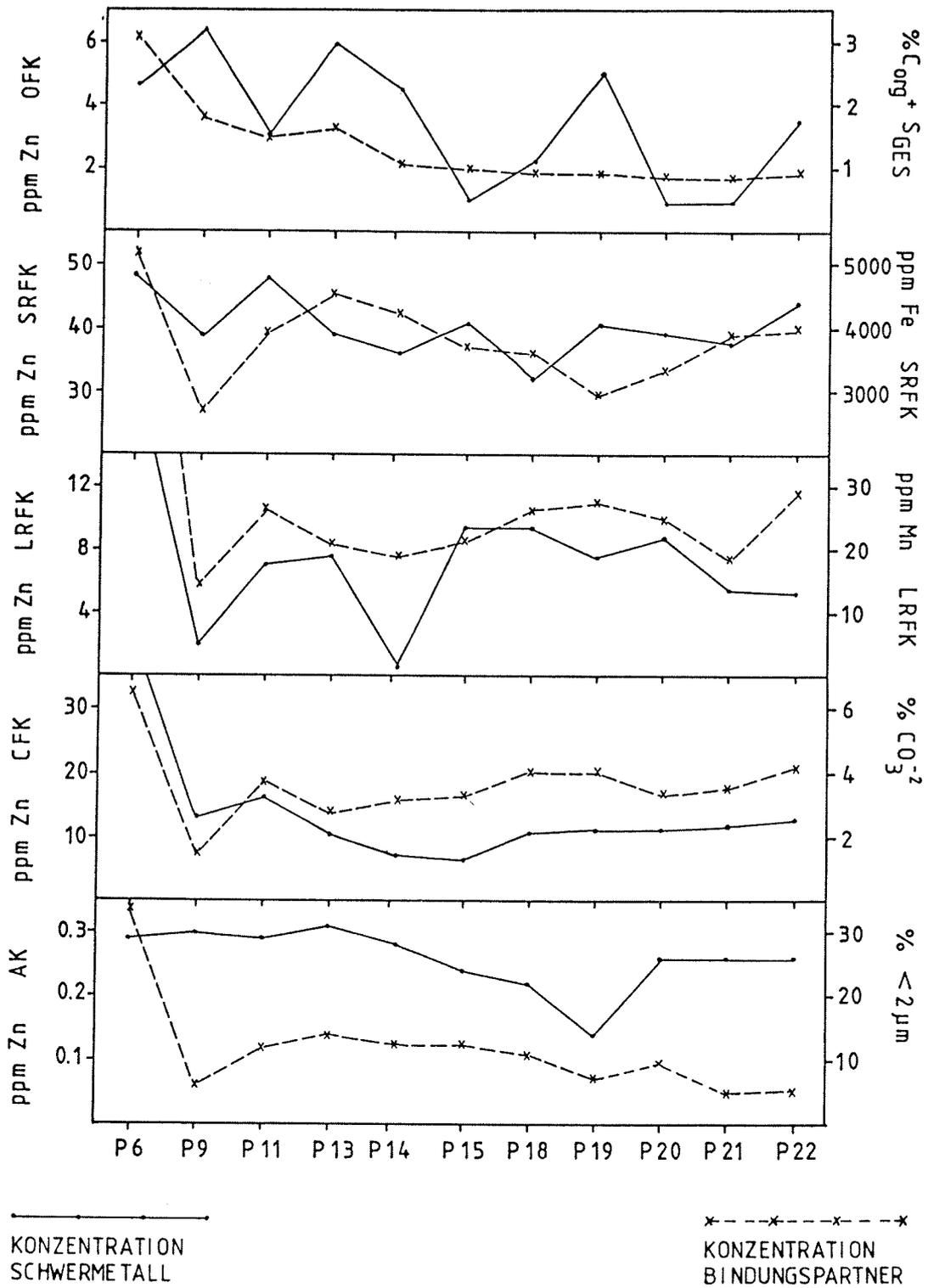


Abb. 1c: Zink mit Bindungspartnern in den Proben "p"

