

**Meereswissenschaftliche Berichte**  
**MARINE SCIENCE REPORTS**

No. 28

- Das Oderhaff -

Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung  
und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars

von

Thomas Leipe, Jürgen Eidam, Reinhard Lampe, Hinrich Meyer,  
Thomas Neumann, Andrzej Osadczuk, Wolfgang Janke, Thomas Puff,  
Thomas Blanz, Franz Xaver Gingele, Dirk Dannenberger und Gesine Witt

**Institut für Ostseeforschung**  
**Warnemünde**  
**1998**

Die vorliegende Arbeit ist ein Gemeinschaftswerk von Wissenschaftlern des Institutes für Ostseeforschung Warnemünde, der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald und der Universität Szczecin (Polen).

Die Untersuchungen im Oderhaff wurden im Rahmen von verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten in den Jahren 1993 bis 1996 durchgeführt, welche in der Danksagung im einzelnen aufgeführt sind.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>Summary</b>	<b>5</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2. Gebietsbeschreibung</b>	<b>7</b>
<b>3. Methoden</b>	<b>12</b>
<b>4. Prozesse der rezenten Sedimentation</b>	<b>13</b>
4.1. Hydrographie, Milieu, Primärproduktion	13
4.2. Schwebstoffe	15
4.3. Oberflächensedimente	22
4.3.1. Kartierung ausgewählter geochemischer Parameter	23
4.3.2. Verteilung organischer Schadstoffe	26
<b>5. Subrezente Sedimentation (Kurzkerne)</b>	<b>29</b>
5.1. Vertikale Verteilung geochemischer Parameter	32
5.2. Hauptelement-Chemismus und Frühdiagenese	36
5.3. PCB's in Sedimentkernen	39
<b>6. Postpleistozäne Sedimentation (lange Kerne)</b>	<b>41</b>
6.1. Sedimentcharakteristik und Stratigraphie	41
6.2. Geochemie und Mineralogie der langen Sedimentkerne	44
<b>7. Schlußfolgerungen</b>	<b>50</b>
7.1. Sedimentologische Entwicklung des Haffs	50
7.2. Anthropogener Einfluß, Kontamination, Eutrophierung	51
7.3. Massenbilanzen	53
<b>8. Danksagung</b>	<b>56</b>
<b>9. Literaturverzeichnis</b>	<b>57</b>
<b>Anhang:</b>	
Karten und graphische Darstellungen zur Verteilung ausgewählter sedimentologischer und geochemischer Parameter im Oberflächensediment des Oderhaffs (zu Kapitel 4.3.).	

## **Zusammenfassung**

Mit Beginn der neunziger Jahre erlebte die naturwissenschaftliche Erforschung des Oderhaffs einen bedeutenden Aufschwung. Das Interesse an dieser Region war durch die veränderten politischen und ökonomischen Verhältnisse in Mittel- und Osteuropa beträchtlich gestiegen. Insbesondere die grenzüberschreitende Zusammenarbeit mit den polnischen Kollegen konnte dadurch intensiviert werden. Inzwischen liegen zahlreiche neue und interessante Ergebnisse vor, die im Rahmen von verschiedenen nationalen und internationalen Forschungsprojekten erzielt werden konnten. Mit der vorliegenden monographischen Zusammenstellung soll insbesondere der geowissenschaftliche Erkenntnisfortschritt für diese Region dokumentiert werden.

Das lagunenartige Becken des Oderhaffs ist die Pufferzone zwischen Flußeintrag der Oder von Süden und Wasseraustausch mit der vorgelagerten Ostsee im Norden. Damit kann das Haff als Modellregion zum Studium der physikalischen, geologischen, geochemischen und ökologischen Prozesse im Übergangsbereich Land-See betrachtet werden. Neben der Darstellung der holozänen geologischen Entwicklung des Gebietes ist der Rekonstruktion anthropogener Einflüsse besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden.

Die Arbeit enthält Informationen über Auswirkungen der Eutrophierung auf die Sedimente und den Grad der anthropogen bedingten Kontamination der Sedimente mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen. Durch Massenbilanzen von Sedimentmaterial, organischen Schadstoffen und Schwermetallen im Verhältnis zum Eintrag durch die Oder konnte gezeigt werden, daß die theoretische Pufferwirkung des Haffs im Mittel auf 10-20 Jahre begrenzt ist. Das heißt, daß die in das Oderhaff eingetragenen partikulären Schadstoffe, abgesehen von einem gewissen Anteil, der auf direktem Wege das Gebiet passiert, im Haff sedimentieren, resuspendieren und mit dem Ausstrom innerhalb von 10 bis 20 Jahren das Gebiet in Richtung Ostsee verlassen. Die fortgeschrittene Verflachung des Gewässers, der starke Rückgang benthischer Makroorganismen und der durch die Eutrophierung geförderte mobile Charakter des weichen Schlicks sind Ursachen, die zu einer Zunahme der Resuspension und damit zum Materialexport führen. Es liegt daher die Vermutung nahe, daß das Haff und auch ähnlich beschaffene andere Küstengewässer in zunehmendem Maße als Quellen für den Eintrag partikulären Materials in die Ostsee in Erscheinung treten.

## Summary

The beginning of the nineties saw a remarkable boom of scientific exploration of the Oderhaff area. The political and economical changes in middle and eastern Europe led to a general increase of interest in this region. Especially the co-operation of German and Polish scientists was intensified during this time. Now, after a few years of work in the frame of several national and international projects, a number of new and interesting results are available. Only some few aspects have been published in different scientific journals already. With the present monograph, we intend to give an overview of the geosciences progress and state-of-the-art in the investigation of this area.

The Oderhaff is a shallow lagoon-like basin that acts as a buffer between the Oder river discharge and the open Baltic Sea waters. Thus, the Oderhaff may be considered a model region to study physical, geological, geochemical, and ecological processes in the land-sea interaction zone. Besides the investigation of the Holocene geological development of the basin, we devoted special attention to the reconstruction and documentation of anthropogenic influences on the sedimentary deposits.

The presentation includes information about effects of eutrophication on sediment quality and the degree of contamination with heavy metals and organic pollutants. Using mass balance calculations we determined an average residence time of heavy metals and organic contaminants of only 10 to 20 years in the Oderhaff. This implies, that the predominant amount of those substances already passed the lagoon into the open Baltic Sea since the beginning of anthropogenic pollution in the last century. Because of continuous sedimentation in the past, the lagoon became more and more shallow. On the other hand, eutrophication caused an increase in sediment mobility because of the large amounts of deposited planktonic organic material and the decrease of the benthic macrophyto- and macrofauna- communities. At present time, the entire basin is characterized by intensive resuspension of the surface sediment layer (soft and fluffy material) during times of enhanced wind speed and wave action on the seafloor. This leads to an increase of material export by suspended matter transport to the sea.

## 1. Einleitung

Das Oderhaff, gelegen im Hinterland der Pommernbucht an der südwestlichen Ostseeküste, stellt eine Modellregion für das Studium holozäner geologischer Prozesse im Übergangsbereich vom Land zum Meer dar. Im Laufe seiner spät- und nacheiszeitlichen Entwicklung hat das Haff vom Schmelzwassersee über ein fluviatil-limnisches Urstromtal bis zur Brackwasserbucht der Ostsee mehrere Stadien durchlaufen, die sich aus den sedimentären Ablagerungen rekonstruieren lassen. In jüngster Zeit galt dem Oderhaff besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich seiner umweltgeochemischen und ökologischen Bedeutung als Pufferzone zwischen dem Festland und der Ostsee, da es die gesamte Fracht der Oder aufnimmt, bevor diese in die vorgelagerte Ostsee gelangt. Die durch den Fluß eingetragenen Nährstoffe und Schadstoffe, überwiegend anthropogenen Ursprungs, werden zumindestens zeitweilig in diesem lagunären Ästuar abgefangen und in einem intensiven biogeochemischen Stoffkreislauf "verarbeitet". Da das Oderhaff mit durchschnittlich 4 bis 6 m Wassertiefe sehr flach ist, wird der Transport und die Verteilung des eingetragenen und im Haff neugebildeten Materials besonders durch die Prozesse der Hydrodynamik und Sedimentdynamik (Resuspension, Sedimentdurchmischung) bestimmt.

Mit der vorliegenden Studie sollen neuere Ergebnisse geowissenschaftlicher Forschung im Oderhaff präsentiert werden, die im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten in den vergangenen Jahren entstanden sind. Vor dem Hintergrund der geologischen Entwicklung des Gebietes galt es insbesondere die jüngeren anthropogenen Einflüssen zu rekonstruieren, durch die das natürliche System beeinflusst und verändert wurde. Die Erfassung der historischen Abläufe und der gegenwärtigen Situation sind wesentliche Voraussetzungen für gezielte Maßnahmen zum Umweltschutz, für Monitoringprogramme und Prognosen.

## 2. Gebietsbeschreibung

Die Oder ist mit einer mittleren jährlichen Abflußrate von  $560 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw.  $17,7 \text{ km}^3/\text{a}$  der sechstgrößte Süßwasserzufluß zur Ostsee. Sie entwässert ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von  $118\,780 \text{ km}^2$ , die zu 89% auf polnischem, zu 6,3% auf tschechischem und zu 4,7% auf deutschem Territorium liegen. Ihr Abflußverhalten ist geprägt durch jährlich zwei Hochwasser, wobei die kurze Hochwasserwelle des Sommers durch entsprechende Niederschlagsereignisse, das längerandauernde Frühjahrshochwasser durch die Schneeschmelze hervorgerufen werden. Eine Ausnahme bildete das Sommerhochwasser vom Juli/August 1997, als zusätzlich zum normalen mittleren Abfluß in dieser Jahreszeit etwa  $5 \text{ km}^3$  Wasser das Oderhaff erreichten.

Die die Sedimentation in ihrem Mündungsbereich bestimmende partikuläre und gelöste Fracht des Flusses wird in den oberen und mittleren Flußabschnitten durch die Schwermetallbelastung aus dem Oberschlesischen Bergbau- und Industrievier (LEWANDOWSKI & PRZEWLOCKI, 1995) sowie durch diffus eingetragene Nährstoffe und organische Schadstoffe aus kommunalen Abwässern und dem vorwiegend agrarisch genutzten Einzugsgebiet beeinflusst. Angaben über die an verschiedenen Meßstellen im Bereich der Grenzoder ermittelten Konzentrationen und Frachten finden sich bei DEHMEL (1992). 1993 ist ein Sonderuntersuchungsprogramm durch

das Landesumweltamt Brandenburg veranlaßt worden, bei dem Schwermetalle und organische Spurenstoffe besonders berücksichtigt wurden (SONNENBURG, 1994). Die aus dem gesamten Odereinzugsgebiet stammenden abbaubaren Schadstoffe werden zu einem hohen Prozentsatz im Bereich der unteren Oder zwischen Widuchowa und Szczecin deutlich reduziert. Von besonderer Bedeutung für die in das Oderhaff eingetragene Fracht ist deshalb die Großstadt Szczecin (418 000 Einwohner), die ca. 20 km oberhalb der Mündung und noch in deren Rückstaubereich liegt. Mineralisierung und Akkumulation der durch kommunale und industrielle Abwässer eingetragenen Stoffe können auf diesem kurzen Abschnitt nur eingeschränkt vonstatten gehen und tragen in erheblichem Maße zur Belastung des Mündungsbereiches bei. Die für die vorliegende Arbeit zusammengestellte Tabelle 1 mit Angaben zur Fracht der Oder in das Haff bezieht sich u.a. auf die offiziellen polnischen Angaben (INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ, 1995), die recht gut mit den Werten der Second Baltic Sea Pollution Load Compilation (HELCOM, 1993) und den neueren Untersuchungen des Landesumweltamtes Brandenburg übereinstimmen.

Tabelle 1: Abschätzung des Flußeintrages der Oder in das Oderhaff.

Die Daten basieren auf Mittelwerten aus verschiedenen Quellen (s. Text).

Oder - Abfluß		17 km <sup>3</sup> /a
Flußeintrag	Konzentration	Fracht (t/a)
SPM - gesamt	25 mg/l	425000
<b>partikulär</b>	<b>(%)</b>	<b>(t/a)</b>
TOC	15,3	65.025
Glühverl.	32,6	138.550
TIC	0,4	1.700
Ca CO <sub>3</sub>	3,0	12.750
Si O <sub>2</sub>	41,3	175.525
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,5	36.125
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,8	28.900
Mn O	1,1	4.675
Mg O	0,8	3.400
Ca O	3,2	13.600
K <sub>2</sub> O	1,4	5.950
P	0,9	3.910
S	0,4	1.700
<b>partikulär</b>	<b>(mg/kg)</b>	<b>(t/a)</b>
Pb	200	85
Zn	1.700	700
Cu	120	50
Cd	9	4
Hg	2,5	1
<b>partikulär + gelöst</b>	<b>(mg/l)</b>	<b>(t/a)</b>
N-gesamt	2,94	50.000
P-gesamt	0,47	8.000

Eingedenk der Tatsache, daß solche Daten und Hochrechnungen mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet sind, müssen wir jedoch feststellen, daß gegenwärtig nichts besseres existiert und diese Daten eine unverzichtbare Grundlage für weitere Betrachtungen und Bilanzen sind.

Die Oder mündet bei Trzebiecz in das Oderhaff (Stettiner Haff), welches wiederum in das Große Haff mit 410 km<sup>2</sup> und das Kleine Haff mit 277 km<sup>2</sup> Fläche unterteilt wird (Abb.1 und Abb. 5 a). Beide Teilgewässer sind im Mittel nur etwa 4 m tief, die zentralen Bereiche werden von ebenen, kaum gegliederten Becken mit Wassertiefen von 5-6 m eingenommen. Im Bereich einer Einschnürung durch zwei von nord bzw. süd vorstoßende Haken (Woitziger bzw. Repziner Haken) grenzen die beiden Gewässerteile aneinander. Der zwischen den flachen Haken liegende Bereich stellt eine vermutlich spätpleistozän angelegte Schwelle dar, die durch eine tiefer ausgeformte Strömungsrinne mit Wassertiefen bis 8 m durchschnitten wird. Infolge der Retentionswirkung des Oderhaffs läßt die Strömungsgeschwindigkeit der einmündenden Wassermassen erheblich nach. Bei theoretischen Aufenthaltszeiten von 0,5 Monaten im Großen Haff bzw. 3 Monaten im Kleinen Haff sollten Schwebstoffe genügend Zeit zur Sedimentation und gelöste Stoffe zur Adsorption bzw. zur Einschleusung in den Partikelkreislauf über die Nahrungskette haben. Diese als Puffer- bzw. Filterkapazität zu bezeichnende Eigenschaft, ist nicht nur für das Oderhaff, sondern für alle inneren Küstengewässer im südbaltischen Raum charakteristisch.

Entwässert wird das Oderhaff über drei unterschiedlich lange Mündungsarme. Der größte Teil des Wassers (ca. 70%) fließt über die Swina ab, wobei die im Zuge des Ausbaus des Schifffahrtsweges nach Stettin gebaggerte "Kaiserfahrt" (heute "Piastowski-Kanal") mit Sicherheit die ursprünglichen Austauschverhältnisse durch die Alte Swina intensiviert haben dürfte. 15% des Oderwassers werden durch das Kleine Haff zum Peenestrom gelenkt, wo der Abfluß durch das Wasser der Peene (im Mittel 25 m<sup>3</sup>/s) ergänzt wird. Ebenfalls ca. 15% fließen durch die Dziwna, den östlichen Mündungsarm ab (vgl. CORRENS, 1979; BUCKMANN, 1997). Der Wasseraustausch in allen drei Mündungsarmen vollzieht sich nicht einseitig gerichtet. Ob Ausstrom vom Haff in die Ostsee (Pommersche Bucht) oder Einstrom in das Haff bzw. seine Mündungsarme von der Ostsee stattfinden, hängt ab von den Wasserstandsdifferenzen zwischen äußeren und inneren Gewässern, die in der Regel um 3-15 cm betragen, jedoch auch auf bis zu über einen Meter anwachsen können. Neben saisonalen Schwankungen als Ausdruck des jeweiligen Füllungsgrades sind vor allem windstaubedingte kurzfristige Wasserstandsänderungen für schnelle Fließrichtungswechsel maßgebend. Der Wasseraustausch findet daher höchst unregelmäßig statt, was die Berechnung von Austauschraten erschwert. Da wegen des Rückstaus die Intensität des Austausches zwischen Fluß- und Ostseewasser mit wachsender Entfernung von der Mündung in die Ostsee abnimmt, ist in dieser Richtung eine Abnahme des Salzgehaltes zu beobachten. Während im Mittel in der Pommerschen Bucht eine Salinität von 8 psu (practical salinity unit = ‰) beobachtet wird, beträgt diese im nördlichen Peenestrom rund 4 psu, im Kleinen Haff 1,5 psu und im Südtteil des Großen Haffs noch 0,5 psu. In entgegengesetzter Richtung vollzieht sich die Abnahme der Trophie der Gewässer (SCHMIDT, 1994). Abbildung 2 zeigt das Ergebnis einer Modellrechnung der Salzgehaltsverteilung im Oderästuar (nach MUTZKE & FENNEL, 1996).



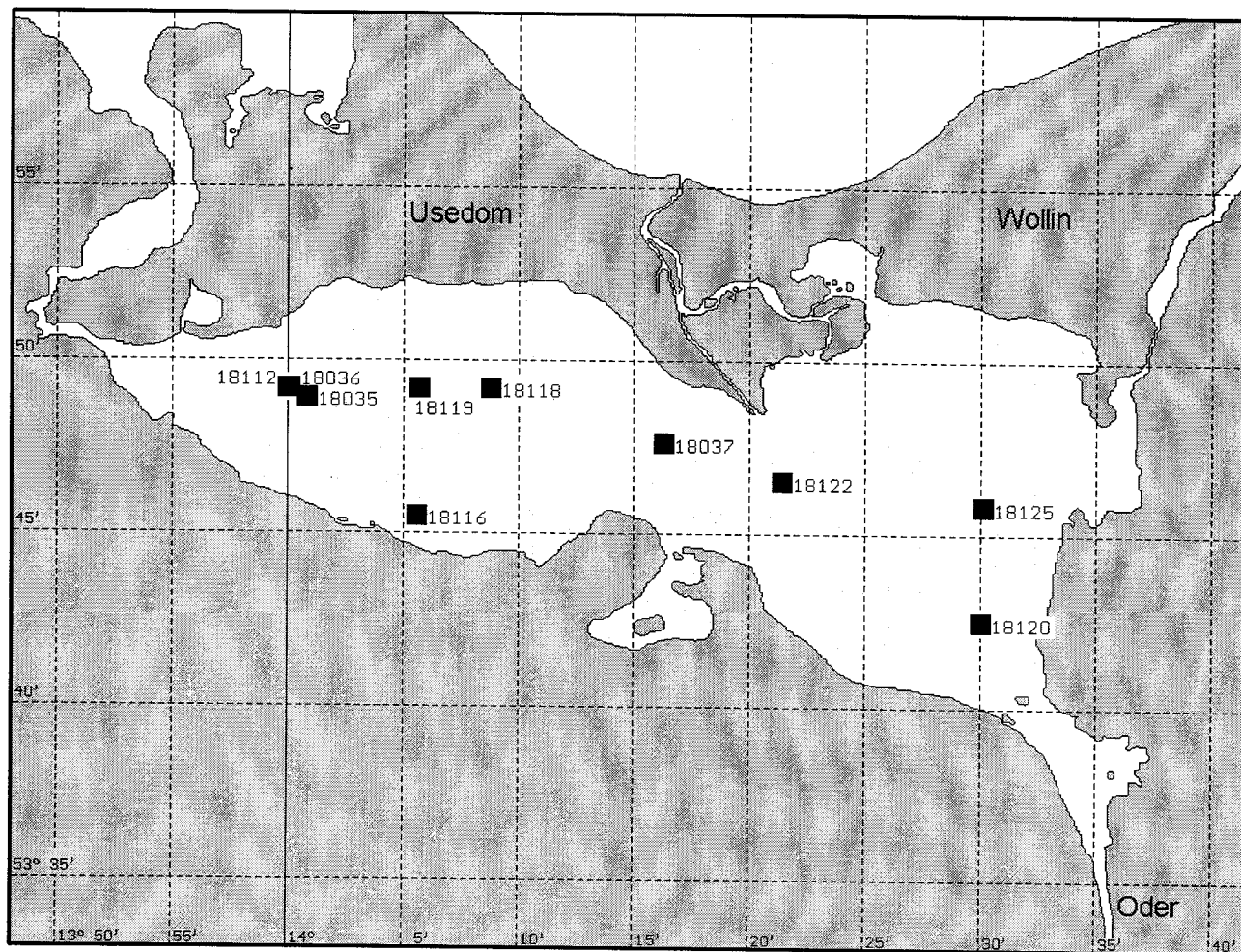


Abbildung 1. Das Oderhaff. Karte des Untersuchungsgebietes mit Stationen, an denen lange und kurze Sedimentkerne sowie Schwebstoffproben in den Jahren 1993 und 1994 entnommen wurden. Die Positionen der Oberflächensedimentproben für spezielle Kartierungsprogramme sind in den Abbildungen 5 a) und 7 a) zu ersehen.

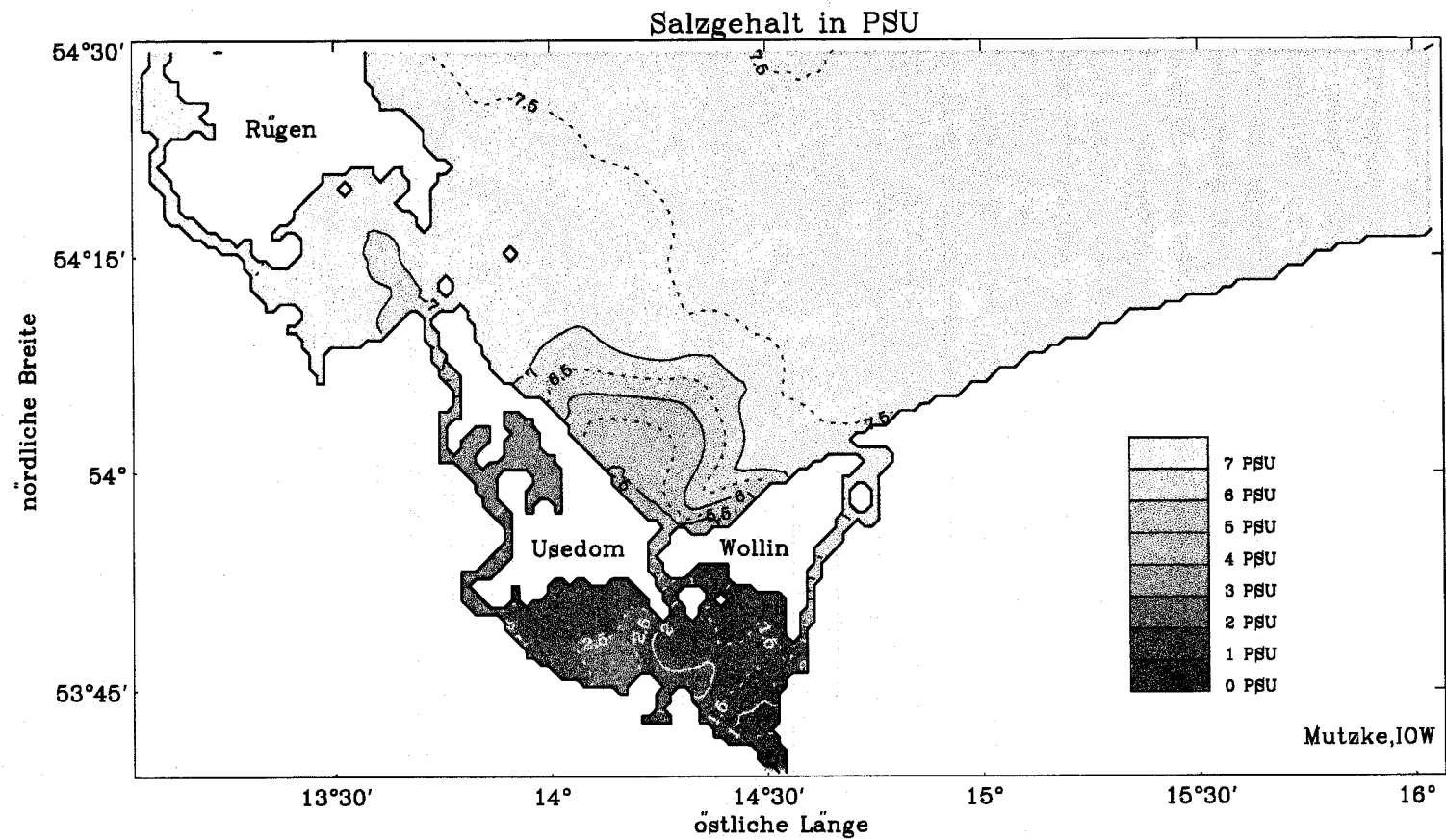


Abbildung 2. Modellrechnungen zur Verteilung des Salzgehaltes im Oberflächenwasser des Oderästuars (Beispiel nach MUTZKE & FENNEL, 1996).

Wegen ihres Übergangscharakters zwischen Süß- und Brackwasser hat CORRENS (1979) die Bodden- und Haffgewässer der mecklenburg-vorpommerschen Küste im Sinne der Definition von PRITCHARD (1969) als gezeitenlose, nicht geschichtete Ästuare charakterisiert. Die besondere morphogenetische Konstellation, die die Mündungsarme dieses Ästuars weitgehend durch holozäne Nehrungen und Haken einengt bzw. verlegt und der Wasseraustausch damit zunehmend behindert wurde, rechtfertigt aber auch den Gebrauch des Terminus Lagune.

Der gegenwärtige Kenntnisstand zur geochemisch-sedimentologischen Charakteristik und zum holozänen Akkumulationsgeschehen ist hinsichtlich der einzelnen Gewässerteile durchaus differenziert zu bewerten. Während auf polnischer Seite (Großes Haff) der Wissensstand letztmalig 1980 in einer Monographie (MAJEWSKI, 1980) zusammengefaßt wurde, in der auch der Aufbau der holozänen Sedimentdecke an Hand von Bohrdaten dokumentiert ist, lagen veröffentlichte Untersuchungen für den deutschen Teil (Kleines Haff) bisher kaum vor. Anhaltspunkte für genetische Fragestellungen bieten hier lediglich die Arbeiten von BRAMER (1978), KEILHACK (1912, 1928) und KLIEWE (1960), die den subaquatischen Bereich nur marginal behandeln. Zur Geochemie und Sedimentologie der Oberflächensedimente sind neuere Untersuchungen von LEIPE u.a., (1989) im Zuge einer vergleichenden Charakterisierung der Sedimente von verschiedenen Boddengewässern vorgelegt worden. 1993 wurden mehrere nationale und internationale Forschungsprojekte begonnen, die den Einfluß der Oder und ihrer Flußfracht auf das Oderästuar und den vorgelagerten Ostseebereich klären sollten. Erste und auf Teilaspekte abzielende Ergebnisse sind von LAMPE (1993), sowie von LAMPE & MEYER (1995), EIDAM u.a. (1995), LEIPE u.a. (1995) und OSADCZUK et.al. (1996) bereits publiziert worden. Sie werden im folgenden in erweiterter und zusammenfassender Weise mit dargestellt.