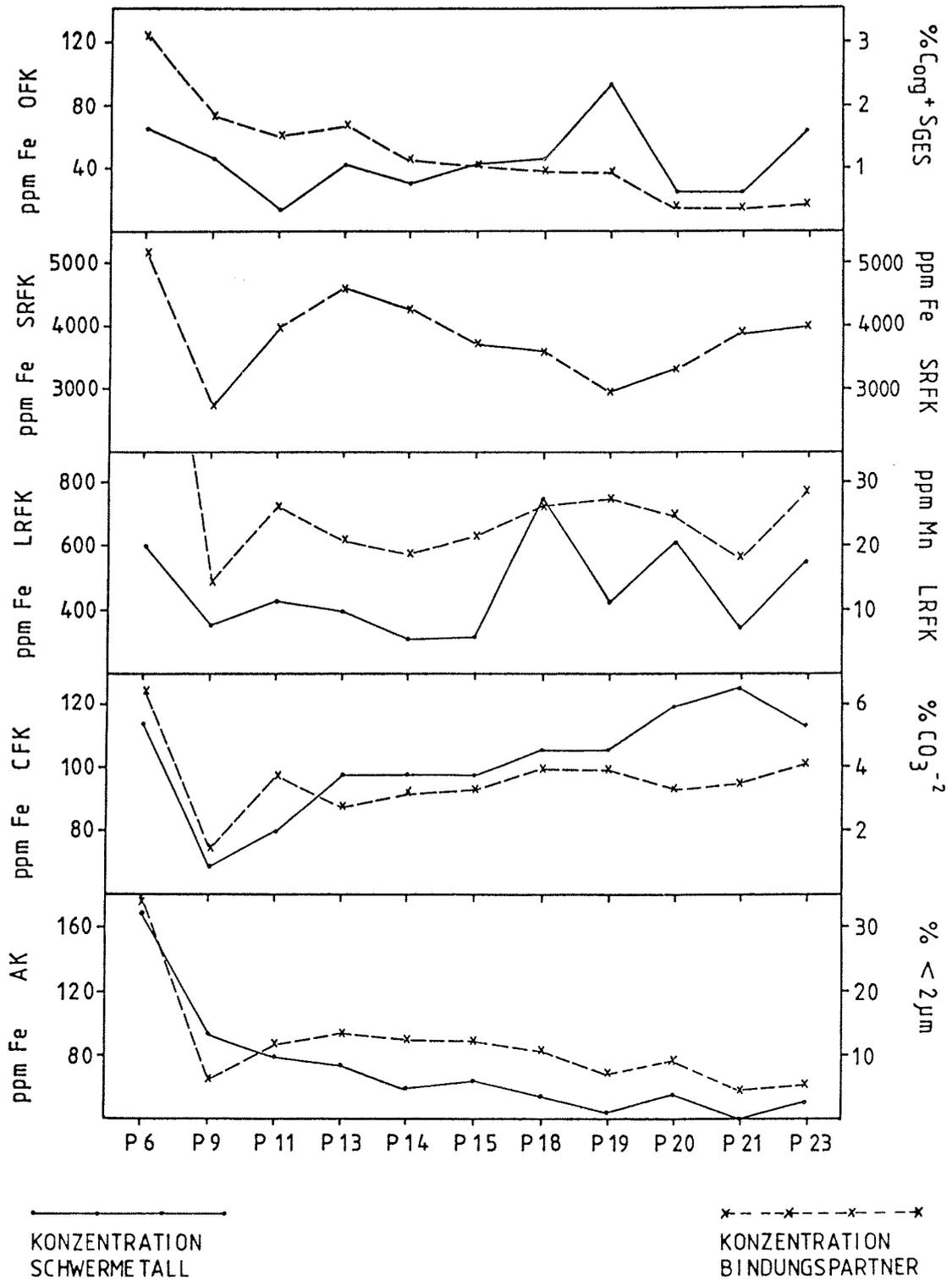


Abb. 1d: Eisen mit Bindungspartnern in den Proben "P"

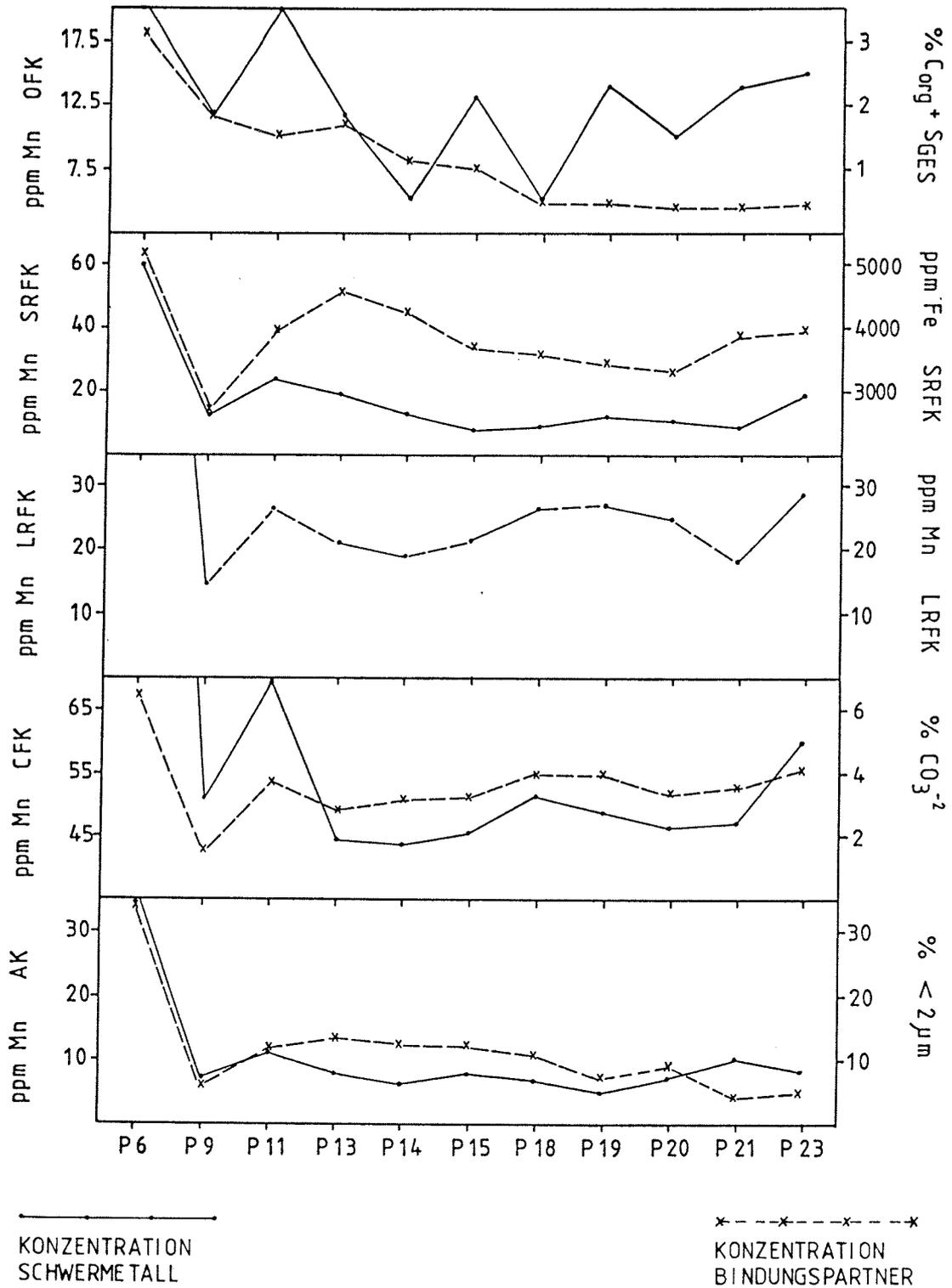


Abb. 1e: Mangan mit Bindungspartnern in den Proben "P"