### 3. Methoden

Zur akustischen Aufnahme des Meeresbodens wurde ein Sedimentecholot (DESO 25) eingesetzt. Die Positionsbestimmung erfolgte mit dem GPS. Zur Gewinnung der Schwebstoffe wurden an den Stationen mittels Pumpe große Wassermengen (300 Liter) in Fässern entnommen und durch Absetzen und Zentrifugieren eingeeengt. Das partikuläre Material stand dann nach Gefriertrocknung für die Analysen zur Verfügung. Die Sedimentkerne wurden mittels Schwerelot und bei Bedarf mittels Vibrations-Kerngeräte entnommen und zunächst an Bord beschrieben. Die kurzen Sedimentkerne zur Untersuchung der obersten Horizonte wurden durchgängig in 1 cm bzw. 2 cm Segmente unterteilt. Aus den langen Sedimentkernen wurden in bestimmten Tiefen 1 cm Scheiben herausgetrennt. Alle Sedimentproben wurden gefriergetrocknet.

Gesamtkohlenstoff- und Schwefelgehalt wurden an den trocknen Proben mittels Infrarot-C-S-Analysator nach Verbrennung bei 1300°C direkt bestimmt, Karbonatkohlenstoff als CO<sub>2</sub> Messung nach Austreiben mittels Phosphorsäure. Der Opalgehalt wurde in Anlehnung an die Methode von MÜLLER & SCHNEIDER (1993) nach basischer Extraktion (1n NaOH) mittels Si-Nachweis im ICP-ESA quantifiziert. Die Haupt- und Spurenanalytik erfolgte an Totalaufschlüssen der Probensubstanz nach Behandlung mit verschiedenen Säuren (Salzsäure,

Salpetersäure, Flußsäure, Perchlorsäure) in der Druckbombe bei 180°C oder nach Schmelzaufschluß mit Li-Metaborat und Salpetersäurelösung. Zur Analytik kamen ICP-ESA- sowie AAS-Geräte zum Einsatz. Für die Partikelanalysen von Schwebstoffen stand ein Rasterelektronenmikroskop (Cam-Scan 44) mit EDX-Analysator und entsprechender Software zur automatischen Analyse (NX-Chem) zur Verfügung.

**Organische Schadstoffe:** Die in den vorliegenden Untersuchungen verwendeten Methoden der Probenaufarbeitung für die Bestimmung der CKW und PAH in marinen Sedimenten ist bei BALLSCHMITER & ZELL (1980), WITT (1995), BLANZ (1996) und DANNENBERGER (1996) ausführlich beschrieben. An die Probenaufarbeitung schließt sich eine Fraktionierung der einzelnen Verbindungen und Verbindungsklassen und eine Abtrennung von weiteren Matrixbestandteilen mittels HPLC an einer Silicagel-Säule an, wie sie bereits für die Aufarbeitung anderer mariner Probensubstanzen (Wasser, suspendiertes Material, Organismen) beschrieben wurde (PETRICK et al., 1988). Die quantitativen Bestimmungen der CKW erfolgte durch hochauflösende Kapillar-Gaschromatographie mit EC-Detektion (HRGC-ECD). Zur Bestimmung der PAH Konzentrationen wurde ein HPLC-System mit Fluoreszenz-Detektion verwendet.

Die mineralogischen Untersuchungen wurden mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie durchgeführt. Dazu wurden von den Sedimentproben Übersichtsaufnahmen an Pulverpräparaten sowie spezielle tonmineralogische Untersuchungen an Texturpräparaten der Fraktion kleiner 2 µm durchgeführt. Die Details des von uns verwendeten analytischen Verfahrens und der Auswertung der Spektrogramme sind bei PETSCHICK et al. (1996) und GINGELE & LEIPE (1997) beschrieben.

Hydrographische Messungen und ausgewählte hydrochemische Analysen wurden in regelmäßigen Abständen (mindestens monatlich) von der Arbeitsgruppe Boddenforschung des Geographischen Institutes der Universität Greifswald durchgeführt. Für die Geländearbeiten standen die Forschungsschiffe "Bornhöft" und "Prof. A. Penck" zur Verfügung.

## **4. Prozesse der rezenten Sedimentation**

### **4.1. Hydrographie, Milieu, Primärproduktion**

Die durch die Topographie des Gewässers vorgegebene Konstellation, daß ein Großteil des eingetragenen Oderwassers auf relativ kurzem Wege über die Swina in die Oderbucht gelangen kann, hat Auswirkungen sowohl auf das hydrographische als auch auf das Sedimentationsgeschehen. Im Umkreis der Odermündung bei Trzebiecz wird bei radialer Abnahme zum Haff hin noch eine weitgehend flußeigene Charakteristik beobachtet, wie relativ niedrige Chlorophyllgehalte, hohe Konzentrationen gelöster Nährstoffe sowie Schwebstoffe (SPM) und mittlere Gehalte organischer und karbonatischer Substanz. Im Winterhalbjahr wird diese Charakteristik infolge mangelnder biologischer Aktivitäten nur durch Verdünnung, Sedimentation bzw. Resuspension bereits akkumulierten Materials und nachfolgende

Vermischung verändert. Insbesondere die gelösten Nährstoffe, die in dieser Zeit in großen Mengen eingetragen werden, können das Haff ohne wesentliche Reduktion überwinden und in die Ostsee gelangen. Neuere Untersuchungen ergaben, daß im Winterhalbjahr bis zu 70% der jährlichen Stickstoff- und 50% der Phosphorfracht das Haff ohne wesentliche Transformation passieren können. Während der Vegetationsperiode erfolgt dagegen außerhalb des unmittelbaren Mündungsbereiches ein zunehmender Nährstoffverbrauch durch autotrophe Primärproduzenten, ohne daß in der Regel einer der essentiellen Nährstoffe völlig ausgenutzt wird. Im Umfeld der Swinepforte findet bereits wieder Verdünnung durch episodisch einströmendes Ostseewasser statt. Im Kleinen Haff ist die hydrographische Grundsituation etwas anders. Auf Grund des geringeren Oderwasser-, aber auch Ostseewasser-Einstromes haben die importierten Stoffe eine höhere Aufenthaltszeit, unterliegen kaum einer Verdünnung und werden einer intensiven Kreislaufnutzung auf der Schleife Adsorption / Produktion - Sedimentation - Resuspension / Remineralisation usw. unterzogen. Die Primärproduktion beträgt im Haff gegenwärtig etwa 500 g Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr (WESTPHAL et al., im Druck). In früheren Jahren, als noch mehr Nährstoffe (insbesondere Phosphat) in das Haff gelangten, war die Primärproduktion im Extremfall noch höher (bis  $1000 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ). Diese enorme Produktivität führt zu einer Verschiebung des pH-Wertes bis auf 9 und mehr Einheiten (Verbrauch von  $\text{CO}_2$  und  $\text{HCO}_3^-$ ) und es kommt unter diesen Bedingungen besonders im Kleinen Haff zu einer intensiven Calcitfällung. Da die produzierte Phyto-Biomasse nur zu einem geringen Teil in der Nahrungskette von den Konsumenten verbraucht werden kann, wird ein Großteil der organischen Substanz des Phytoplanktons sedimentiert und akkumuliert. Bezogen auf die Gesamtfläche des Oderhaffs werden in diesem Gewässer jährlich etwa 346.000 Tonnen Phytoplankton-Biomasse produziert! Zum Vergleich: Das entspricht fast der Gesamtmenge der partikulären Schwebfracht, die durch die Oder jährlich in das Haff eingetragen wird (s. Tabelle 1).

Im jahreszeitlichen Verlauf sind für die Algen, die zur Massenvermehrung neigen, folgende charakteristische Situationen beobachtet worden:

- Frühjahraspekt (März/April): Kieselalgen, hohe Biomassen, dominant im Greifswalder Bodden die kaltstenothermen Formen *Achnantes teniata*, *Melosira arctica*, *Chaetoceros* - Arten, im Kleinen Haff *Diatoma elongatum*, *Skeletonema subsalsum*, *Thalassiosira* -Arten.
- Sommeraspekt (Juli/August): gelöster anorganischer Stickstoff geht gegen Null,  $\text{N}_2$  Fixierung durch *Nostocacaceae* - *Anabaena lemmermannii* oder *Nodularia spumigena*, andere Cyanophyceen - häufig dominant die toxinbildende kockale *Microcystis aeruginosa* (im Haff mit  $\text{Biovolumina} > 15 \text{ mm}^3/\text{l}$ ), im Haff auch Kieselalgen *Coscinodiscus rothii*, Grünalgen *Oocystis cf. lacustris*.
- Herbstaspekt (Oktober/November): geringere Gesamtbiomassen, *Skeletonema* -Arten, *Oocystis* -Arten.

Zur Veranschaulichung der hydrographischen Grundsituation im Haff sind in der Tabelle 2 Minimal-, Mittel- und Maximalwerte von verschiedenen Parametern aufgeführt, die im Jahresgang und unter dem Einfluß der regionalen meteorologischen und hydrographischen Situationen entsprechenden Schwankungen unterliegen. Zu beachten ist jedoch, daß alle Parameter in dieser Tabelle sich nur auf die Meßreihen beziehen, die vom Schiff aus, in der

eisfreien Periode durchgeführt wurden. Unter den Besonderheiten des Haffs, im Vergleich zu anderen Boddengewässern und der vorgelagerten Ostsee, sind neben der hohen Produktivität die sehr geringen Salinitäten und die relativ hohen mittleren Wassertemperaturen zu erwähnen. Obwohl das Haff fast in jedem Winter mehr oder weniger lange zufriert (die Eisperiode kann von wenigen Wochen bis über 3 Monaten betragen), so setzt doch wegen der geringen Wassertiefe und des relativ kontinentalen Klimas in dieser Region, im Frühjahr eine rasche Erwärmung ein und im Sommer sind langanhaltende Warmwasserperioden zu beobachten. Der wegen der hohen Produktivität im Oberflächenwasser im Überschuß freiwerdende Sauerstoff nimmt mit der Tiefe ab und kann in hydrographischen Stagnationsperioden in den bodennahen Wasserschichten dann weniger als 1 mg O<sub>2</sub>/l betragen.

Tabelle 2: Variation hydrographischer Parameter im Oderhaff, Meßtiefe 1m, Daten aus dem Zeitraum 1993 bis 1996, eisfreie Periode (nach Originaldaten, Geograph. Inst. Univ. Greifswald).

Parameter	Einheit	Minimum	Mittel	Maximum
Salinität	psu	0,56	1,39	2,91
Temperatur	°C	1,2	15	22,8
Sauerstoff	mg O <sub>2</sub> /l	7,9	11,8	17,6
Sauerstoff	% Sätt.	84	117	199
Sichttiefe*	m	0,2	0,9	1,7
pH		6,8	8,4	9,5

\* Die Sichttiefe kann in Extremfällen, besonders im September, bis über 3m betragen. Dieses Phänomen ist lokal begrenzt auf den spätsommerlichen Zusammenbruch von Algenblüten in hydrographisch ruhigen Perioden und durch die Filtrationsleistung von Muschelbänken (*Dreissena*) zurückzuführen.

Weitere Informationen über die hydrographischen und hydrochemischen Verhältnisse im Oderhaff und in den angrenzenden Küstengewässern sind den Gewässergüteberichten des Landes Mecklenburg-Vorpommern zu entnehmen. Beispielhafte Untersuchungen zur Nährstoff-situation in der Pommernbucht, im Einflußbereich des Oderwassers in die Ostsee, finden sich bei Pastuszak et al. (1996).

#### 4.2. Schwebstoffe (suspendiertes partikuläres Material, SPM)

In einem hocheutrophen, bioproduktiven Gewässer, das zudem noch sehr flach ist und in dem die Sedimentoberfläche einer häufigen Resuspension unterliegt, sind hohe Schwebstoffkonzentrationen und rasche Fluktuationen zu erwarten. Somit werden die Schwebstoffe als Komponente des biogeochemischen Stoffkreislaufes und des partikelgebundenen Transportes von Stoffen eine ganz wesentliche Rolle spielen. Erste Untersuchungen zu den Schwebstoffen im Einflußbereich der Oder wurden von TOBIÉS (1990), KRAUSE (1992), STÖBLING (1995), FIETZ (1996) und LEHMANN u.a. (1996) durchgeführt.

Im Mittel konnten im Oderhaff 20-25 mg SPM pro Liter gemessen werden. Diese Werte sind in etwa der mittleren Schwebstoffkonzentration des Oderwassers vergleichbar (DEHMEL, 1992) und liegen bei ca. dem Zehnfachen der durchschnittlichen SPM-Konzentrationen in der offenen Ostsee (GEORGI, 1985; NIEDERMEYER, 1987).

Die Zusammensetzung der Schwebstoffe wird durch einige Hauptkomponenten bestimmt, die sich wie folgt beschreiben lassen:

- Organische Substanzen im weitesten Sinn, die als allochthoner Detritus eingeschwemmt werden und autochthone Biomasse, die vom Plankton und vom Benthos, einschließlich der Mikroorganismen, im Wasserkörper oder Sediment neu gebildet wird.
- Biogene, anorganische Mineralphasen (z.B. Skelettopal der Diatomeen oder Kalkschalenreste von Organismen).
- Mineralischer Detritus, der überwiegend aus Silikatmineralen (Quarz, Feldspäte, Tonminerale) besteht und einschließlich der akzessorischen Mineralphasen die ganze Palette von Verwitterungs- und Abtragungsprodukten aus dem Einzugsgebiet der Oder repräsentiert. In der Tonmineralfraktion der Schwebstoffe der Oder und des Oderhaffs konnten bislang Kaolinit, Smectit, Chlorit, Illit und ein eisenreiches Illit-Wechselagerungsmineral nachgewiesen werden.
- Authigene mineralische Neubildungen bzw. Umbildungen. Dazu gehören eine Reihe von Oxihydraten bzw. Oxyden, besonders des Eisens und des Mangans, oder Sulfide (z.B. Pyrit), aber auch Karbonate (Calcit), die je nach den sich ändernden Milieubedingungen (Redoxpotential, pH u.a.) neu gebildet werden, sich umwandeln oder wieder in Lösung gehen.
- Untergeordnet können auch technogene Partikel z.B. Flugasche in Schwebstoffen nachgewiesen werden.

Sowohl im Jahresverlauf als auch regional können die Schwebstoffe im Oderhaff sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein. Das hängt zum größten Teil mit der Saisonalität bestimmter biologischer Prozesse zusammen. Die Kieselalgenblüten, die besonders im Frühjahr zu beobachten sind, bedingen ein massenhaftes Auftreten der Kieselopalschalen. Das sommerliche Produktivitätsmaximum des Phytoplanktons führt neben einer Erhöhung des Anteils organischen Materials zu einem pH-Anstieg im Wasser und zur Fällung von Calcit in der Schwebfracht (vgl. LEIPE u.a. 1995; NIESSEN & STURM, 1987). Gemessene pH-Werte bis über 9 entstehen durch den Verbrauch von  $\text{CO}_2$  und  $\text{HCO}_3^-$  durch die Primärproduktion des Phytoplanktons, so daß sich das Karbonatgleichgewicht zum  $\text{CO}_3^{2-}$  verschiebt. Bei Anwesenheit genügender Mengen gelösten Calciums kommt es dann zu einer Calcitfällung, die auch durch die höheren Wassertemperaturen im Sommer gefördert wird.

Die organische Substanz ist als neugebildete Biomasse im Plankton und als organischer, resuspendierter Detritus stets als eine Hauptkomponente in den Schwebstoffen des Haffs anzutreffen. Der Gehalt an mineralisch-detritischen Phasen hängt neben dem direkten Eintrag durch die Oder im wesentlichen von der Resuspensionswirkung des Wassers ab (Strömung, Seegang). Die Variabilität dieser mineralischen Komponenten ist jedoch regional als auch saisonal relativ gering. Diesbezüglich ist von einem mehr oder weniger kontinuierlichen Eintrag durch die Oder auszugehen, der sich als "background" der Schwebstoffzusammensetzung darstellt. Dieses Grundmuster wird dann im Haff durch einige Neubildungen sehr stark

modifiziert. Kieselopal, Calcit und organische Substanz zeigen große saisonale Schwankungen und verändern damit die relativen Anteile in der Zusammensetzung der Schwebstoffe.

In ruhigen hydrographischen Perioden und nach den Hauptphasen von Algenblüten, die dem Wasser die Nährstoffe entziehen und absinken, können Klarwasserstadien eintreten, die zum Teil "fleckenhafte" (patchiness) ausgebildet sind und durch sehr geringe Schwebstoffkonzentrationen gekennzeichnet sind (Sichttiefen bis über 3 Meter, z.B. im September 1995 und 1997). Unterstützt wird dieser Prozess auch durch die Filtrationsleistung der Muschelbänke (*Dreissena polymorpha*), die in den sandigen Randbereichen des Haffs weit verbreitet sind können.

Die folgende Graphik gibt einen Überblick zu den Hauptkomponenten der Schwebstoffe im Oderhaff (Abb. 3). Dabei fällt die bereits erwähnte Variabilität in der Zusammensetzung der Schwebstoffe auf, die sowohl in jahreszeitlichen, als auch in regionalen Unterschieden begründet ist. So tritt die Calcitfällung offenbar nicht in gleicher Intensität bzw. gleichzeitig im gesamten Haff auf und auch die Anteile organischen Materials und Kieselopals können zum gleichen Zeitpunkt unterschiedlich sein (Beispiele A und E in Abb. 3). Der Vergleich der Schwebstoffe mit der Zusammensetzung des Schlicksedimentes macht deutlich, daß die biogenen Phasen Opal und organisches Material sowie der authigene Calcit "zusätzlich" als Schwebstoffkomponenten auftreten und dann auch die gesamt-SPM Menge erhöhen. Die Probe E in Abb. 3 verdeutlicht, daß in diesem Bereich die Zusammensetzung der Schwebfracht weitgehend der des Sedimentes entspricht. Es ist zu erwarten, daß solche Verhältnisse besonders in den Wintermonaten auftreten, wenn die biologischen Prozesse auf einem sehr niedrigen Niveau verlaufen und windbedingte Resuspension dominiert. Unter Eisbedeckung (die im Oderhaff mehrere Monate andauern kann) ist zu vermuten, daß dann nur noch der Flußeintrag und die Strömungen für die Schwebstoffverteilung im Haff verantwortlich sind. Diesbezüglich liegen erste Untersuchungen vor, die zeigen, daß die mittlere Partikelgröße der Schwebstoffe unter dem Eis nur bei 1,5 µm liegt, während sonst die Schwebstoffpartikel (nicht die großen Aggregate) im Mittel über 3 µm groß sind. In der mineralogischen Zusammensetzung fanden sich aber keine nennenswerten Unterschiede zu den Proben vom Herbst vor der Eisbedeckung.

Als Charakteristikum für die Schwebstoffe im Haff muß der hohe Gehalt an Mangan erwähnt werden. Dieses Element wird im anoxischen Bereich des Sedimentes mobilisiert (siehe im Kapitel Sedimentchemismus, weiter unten) und im oxischen Bereich als  $Mn^{4+}$  Oxyd wieder ausgefällt. Dadurch ergibt sich eine Anreicherung von Mn in der Schwebfracht und im oberflächennahen Sedimenthorizont, welcher besonders der Resuspension ausgesetzt ist. Diese Manganoxyde konnten mikroanalytisch als selbständige Partikel und auch als Überzüge auf anderen mineralischen Partikeln und auch auf der organischen Substanz nachgewiesen werden.

Eine bemerkenswerte Besonderheit in der partikulären Zusammensetzung der Schwebstoffe im Haff ist das gelegentliche Auftreten von komplex zusammengesetzten Sulfaten und Phosphaten. Da wir bei unseren Untersuchungen von Schwebstoffen bislang nirgends solche Partikel feststellen konnten und auch aus der Literatur keine solchen Beobachtungen vorliegen, lag die Vermutung nahe, daß es sich nicht um natürliche Bildungen handelt. Eine plausible



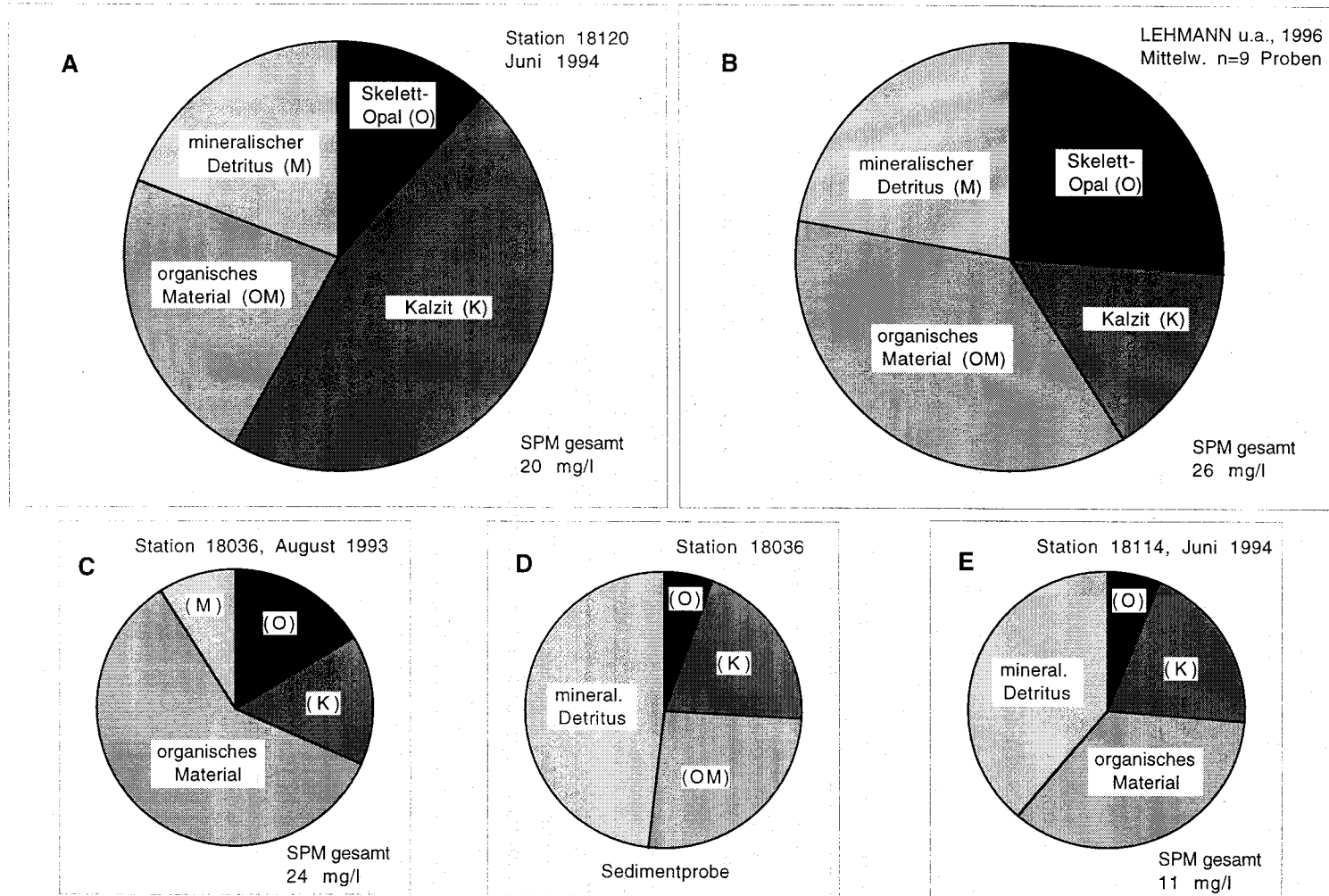


Abb. 3. Hauptkomponenten der Schwebstoffe im Oderhaff. Dargestellt sind Beispiele von Beprobungen während der Ausfahrten im August '93 und Juni '94 (A,C,E), die mittlere Zusammensetzung von 9 verschiedenen Proben (B) aus den Jahren '92 bis '95 nach LEHMANN u.a. (1996) und eine Sedimentprobe zum Vergleich (D). Die Anteile beziehen sich auf 100 % Trockensubstanz. Weitere Erläuterungen im Text.