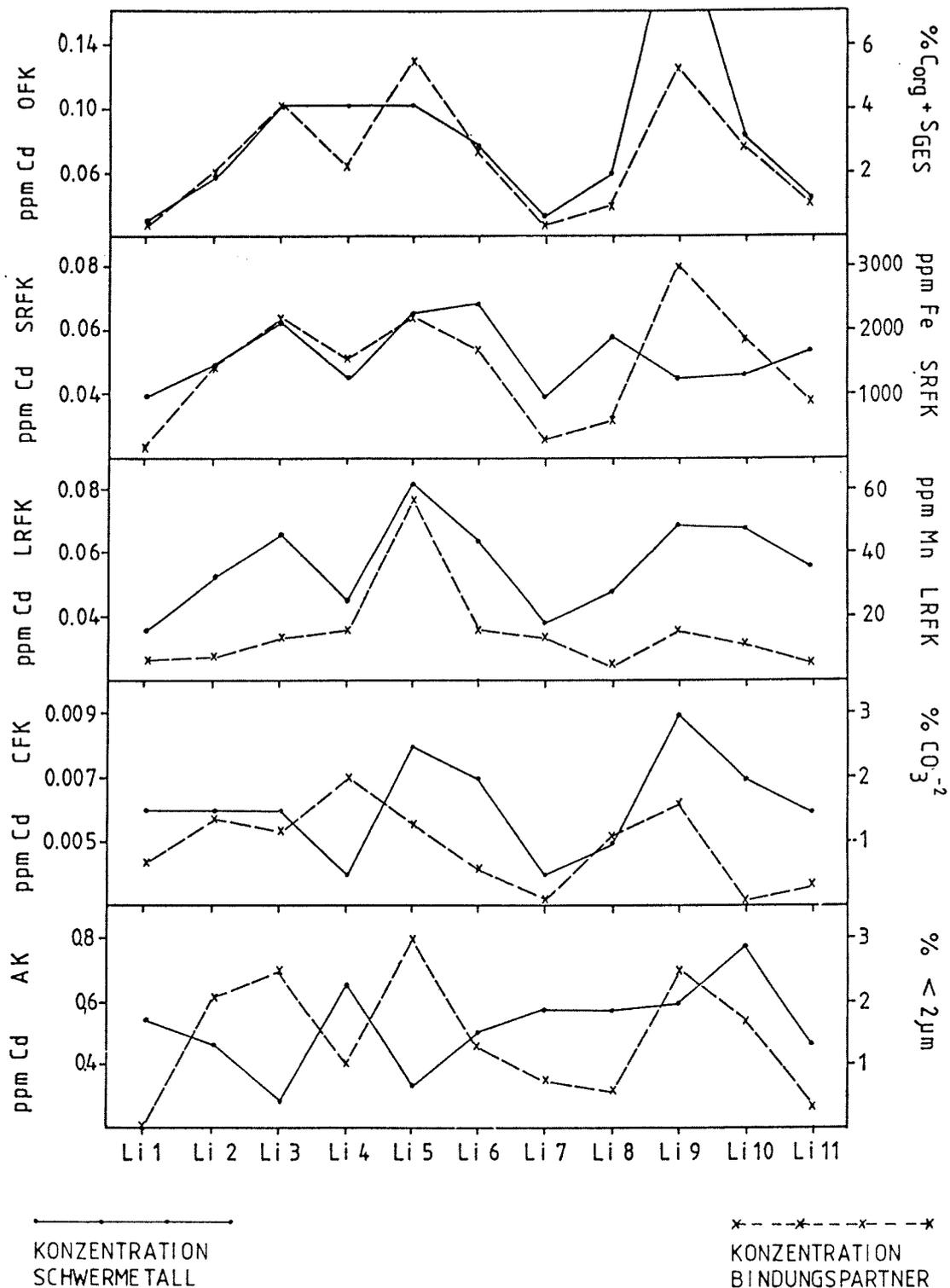


Abb. 2b: Cadmium mit Bindungspartnern in den Proben "Li"