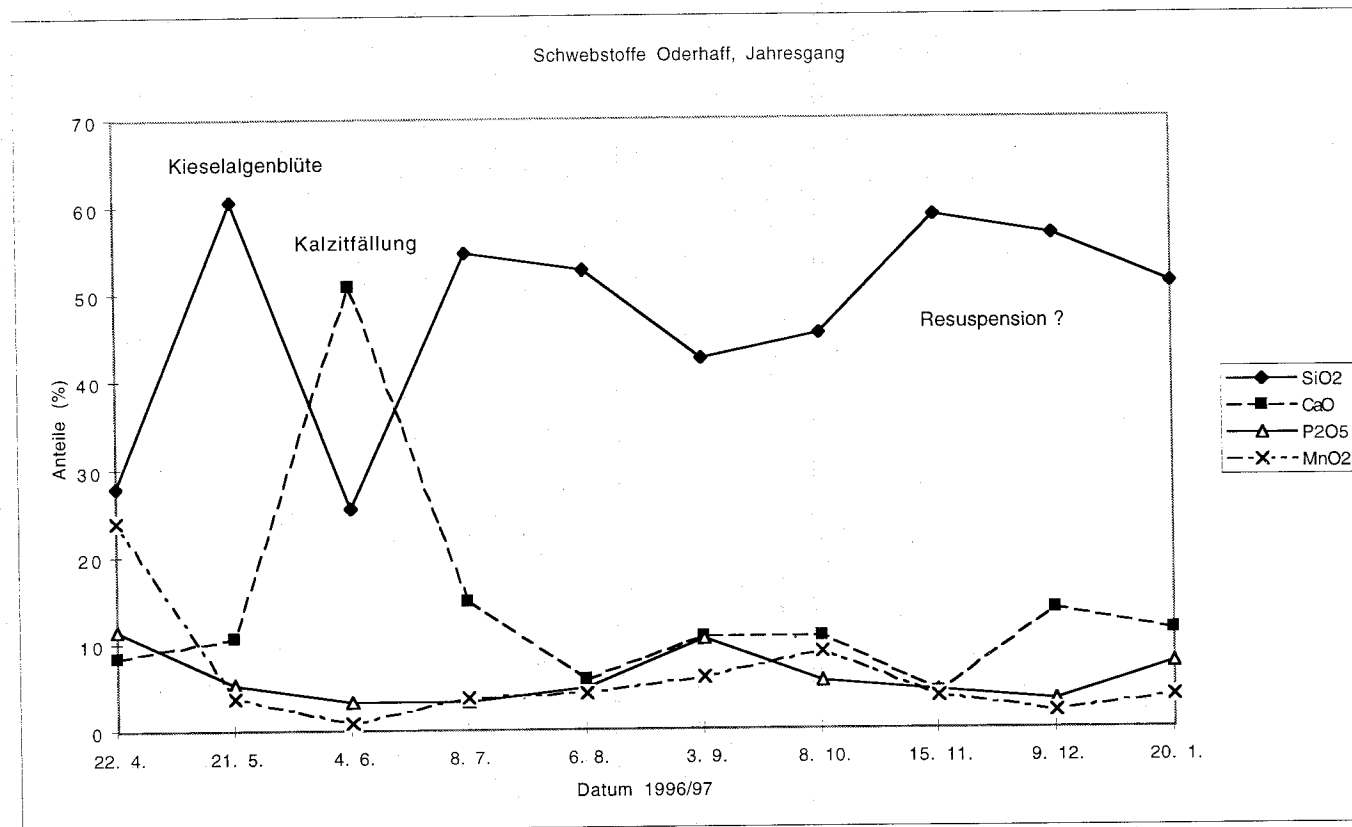


Abbildung 4. Beispiele für die jahreszeitliche Variation im Chemismus von Schwebstoffproben (anorganischer Anteil) aus dem Oderhaff, Station H3 (Kleines Haff), im Jahresgang vom April 1996 bis zum Januar 1997. Die Messungen wurden mit dem Verfahren der automatischen Partikelanalyse (n= 500-1000 Partikel je Schwebstoffprobe) am Raster-Elektronenmikroskop mit Röntgen-Mikroanalyse (EDX) durchgeführt.

Erklärung für die Herkunft dieser Substanzen ergab sich zufällig während einer Schiffsexpedition von Stettin zum Oderhaff (Polen). Nördlich der Stadt Stettin, bei Police, befindet sich eines der größten Chemiewerke Polens, in dem u.a. Düngemittel und andere Produkte hergestellt werden. Die Abfälle bzw. Rückstände aus diesem Werk werden auf einer gewaltigen Halde direkt am Ufer der Oder deponiert. Die Halde besteht aus hellgrauem, bisweilen gelblich oder rötlich gefärbtem Material (Proben konnten leider nicht entnommen werden). Sie bedeckt eine Fläche von ca. 1 km<sup>2</sup>, ist etwa 30-40 m hoch und nicht abgedeckt! Es liegt die Vermutung nahe, daß bei Starkregenfällen oder in Trockenzeiten durch Windausblasung erhebliche Mengen dieses Materials in die Oder und in das Haff eingetragen werden. In der Tat konnten wir diese Partikel gleichzeitig an zwei Stationen im Großen und Kleinen Haff im Frühjahr 1996 nachweisen. Es liegt auf der Hand, daß auch in gelöster Form Nährstoffe und andere Elemente und Verbindungen aus dieser Deponie in erheblichem Maße in das Haff gelangen.

Ein Beispiel für die saisonalen Schwankungen in der Schwebstoffzusammensetzung an Hand des Hauptelement-Chemismus der anorganischen Substanz ist in Abb. 4 gegeben. In Tabelle 3 sind einige Ergebnisse von Elementanalysen an Schwebstoffproben aus dem Haff zusammengefaßt.

Tabelle 3: Elementkonzentrationen in Schwebstoffproben (SPM) aus dem Oderhaff, berechnet auf karbonat- und opalfreies Material (Trockensubstanz) und normiert auf Aluminium (zum Vergleich eine Sedimentprobe). Die Stationsnummern sind in Klammern angegeben. Die Daten von LEHMANN u.a. (1996) sind Mittelwerte von 9 verschiedenen Proben.

<b>Berechnung der Elementkonzentrationen auf karbonat- und opalfreies Material:</b>								
Spurenelemente in mg/kg								
	Al %	P %	Fe %	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd
SPM (18120)	1,41	0,62	1,49	2729	882	62	92	5,0
SPM (18114)	3,14	0,58	3,43	7205	1075	87	150	5,0
SPM (18036)	1,61	n.b.	1,84	10307	400	25	98	2,6
SPM (Lehmann)	4,01	0,88	4,97	9014	1645	102	189	5,1
Sedimentprobe (18036)	3,90	0,40	4,18	6294	1060	83	157	6,3
<b>Normierung auf Al:</b>								
	P/Al	Fe/Al	Mn/Al	Zn/Al	Cu/Al	Pb/Al	Cd/Al	
SPM (18120)	0,44	1,06	1936	625	44	65	3,6	
SPM (18114)	0,18	1,09	2295	342	28	48	1,6	
SPM (18036)	n.b.	1,15	6402	248	15	61	1,6	
SPM (Lehmann)	0,22	1,24	2248	410	25	47	1,3	
Sedimentprobe (18036)	0,10	1,07	1614	272	21	40	1,6	

Mikroanalytische Untersuchungen haben gezeigt, daß der biogene Kieselopal und der neugebildete Calcit keine wesentlichen Anteile von z.B. Schwermetallen binden. Als Träger für diese Elemente fungieren in den Schwebstoffen überwiegend einige der detritisch- mineralischen bzw. neugebildeten Komponenten (Tonminerale, Fe-, Mn-Oxidhydrate) und in gewissem Umfang auch die organische Substanz. Daraus folgt, daß die Konzentrationen einiger Schwermetalle in den Schwebstoffen sehr stark schwanken können, je nach "Verdünnungseffekt" durch die wechselnden Konzentrationen von Opal, Calcit oder auch Quarz.

Um solche mineralogisch bedingten Konzentrationsschwankungen von Spurenelementen auszugleichen, bedient man sich häufig der Normierung auf Al oder Li (z.B. LORING & RANTALA, 1992). Das konservative Element Al nimmt nicht am bio-geochemischen Stoffkreislauf teil und ist überwiegend an Glimmer und Tonminerale gebunden. Daher ist es indirekt auch ein Indikator für die Korngrößenzusammensetzung der Proben. In der Tabelle 3 ist zu ersehen, daß höhere Eisen- und Spurenelementkonzentrationen (mit Ausnahme von Mn) mit höheren Al-Konzentrationen korreliert sind. Das bedeutet, daß die Al-normierten Werte relativ ausgeglichen sein müßten, wenn keine zusätzlichen (zumeist anthropogenen) Quellen zu einer Anreicherung der Spurenelemente geführt haben. In den aufgeführten Beispielen kommt beides sehr deutlich zum Ausdruck. Das Fe/Al-Verhältnis ist nahezu gleichmäßig verteilt und die höchsten Schwermetall/Al-Verhältnisse finden wir gerade unmittelbar vor der Mündung der Oder (Station 18120), was den fortwährenden Eintrag von Schwermetallen durch den Fluß belegt. Diese Aussage wird auch bestätigt, wenn man die Daten über den partikulären Eintrag durch die Oder vergleicht (s. Tabelle 1) und die Schwermetallverteilungskarten der Oberflächensedimentkartierung im Haff berücksichtigt (Abb. 5). Andererseits wird auch deutlich, daß mit Ausnahme des unmittelbaren Odermündungsbereiches die normierten Elementverhältnisse auch relativ gut mit denen im Sediment übereinstimmen. Das zeigt die enge Wechselbeziehung Sediment-Schwebstoffe, die wegen der Resuspensionswirkung von Strömung und Seegang das Geschehen im Haff bestimmen.

Mangan und Phosphor besitzt eine Sonderstellung im Wechselfeld Sediment-Wasserkörper. Sowohl für die Schwebstoffe der Oder als auch für die des Oderhaffs sind erhöhte Mangan- und Phosphorgehalte charakteristisch. Mangan wird im anoxischen Bereich des Sedimentes mobilisiert und im oxischen Bereich als Mn-(IV)-Oxidhydrat wieder ausgefällt. Dadurch ergibt sich eine Anreicherung von Mn in der Schwebfracht und im oberflächennahen Sedimenthorizont, welcher besonders der Resuspension ausgesetzt ist. Diese Mn-Oxidhydrate konnten mikroanalytisch als selbständige Partikel und auch als Überzüge auf anderen mineralischen Partikeln und auch auf der organischen Substanz nachgewiesen werden. Aus diesem Grund wirkt das Oderhaff regelrecht als Manganfalle und die Konzentrationen des Mangans in den Schwebstoffen sind hier besonders hoch. Phosphor wird frühdiagenetisch beim Abbau der organischen Substanz bzw. reduktiv aus Eisen-(III)-Oxidhydraten im anaeroben Bereich über das Porenwasser freigesetzt. Unter oxischen Verhältnissen im Wasserkörper und an der Sedimentoberfläche erfolgt eine erneute adsorptive Bindung des Phosphors an Fe-(III)-Oxidhydrate der Schwebstoffflocken, wobei auch eine Bildung von Fe-(III)-Phosphaten in Betracht zu ziehen ist.

Von den organischen Schadstoffen wurden in den Schwebstoffen des Oderhaffs PCB-Gehalte von etwa 30 ng/g Trockensubstanz ermittelt. Im Vergleich zu den Sedimentproben, in denen Gehalte von 17 bis 24 ng/g Trockensubstanz nachgewiesen wurden, liegen die Werte in den Schwebstoffen etwas höher, was aus der bevorzugten Bindung dieser Stoffe an organische Substanzen und dem fortwährenden Eintrag durch die Oder zu erklären ist.

### 4.3. Oberflächensedimente

Die Oberflächensedimente des Haffs sind je nach hydrographischer und morphologischer Situation als feinkörnige Schlicke (Schluffe) in den Beckenbereichen und als Sande bzw. sandige Schlicke (Schluffe) in den flachen Rand- und Schwellenbereichen ausgebildet. Charakteristisch sind die hohen Gehalte organischer Substanz, besonders in den feinkörnigen Schlickern, die für die Ausprägung reduzierender Milieuverhältnisse im Sediment verantwortlich sind. Die generelle chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Schlicksedimentes im Haff ist aus der Tabelle 4 zu ersehen.

Tabelle 4: Haupt- und Spurenelemente des Schlicksediments im Oderhaff. Dargestellt sind die Mittelwerte, „Anreicherungs-Faktoren“ und Standardabweichungen für chemische Vollanalysen und Spurenelementkonzentrationen von 7 Sedimentkernen. Die Unterteilung in Oberflächenhorizont (0-6 cm Sedimenttiefe) und Untergrund (28-40 cm) bezieht sich auf 3 bzw. 6 Einzelwerte je Kern in beiden Horizonten.

	Mittelwerte		Anreicher. Faktor	Schwankungsbreite (+ -)	
	Oberfläche	Untergrund		Oberfläche	Untergrund
<b>Hauptelemente (%) :</b>					
SiO <sub>2</sub>	40,71	55,44	0,7	6,34	4,26
TiO <sub>2</sub>	0,39	0,52	0,8	0,05	0,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,43	8,10	0,8	0,68	1,61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,88	9,49	0,6	0,41	1,27
MnO	0,41	0,17	2,4	0,06	0,04
MgO	0,93	1,15	0,8	0,08	0,19
CaO	11,98	2,17	5,5	3,29	1,02
Na <sub>2</sub> O	0,50	0,74	0,7	0,13	0,10
K <sub>2</sub> O	1,25	1,77	0,7	0,15	0,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,64	0,17	3,8	0,19	0,04
Glühverl.	28,49	19,01	1,5	3,68	3,93
S	1,35	2,19	0,6	0,64	0,97
Summe	98,96	100,93			
<b>Spurenelemente (mg/kg):</b>					
Zn	957	96	9,9	337	37
Pb	153	16	9,4	39	6
Cu	79	21	3,8	21	5
Cd	6,06	0,33	18,4	2,18	0,22
Hg	1,11	0,10	11,4	0,24	0,04
As	27,3	9,8	2,8	3,7	3,1
Mn	3080	1290	2,4	418	270
Cr	96	65	1,5	19	12
Ni	47	28	1,7	8	7
Co	14,3	9,9	1,4	2,2	1,5
V	48	59	0,8	9	23
Ba	510	316	1,6	104	39
Sr	227	97	2,3	49	10
Zr	154	300	0,5	53	83

Hinsichtlich des Phasenbestandes können wir von folgender mittlerer Zusammensetzung ausgehen: Quarz 30 %, organische Substanz 23 %, Calcit 16 %, Opal (Kieselalgenskelette) 6 %, Feldspat 5 %, Muskovit/Illit 8 %, weitere Tonminerale zusammen 7 %, Pyrit 4 %, Rest (Schwerminerale u.a.) 1 %. Auf die Besonderheiten der tieferen Sedimentschichten wird in den späteren Kapiteln zur Untersuchung von Sedimentkernen näher eingegangen.

Der Faziestyp der Schlicksedimentation im Oderhaff ist durch einen hohen Anteil biogen-organogener und authigener Phasen charakterisiert. Detritisch-silikatische Mineralphasen sind nur mit ca. 50 % am Stoffbestand beteiligt. Die Schlicksedimentation des Oderhaffs grenzt sich damit deutlich von der des zum äußeren Bereich des Oderästuar gehörenden Greifswalder Boddens ab, die mit einem dominierenden Quarz-Feldspat-Tonmineralanteil von annähernd 80 % durch eine silikatische Fazies charakterisiert ist (EIDAM u. a. 1995).

#### **4.3.1. Kartierung ausgewählter geochemischer Parameter**

Flächendeckende geologische und geochemische Kartierungen zur Untersuchung der Sedimente im Odermündungsraum sind bisher nicht durchgeführt worden. Um erste Anhaltspunkte zu erhalten, wurden an 76 Stationen auf deutscher Seite (Kleines Haff) und 60 Stationen auf polnischer Seite (Großes Haff) die obersten fünf Sedimentzentimeter mit einem Niemistö-Stechrohr entnommen (Abb. 5 a). Nach Korngrößenanalyse und Gefriertrocknung wurde von 72 Schlickproben die Fraktion < 63  $\mu\text{m}$  auf ihre Gehalte an organischer Substanz, Karbonat, Gesamtschwefel, Bio-Opal, den Nährstoffen N und P sowie den mit 10% HCl extrahierbaren Metallen untersucht. Vergleichsbestimmungen wurden an dem Sedimentstandard ABSS-1 (Ostseeschlick, Arkonabecken) durchgeführt.

Die Karten mit den Verteilungsmustern der analysierten Parameter finden sich in den Abbildungen 5 b bis k. Die Sedimente erwiesen sich als in der Feinfraktion relativ homogen zusammengesetzt. Ursache dieser Erscheinung ist die häufige Umlagerung durch windinduzierte Turbulenzen in dem im Durchschnitt nur knapp 5 m tiefen Gewässer sowie die Bioturbation durch das Makrozoobenthos. Infolge der hydrographischen Bedingungen ist die Sedimentverteilung in beiden Beckenteilen jedoch unterschiedlich. Der flächenmäßige Anteil gröberer, sandiger Sedimente ist im Großen Haff größer als im Kleinen Haff. Diese Tatsache wäre durch die Abnahme der Dynamik und Transportkraft des Wassers von der Odermündung bis zum Kleinen Haff erklärbar. Eine prinzipiell positive Zusammenhang zwischen Feinkornanteil, Gehalt organischer Substanz und Schwermetallgehalten ergibt sich für beide Teilareale. Die Sedimente im Kleinen Haff sind jedoch durchschnittlich feinkörniger und reicher an Karbonat, vermutlich wegen der höheren Verweilzeit der Wassermassen in diesem Gebiet und der Ausprägung intensiver Phytoplanktonblüten mit starker pH-Verschiebung ins Basische. Der Gehalt organischer Substanz geht im Sediment normalerweise mit der Verringerung der Korngröße einher, was im Kleinen Haff auch der Fall ist. Im Großen Haff trifft das nur bedingt zu, weshalb zu vermuten ist, daß die etwas gröberer Schlicke am Südwestrand des Großen Haffs einen höheren Anteil gröberer festländischer organischer

Substanzen enthalten, die durch die Oder eingetragen wurden. In Übereinstimmung mit dieser These finden sich im Mündungsbereich der Oder auch die höchsten C/N-Verhältnisse im Sediment. Die flächenmäßige Darstellung der Phosphor- und Eisenverteilung belegt ebenfalls den Haupteintrag detritischer und authigener P- und Fe-Phasen durch die Oder. Das inselartige Auftreten von Fe-Maxima, die mit entsprechenden S-Maxima korrelieren, leitet sich aus dem Vorkommen oberflächennaher anaerober Bereiche einer fröhdiagenetischen Eisensulfidbildung ab.

Die Verteilung ausgewählter umweltrelevanter Schwermetalle in den Oberflächensedimenten des Haffs zeigt wiederum den deutlichen Eintrag durch die Oder, wobei unmittelbar nordwestlich der Flußmündung ein Deponieareal für kohlenstoff- und schwermetallreiche Schlicksedimente zu erkennen ist. Von dort aus läßt sich eine bevorzugte Transportrichtung nach Nordwest und eine weiträumige Ablagerung von Schwermetallen im Kleinen Haff rekonstruieren. Ein Teil der schwermetallhaltigen Schwebfracht allerdings wird unter bestimmten hydrographischen Bedingungen auf direktem Weg über die Swina, bzw. den Piastowski-Kanal (Kaiserfahrt), in die Ostsee gelangen.

Neben der Darstellung der Verteilung einzelner Parameter in den Oberflächensedimenten des Haffs können mit Hilfe der Faktorenanalyse auf statistischem Wege Anhaltspunkte gefunden werden, wie der Einfluß verschiedener Faktoren räumlich differenziert ist. In der Regel wird die Interpretation der mathematisch bestimmten Faktoren als physikalisch/chemisch wirkender Milieuparameter dadurch erheblich erleichtert. Im Ergebnis einer Faktorenanalyse (Hauptkomponentenanalyse mit Varimaxrotation) können 82% der Varianz des Datensatzes durch vier Faktoren erklärt werden. Der Einfluß eines jeden Faktors auf den Chemismus einer Probe wird durch seine Faktorenladung wiedergegeben. Für jede Probe werden somit vier Ladungen ausgewiesen, die bei Übertragung auf Faktorenladungskarten entsprechend der Lage der Beprobungsorte eine Wertung der räumlichen Wirksamkeit der Faktoren zulassen (Abb. 6 a bis d). Mit Hilfe dieser Karten und aus der Kenntnis der hydrographischen Differenzierung des Ästuars können die extrahierten Faktoren wie folgt interpretiert werden:

Faktor 1 beschreibt mit hohen Ladungen sowohl die Schwermetallverteilung, die organische Substanz, als auch für den Anteil siltig-tonigen Materials (Feinkorn). Die räumliche Verteilung zeigt die höchsten Werte im Südwestbereich des Großen Haffes. Damit wird einerseits eine schnelle Sedimentation der Schwebstoffe nach Passieren der Odermündung als auch dessen vorrangige Akkumulation im Leebereich des umliegenden Festlandes belegt. Der gesamte Ostteil des Großen Haffes ist auf Grund seiner Exposition gegenüber der Hauptwindrichtung SW durch deutlich gröbere Sedimente mit geringen Metall- und Organogenanteilen gekennzeichnet. Die Schwermetallgehalte im Kleinen Haff sind auf Grund der Entfernung zur Eintragsquelle wie auch durch häufigere Resuspension etwas geringer und räumlich weniger differenziert.

Faktor 2 zeigt die unterschiedliche Wirksamkeit der Calcitfällung in den beiden Gewässerteilen und steht somit für die Intensität der Primärproduktion. Die signifikant negative Ladung für Eisen hängt nicht ursächlich damit zusammen, sondern beruht auf der vorwiegenden

Akkumulation dieses Elementes im Großen Haff durch von der Oder eingetragene eisenreiche Schwebstoffe.

Faktor 3 beschreibt die Verteilung des Sedimentschwefels, Ladungen für andere Parameter sind nicht signifikant. Am ehesten wird eine Korrelation noch mit der organischen Substanz und Eisen angedeutet. Die relativ geringe Ladung für Eisen deutet an, daß dieses in der obersten 5 cm-Schicht außer als Sulfid auch als Oxihydrat oder Hydrat vorliegen muß. Die räumliche Verteilung legt eher nahe, den Faktor als Verfügbarkeit von marinem Sulfat zu identifizieren, weil die höchsten Ladungen im Umkreis des Piastowski-Kanals gefunden werden, wo numerische Strömungsmodelle höhere Verweilzeiten salz- und damit sulfathaltigeren Wassers anzeigen (BUCKMANN & PFEIFFER 1995).

Faktor 4 besitzt höhere Ladungen nur für Mn und P (eingeschränkt auch für die organische Substanz und mit negativem Vorzeichen für Schwefel). Da es sich um redoxsensitive Elemente handelt, die unter reduzierenden Bedingungen in Lösung gehen, ist die negative Korrelation zu Schwefel leicht erklärbar. Die räumliche Verteilung wird von hohen Werten bestimmt, die an die Schiffahrtsrinne zwischen Piastowski-Kanal und Odermündung gebunden sind. Dieser Faktor kennzeichnet daher Gebiete mit verstärkter Sorption an resuspendierte Partikel, die dem regelmäßigen Sauerstoffeintrag durch das Schraubenwasser der Schiffe unterliegen!

Neben den natürlichen Ursachen, wie Strömung und Seegang, welche die Verteilung der Sedimente und damit auch der verschiedenen geochemischen Parameter bestimmen, gibt es eine Reihe weiterer, statistisch schwer faßbare Einflußfaktoren. Dazu zählen insbesondere anthropogene Aktivitäten, wie Fischerei, Schifffahrt (s. Faktor 4, oben) und Baggerei, die erhebliche Auswirkungen auf die Sedimentationsverhältnisse haben. Nach dem Bau der Kaiserfahrt (heute Piastowski-Kanal), am Ende des vorigen Jahrhunderts, wurden regelmäßig Baggarbeiten zur Vertiefung der Fahrrinne nach Stettin durchgeführt und das Baggergut wurde zum größten Teil an anderen Stellen im Haff wieder verklappt (s. Kartendarstellung in BRANDT, 1896). Die Freilegung bzw. Umlagerung älterer Sedimentschichten, die z.B. für das unregelmäßig fleckenhafte Auftreten schwefelreicher und karbonatarmer Sedimente verantwortlich sein könnte, kann somit durchaus anthropogene Ursachen haben. Noch älter ist der Einfluß der Zeesenfischerei, die urkundlich belegt von 1541 bis 1908 im Haff ausgeübt wurde (WINKLER & HERRMANN, 1986; WEIKER, 1927). Die Schleppnetze der Zeesenfischer wurden vorwiegend im tieferen Freiwasser eingesetzt, wo sie bis zum Grund reichend die Sedimentoberfläche durchwühlten. Abgesehen von der natürlichen Sedimentdynamik dürfte dieser Prozess ganz wesentlich zur Sediment-durchmischung beigetragen haben, die heute eine Datierung der Sedimente bis zur Oberfläche erschwert oder unmöglich macht. Mit Sicherheit hat dieser historisch lang anhaltende anthropogene Einfluß aber auch zur Veränderung der ökologischen Bedingungen an der Sedimentoberfläche beigetragen.

Zum Vergleich geochemischer Parameter in der Oberflächensedimentschicht des Oderhaffs mit ähnlichen Gebieten an der südlichen Ostseeküste bietet sich der kürzlich erschienene geochemische Atlas des polnischen Teils des Frischen Haffs (Zalew Wislany) an (USCINOWICZ & ZACHOWICZ, 1996). Der westliche Teil des Frischen Haffs ist noch flacher (durchschnittlich



nur 2-3 m Wassertiefe) als das Oderhaff weshalb sedimentdynamische Prozesse (Vermischung, Austausch) eine noch bedeutendere Rolle spielen. Außerdem mündet in das Frische Haff nur ein sehr geringer Teil der Fracht der Weichsel, die, was ihr Belastungsgrad mit Schadstoffen anthropogenen Ursprungs betrifft, der Oder vergleichbar ist. Demzufolge sind z.B. die Schwermetallgehalte im Frischen Haff durchweg deutlich niedriger, als im Oderhaff. Ebenfalls bleiben die Werte für organischen Kohlenstoff und Kalkgehalt weit hinter denen des Oderhaffs zurück. Nur die Mangan- und Eisengehalte liegen in einem ähnlichen Bereich. Es ist anzunehmen, daß die oxische Sedimentschicht im Frischen Haff mächtiger ist und es gibt dort auch keine Hinweise auf einen weit verbreiteten, oberflächlichen Anreicherungshorizont von Schadstoffen, wie er im Oderhaff sehr ausgeprägt ist. Nur im unmittelbaren Bereich von Städten, Ortschaften und Flußmündungen sind lokale Schwermetallanomalien im Frischen Haff festgestellt worden.

#### 4.3.2. Verteilung organischer Schadstoffe

Flächendeckende Untersuchungen zur Belastung der Sedimente mit organischen Spurenstoffen im westlichen Oderhaff (Kleines Haff) und einigen Zuflüssen wurden erstmalig 1994 und 1995 im Rahmen eines Projektes mit dem Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern (LAUN) durchgeführt (DANNENBERGER u.a. 1996). In den Sedimentproben wurden die Verteilungsmuster von chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) und polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) untersucht. Die Abb. 7 a zeigt die Stationen der Sedimentbeprobung für diese speziellen Untersuchungen im westlichen Oderästuar (Kleines Haff, Peenestrom) und in dessen vorpommerschen Zuflüssen (Peene, Uecker, Randow, Zarow, Ziese).