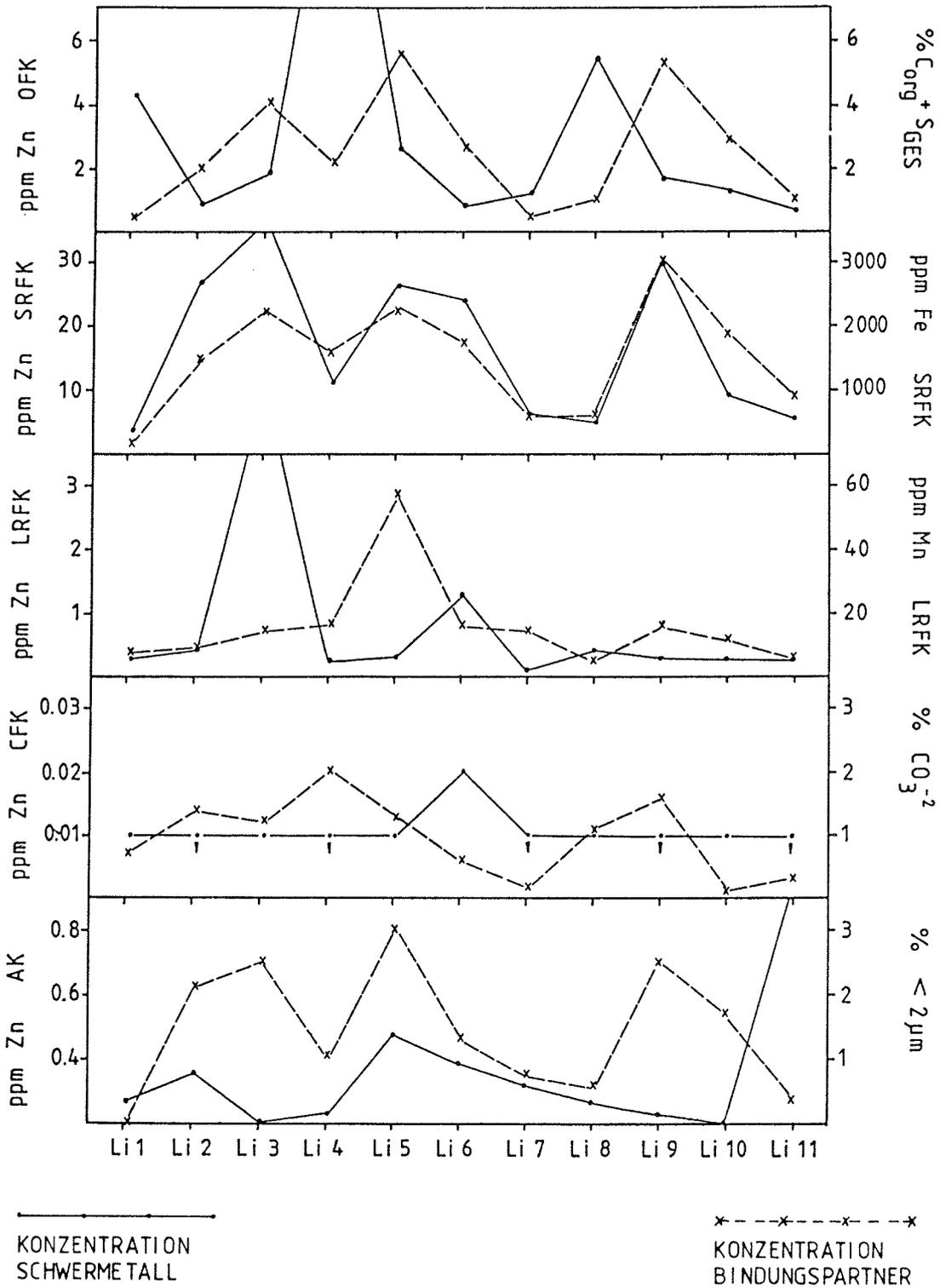


Abb. 2c: Zink mit Bindungspartnern in den Proben "Li"

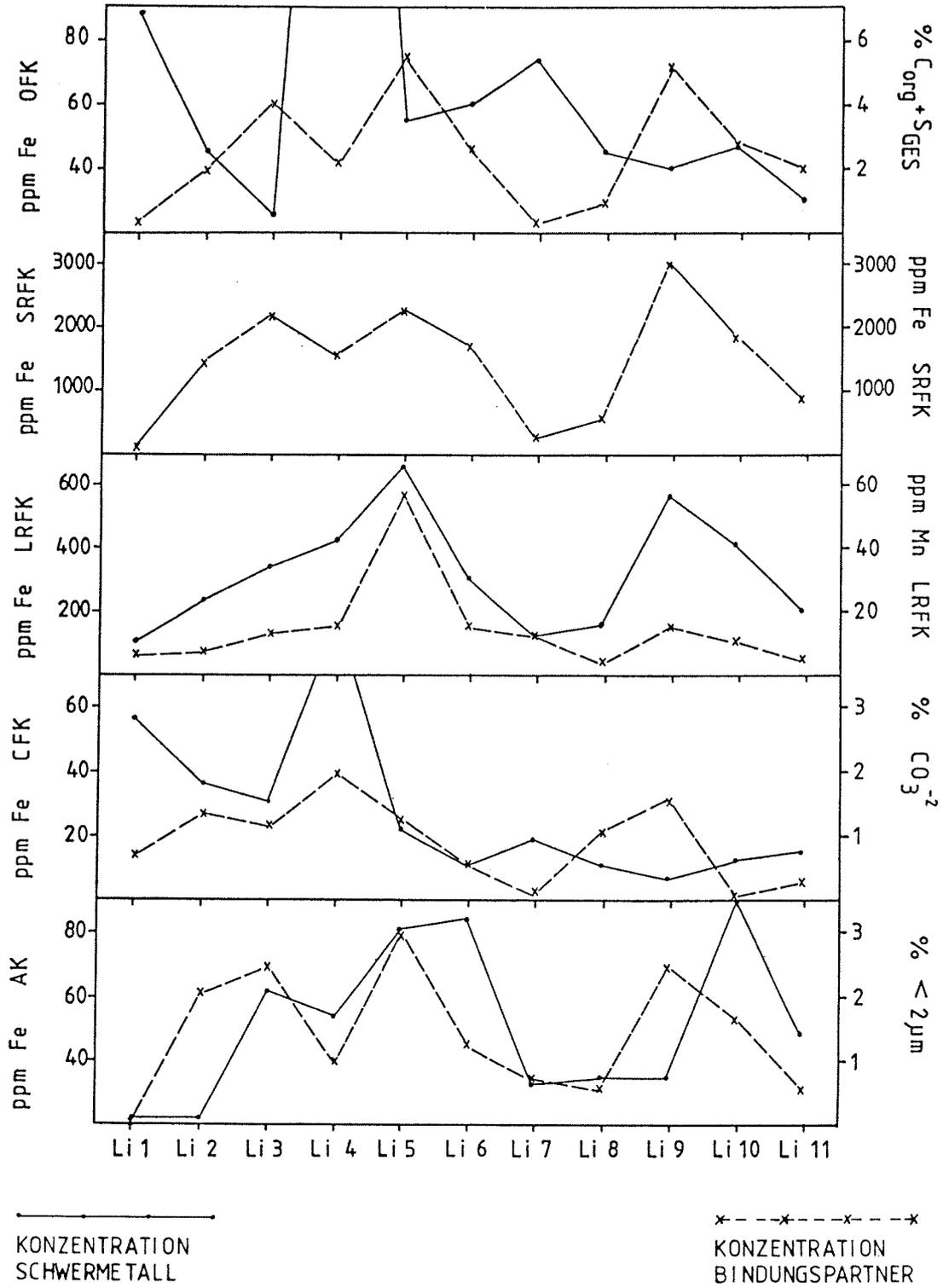


Abb. 2d: Eisen mit Bindungspartnern in den Proben "Li"