Chlorierte Kohlenwasserstoffe:

Die Konzentrationen der Polychlorierten Biphenyle (PCB's), in der Summe von 23 Einzelverbindungen, lagen zwischen  $<0,1$  und  $9,6$  ng/g Trockenmasse (TM). Ein ausgeprägter Konzentrationsgradient innerhalb des Kleinen Haffs wurde nicht festgestellt. Die höchste PCB-Konzentration mit  $9,6$  ng/g TM wurden an der Station KHJ gemessen. Die Variabilität in den PCB-Konzentrationen ist auch auf Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung der einzelnen Proben aus dem Kleinen Haff zurückzuführen. Obwohl es sich bei allen Proben aus dem Kleinen Haff um Schlickproben handelte, traten signifikante Unterschiede in den organischen Kohlenstoffgehalten (TOC) der Sedimente auf. Die TOC-Werte variierten zwischen  $4,7$  % (Station KHK) und  $12,1$ % (Station KHQ). Für eine regionale Belastungseinschätzung innerhalb des Kleinen Haffs kann die Aussagekraft durch die TOC-Normierung der auf Trockenmasse bezogenen Daten wesentlich erhöht werden. Die PCB-Verteilung im Kleinen Haff zeigt nach der TOC-Normierung eine wesentlich geringere Variation der Daten, mit Ausnahme der Stationen KHQ, KHO, K/Z und KSG. Die PCB-Werte schwanken zwischen  $24,7$  und  $70,7$  ng/g TOC (Abb. 7 b). Ein Grund für diese weitgehend einheitliche PCB-Verteilung ist die stetige Sedimentumlagerung, die aus der geringen

Wassertiefe resultiert. Als Belastungsschwerpunkte treten Ueckermünde und der Mündungsbereich der Peene in den Peenestrom hervor.

Neben den PCBs galt das Interesse der Untersuchungen der Verteilung von Organochlorpestiziden (Dichlor Diphenyl Trichlorethan, DDT und die Metabolite DDE und DDD, Hexachlor Cyclohexan, HCHs und Hexachlor Benzen, HCB). Die Betrachtung der Einzelverbindungen zeigt, daß das p,p-DDT selbst nur in geringen Konzentrationen bis 7,2 ng/g TOC auftritt. Das o,p'-DDT, die isomere Verbindung des p,p-DDT, wurde in keiner Sedimentprobe aus dem Kleinen Haff nachgewiesen ( $< 0,1$  ng/ TOC). Die mittlere Verweilzeit von DDT in marinen Sedimenten beträgt ca. 7 Jahre. Die letzte DDT-Anwendung auf dem Gebiet der ehemaligen DDR ist aus dem Jahr 1988 bekannt. Auf Grund der gemessenen DDT-Gehalte im Kleinen Haff kann davon ausgegangen werden, daß diese Verbindung zu ca. 90% metabolisiert wurde. Ein Hinweis darauf sind die wesentlich höheren DDE- und DDD-Konzentrationen. Das Verhältnis zwischen den DDE- und DDD-Werten im Sediment läßt Schlußfolgerungen über die Sedimentbedingungen zu. Da im Kleinen Haff vergleichbar hohe DDE- und DDD-Konzentrationen vorliegen, ist von teilweise anoxischen Verhältnissen in den oberen Sedimentschichten (0-3 cm) auszugehen, welche den Abbau des p,p'-DDT zu DDD begünstigen.

Die regionale Verteilung der DDTs (Summe) zeigt, in Anlehnung an die Ergebnisse bei den PCBs, nur geringe Unterschiede in den Gehalten im Kleinen Haff auf. Auffällig ist, daß an den gleichen Stationen (KHQ, KHO, K/Z und KSG) wie im Falle der PCBs, auch die Konzentrationen von DDT und DDE unterhalb der Nachweisgrenze ( $< 0,1$  ng/g TOC) lagen. Ausschließlich das p,p'-DDD wurde an einigen dieser Stationen in Konzentrationen bis 14,5 ng/g TOC nachgewiesen. Diese Ergebnisse stützen die zuvor angeführte Vermutung, daß das Kleine Haff einer steten Sedimentumlagerung unterworfen ist und dementsprechend eine weitgehend homogene Verteilung sowohl bei den PCBs als auch bei den DDTs zu erkennen ist. Desweiteren wurden die Verteilungen von Hexachlorbenzen (HCB) und ausgewählten Isomeren des Hexachlorcyclohexans (HCHs) in den Sedimenten untersucht (Abb. 8). Das Hexachlorbenzen (HCB) wurde bis zum Anwendungsverbot Mitte der 70er Jahre als Fungizid eingesetzt. Diese Verbindung entsteht auch bei der Verbrennung von chlor-organischen Abfällen und als Nebenprodukt bei vielen technischen Chlorierungsprozessen. Der Transport in marine Ökosysteme erfolgt vorrangig über Partikel in den Flüssen und in der Atmosphäre. Im Kleinen Haff lagen die HCB-Konzentrationen zwischen 10,8 und 27,2 ng/g TOC. Auch beim HCB wurden, in Analogie zu den PCBs und DDTs, an den Stationen KHQ, KHO, K/Z und KSG nur geringe Konzentrationen gemessen. Die hohen HCB-Werte im Sediment der anderen Gebiete des Kleinen Haffs sind wahrscheinlich auf Einträge vorrangig aus der Oder zurückzuführen.

Für das p,p'-DDT wurden insbesondere in der Uecker (Station UE 3, UE 4), in der Randow (Station RA 1) und im Peenestrom (Station P 74) Konzentrationen zwischen 51,4 und 307,4 ng/g TOC ermittelt. Diese Werte sind etwa 5 bis 30 fach höher als p,p'-DDT-Konzentrationen im Kleinen Haff. In diesen Gebieten kann demzufolge auf jüngere Einträge (ca. 1-5 Jahre) geschlossen werden.

### Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH):

PAH sind organische Spurenstoffe, die vorwiegend durch unvollständige Verbrennungsprozesse organischen Materials entstehen. Im Einzugsgebiet des Kleinen Haffs sind deshalb als Quellen für einen anthropogenen PAH Eintrag neben dem Odereintrag vorwiegend die atmosphärischen Einträge (Naß- und Trockendeposition) von Bedeutung. Der KFZ Verkehr im Einzugsgebiet des Haffs und die Kohleheizungen sind hierbei die Hauptemittanten. Vor allem in den größeren Städten Swinemünde, Stettin, Stralsund, Wolgast, Anklam und Ueckermünde gibt es noch viele mit Kohle betriebene Heizungen.

Die PAH Konzentrationen (Summe aus 15 Einzelverbindungen) lagen in den Sedimenten des Kleinen Haffs zwischen 163 ng/g TM und 1069 ng/g TM. Da zwischen den PAH Konzentrationen und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) ein enger Zusammenhang besteht, wurde, wie bereits bei den CKWs, eine Normierung auf TOC durchgeführt, die eine bessere Vergleichbarkeit der Belastungssituation innerhalb des Kleinen Haffs erlaubt. Auch nach der Normierung zeigte sich eine relativ hohe Variabilität der PAH Konzentration mit Werten zwischen 2282 ng/g TOC (Station KHO) und 11886 ng/g TOC für Station J/M.

Trotz der unterschiedlichen PAH-Gehalte (Summe) ist das Verteilungsmuster der einzelnen Verbindungen im Kleinen Haff relativ einheitlich. So traten an allen Stationen vorrangig die niedermolekularen PAH (Naphthalin und Acenaphthen) in höheren Konzentrationen auf. Da diese Verbindungen relativ leicht abbaubar sind, sollte dieses Ergebnis auf einen kontinuierlichen Eintrag dieser Komponenten hindeuten. Auch für Fluoranthen und Pyren wurden im Vergleich zu den anderen Einzelkomponenten höhere Konzentrationen gemessen. Diese Verbindungen bilden die Hauptkomponenten in Aerosolproben. An der Station KHQ (bei Karnin) wurde mit 3882 ng/g TOC ein sehr hoher Benzo(a)pyrengelgehalt gemessen. Außergewöhnlich hohe Fluoranthenwerte wurden für die Station J/M (Nähe Meßboje) ermittelt, was auf eine punktuelle Ölverschmutzung hindeuten kann. Für einzelne ausgewählte PAH wurde die Verteilung im Kleinen Haff interpoliert, wobei die Konzentrationen in den Sedimenten der Flußmündungen mit einbezogen wurden. Die höchsten Naphthalinkonzentrationen traten im nordöstlichen Teil des Haffs auf, wobei eine Abnahme der Gehalte in Richtung des Peenestroms beobachtet wurde (Abb. 9). Die regionale Verteilung dieser Verbindung, die zu den leichter abbaubaren PAH zählt, deutet darauf hin, daß diese Komponente kontinuierlich eingetragen wird, wobei die Hauptfracht aus der Oder kommend über das Große Haff eingetragen wird und bereits größtenteils am Eingang des Kleinen Haffs abgelagert wird.

Der Vergleich der Summenkonzentration der PAH im Oberflächensediment der einzelnen Zuflüsse zum Kleinen Haff zeigt, daß die höchsten Werte in der Peene mit maximal 673 ng/g TM sowie in der Uecker mit 528 ng/g TM auftraten. Nach der Normierung auf den Kohlenstoffgehalt ergab sich ein wesentlich einheitlicheres Bild. Im Peenestrom wurden Gehalte zwischen 2144 ng/g TOC und 2698 ng/g TOC gemessen, wobei die Station P 74 mit

16236 ng/g TOC eine Ausnahme bildete. Dieser hohe Wert erklärt sich daraus, daß trotz eines sehr niedrigen Kohlenstoffgehaltes von 1 % relativ hohe PAH Werte vorlagen. Ähnliches gilt auch für die Station UE 4, wo der normierte Gehalt 30576 ng/g TOC beträgt. Bei beiden Stationen liegt über den Zusammenhang zum Kohlenstoffgehalt hinaus, eine erhöhte PAH Belastung vor. Da auch die Organochlorpestizide und PCBs an diesen Stationen in sehr hohen Gehalten vorlagen, muß hier von einer allgemein hohen Schadstoffbelastung ausgegangen werden. Erhöhte PAH Konzentrationen, die über 6000 ng/g TOC lagen, waren auch für die Stationen UE 2, RA 2 und PE 4 zu finden.

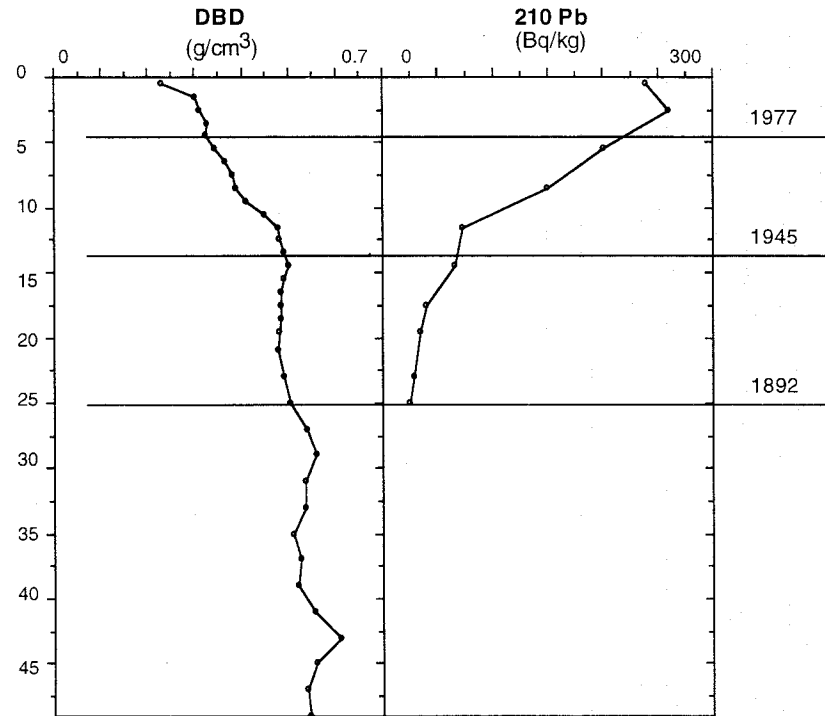
Betrachtet man die Verteilungsmuster der einzelnen PAH Komponenten, so sind regionale Unterschiede zu erkennen (Abb. 10). Die Verteilung der einzelnen PAH in den Sedimenten des Peenestroms ist ähnlich der des Kleinen Haffs. Dort dominieren ebenfalls die niedermolekularen PAH, wobei Naphthalin, Acenaphthen sowie Fluoranthen und Phenanthren in den höchsten Konzentrationen vorliegen. Für die anderen Zuflüsse dominierten die Komponenten Fluoranthen und Pyren. Stark erhöhte Pyren und Fluoranthengehalte wurden für die Stationen UE 4, PE 3, PE 4 sowie RA 1 gemessen, wobei an diesen Stationen teilweise bereits visuell (während der Probenahme) eine Ölkontamination festgestellt werden konnte. In der Peene wurden an der Station PE 4 die höchsten Pyrenkonzentrationen von 2094 ng/g TOC sowie Fluoranthen-konzentrationen von 1198 ng/g TOC gemessen, wobei hier ähnlich wie bei der Station UE 4 (Pyren: 5741 ng/g TOC; Fluoranthen: 3364 ng/g TOC) trotz des geringen Kohlenstoffgehaltes eine erhöhte Belastung durch PAH festgestellt wurde. Für die Zuflüsse ist die PAH Belastung stark standortabhängig. Die höchsten PAH Gehalte wurden im Bereich der Häfen sowie in der Nähe von Autobrücken gefunden. Ursachen für die erhöhten Werte sind somit einerseits die Dieselölkontamination durch den Bootsverkehr sowie KFZ Abgase. Die erhöhte Belastung an Station UE4 ist durch die Nähe der Kläranlage bei einer ehemaligen Munitionsfabrik zu erklären. Desweiteren spielen punktuelle Ölbelastungen wie an Station RA 1 eine Rolle, wo bereits ein Ölfilm auf der Wasserfläche beobachtet wurde.