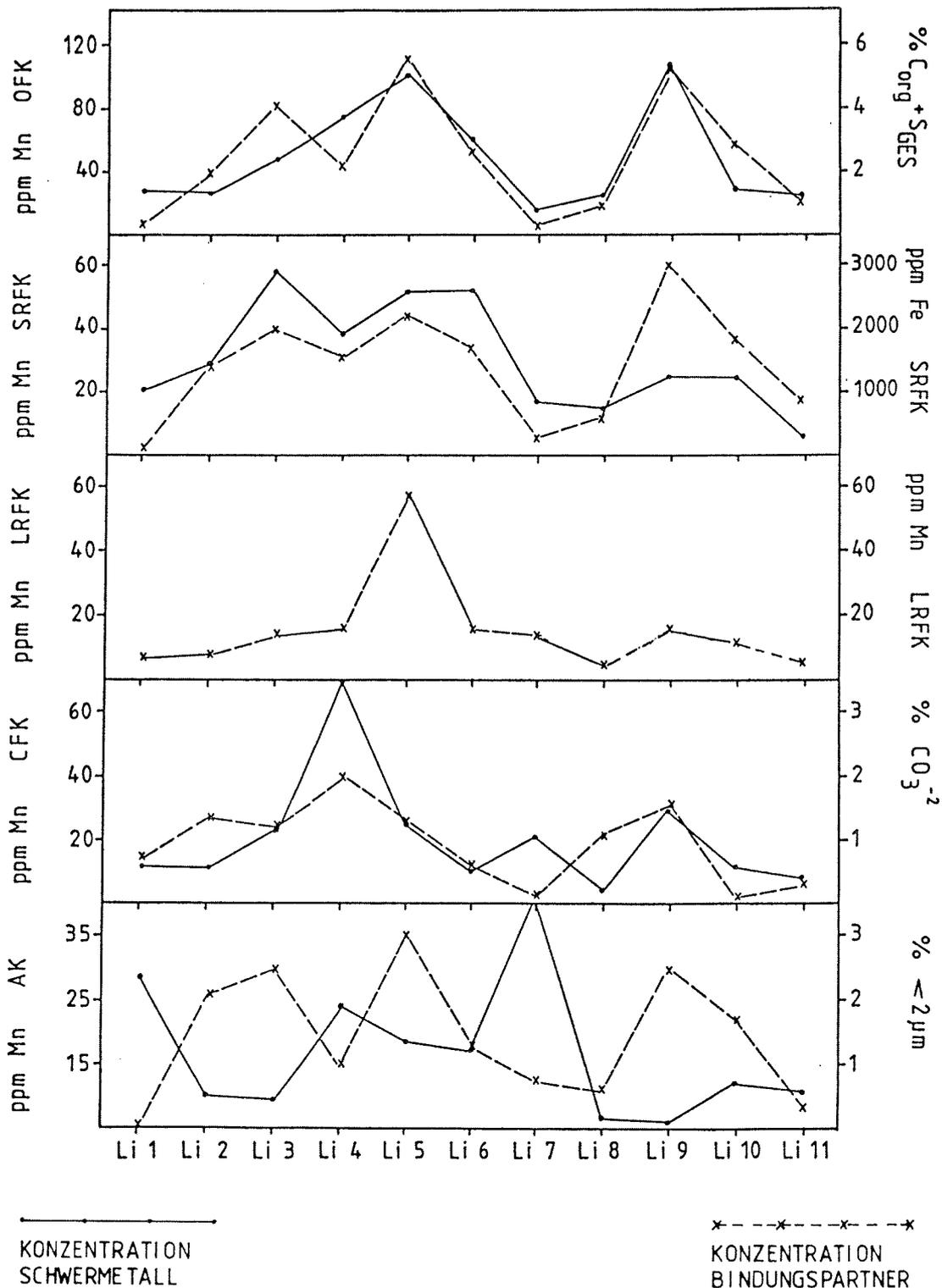


Abb. 2e: Mangan mit Bindungspartnern in den Proben "Li"