## **5. Subrezente Sedimentation (Kurzkerne)**

Zur Beurteilung der historischen Prozesse von Sedimentation, Sedimentdynamik und anthropogen bedingter Kontamination in den vergangenen Jahrhunderten ist die hochauflösende Untersuchung von kurzen Sedimentkernen besonders geeignet. Dabei werden die Sedimentoberfläche und die obersten ca. 50 cm der Sedimentsäule möglichst ungestört in dünnen Scheiben von 1 cm oder 2 cm Mächtigkeit aus einem Stechrohr entnommen und analysiert.

Für die Altersdatierung der Sedimentkerne sowie zur Beurteilung von Durchmischungsprozessen bietet sich die <sup>210</sup>Pb-Methode an. Diese erlaubt im günstigen Fall für ungestörte Sedimentabfolgen Altersbestimmungen für die letzten 100-150 Jahre (z.B. GELLERMANN u.a.,

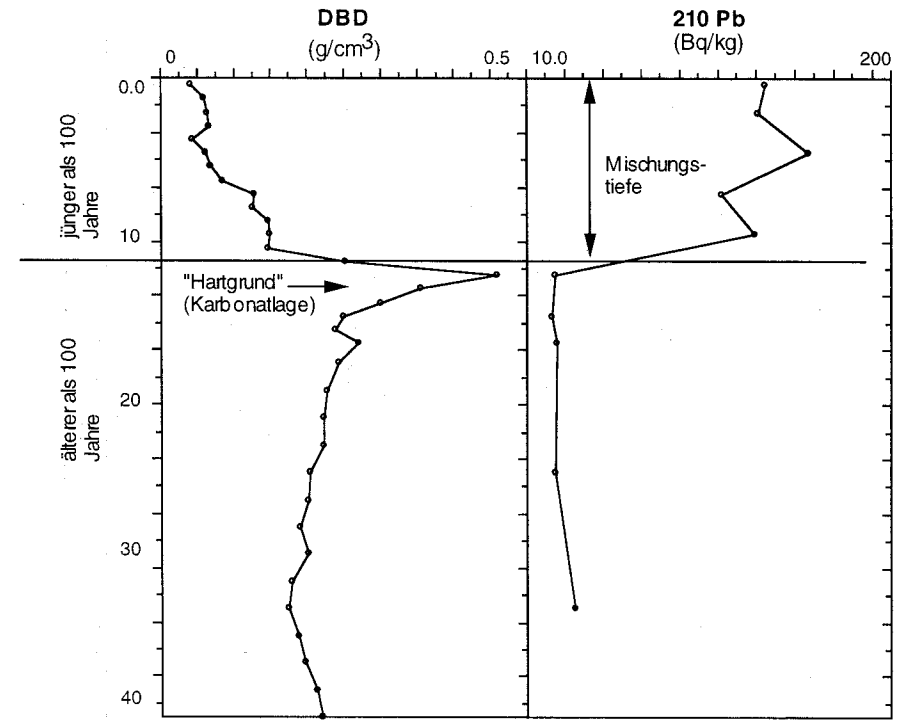
## Arkonabecken



Sedimenttiefe  
(cm)

Trockenraumdicke (DBD),  $^{210}\text{Pb}$ -Aktivität und Altersaufbau des Sedimentkernes 18017 aus dem Arkonabecken.  
LSR 2,47 = mm/J. MAR = 1,10 kg/m<sup>2</sup>/J.

## Oderhaff



Sedimenttiefe  
(cm)

Trockenraumdicke (DBD),  $^{210}\text{Pb}$ -Aktivität und Altersaufbau des Sedimentkernes 18036 aus dem Oderhaff.  
"scheinbare" LSR = 1,2 mm/J. MAR = 0,23 kg/m<sup>2</sup>/J.

Abbildung 11. Vergleich der Altersstruktur und der Sedimentationsraten bzw. Akkumulationsraten (LSR = lineare Sedimentationsrate; MAR = Massen-Akkumulationsrate) von je einem Sedimentkern aus dem Arkonabecken und aus dem Oderhaff.

# Oderhaff

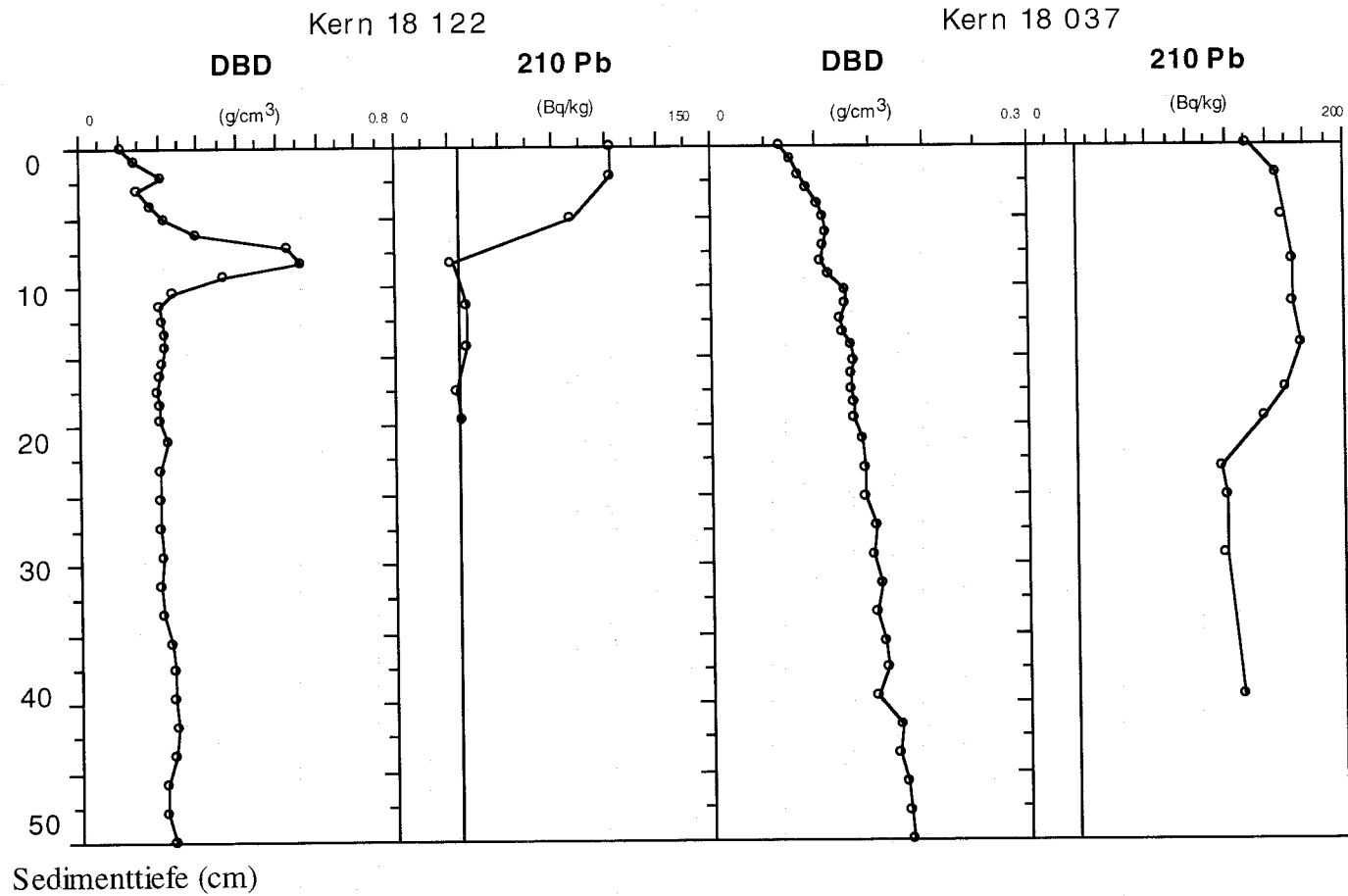


Abbildung 12. Trockenraumdichte (DBD) und <sup>210</sup>Pb-Aktivität zwei weiterer Sedimentkerne aus dem Oderhaff (vgl. Abb.11). Der Kern 18 122 (links) zeigt ähnliche Verteilungsmuster wie der Kern 18 036 (Abb. 11), der Kern 18037 (rechts) ist tiefreichend gestört und vermischt, vermutlich durch den Einfluß der Schifffahrt (Schraubenwasser).

1990). An den Sedimentkernen aus dem Schlickgebiet des Oderhaffs konnten jedoch wegen der starken Wirkung von Durchmischungsprozessen nirgends ungestörte Sedimentkerne gefunden werden (vgl. Abb. 11, 12). Die Ursachen dafür liegen einerseits in der natürlichen Grundeinwirkung durch Seegang und Strömung (Hydrodynamik) sowie durch Bioturbation, z.B. durch Larven von Chironomiden, die zeitweilig massenhaft den Seeboden des Haffs besiedeln. Andererseits gibt es auch Grundeinwirkung durch den Menschen z.B. durch das Schraubenwasser der Schiffe entlang der Schifffahrtlinien, durch Baggerarbeiten und Fischerei.

An dieser Stelle muß erwähnt werden, daß neuere Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Schilfgürtel (*Phragmites communis*) im nördlichen Bereich des Haffs vorliegen, welche mit Hilfe des  $^{137}\text{Cs}$ -Isotopes datiert werden konnten (CALLAWAY et.al., 1996). Dieses Cs-Isotop tritt nicht natürlich auf. Es wurde durch die Atomwaffentests in den 50er und 60er Jahren und durch den Reaktorunfall in Tschernobyl 1986 in die Atmosphäre freigesetzt und konnte in den Sedimentkernen nachgewiesen werden. Dabei wurden erstaunliche Sedimentationsraten von durchschnittlich 0,7 cm pro Jahr und maximal 1,3 cm pro Jahr (seit 1986) bestimmt. Der Wahl der Beprobung von Sedimenten im Schilfgürtel liegt die Überlegung zugrunde, daß im Verlandungsbereich der Schilfsäume von Gewässern feinkörniges Schwebmaterial "eingefangen" und relativ ungestört abgelagert wird, was die Messungen bestätigten. Eine Übertragung dieser Befunde auf die Sedimentationsvorgänge im offenen Haffbecken ist jedoch nicht zulässig, da hier andere dynamische Verhältnisse herrschen. Leider sind in der erwähnten Arbeit keine weiteren chemischen Analysen von den datierten Sedimentkernen publiziert worden.

### 5.1. Vertikale Verteilung geochemischer Parameter

Charakteristisch für alle Sedimentkerne aus dem zentralen Oderhaff ist ein ca. 10-15 cm mächtiger Durchmischungshorizont an der Sedimentoberfläche, der durch eine auffällige Homogenität der meisten sedimentologischen und geochemischen Parameter gekennzeichnet ist (siehe Abb. 11, 12, 13). Die Basis dieses Durchmischungshorizontes ist bisweilen als Karbonatlage ausgebildet. Darunter findet sich Schlick, der mindestens älter als 100 Jahre ist (kein  $^{210}\text{Pb}$ -Überschuß mehr meßbar) und in seiner chemischen Zusammensetzung den vorindustriellen "background" repräsentiert.

Die in den Abbildungen 13 a, b dargestellten Elementprofile zeigen beispielhaft die für das Oderhaff charakteristischen geochemischen Verhältnisse in den obersten Sedimentschichten. Von oben nach unten lassen sich folgende Einheiten beschreiben:

- Die 1-3 cm mächtige, oxische bis suboxische, zumeist als gelblich- graue Flockenschicht (fluffy layer) ausgebildete Sedimentoberfläche. Diese ist gekennzeichnet durch die höchsten Gehalte redoxsensitiver Elemente (Mn, P), die im anoxischen Schlick mobilisiert und relativ rasch (etwa nach Störungen) über der sich einstellenden Redox-Sprungschicht wieder ausgefällt werden.
- Ein 10-15 cm mächtiger Durchmischungshorizont, der unterhalb der Redox-Sprungschicht als schwarz-grauer anoxischer Schlick ausgebildet ist. Auf die Ursachen und den Mechanismus dieser Durchmischung wird weiter unten noch näher eingegangen. Wichtig ist zunächst die

Tatsache, daß die Ereignisse, die dazu führen, in größeren Zeitabständen (saisonal, Jahre) erfolgen müssen, da sich die Redox-Grenzschicht relativ schnell wieder in dem oben beschriebenen Bereich einstellt. Alle relativ reaktionsträgen Elemente zeigen in dem gesamten Durchmischungshorizont nahezu homogene vertikale Verteilungsmuster. Nur Schwefel nimmt wegen der Sulfatreduktion und Sulfidbildung allmählich zu. Die für die Beckengebiete der Ostsee und einige ihrer Randgewässer nachgewiesene generelle Anreicherung von Schwermetallen in dem oberen Sedimenthorizont, der den Zeitraum der anthropogenen (industriellen) Beeinflussung repräsentiert, wird im Haff durch die Prozesse der Sedimentdurchmischung überlagert. Das hat dazu geführt, daß Anreicherungshorizont und Durchmischungshorizont hier weitgehend zusammenfallen.

- An der Basis des Durchmischungshorizontes findet sich ein mehr oder weniger gut ausgebildeter Karbonathorizont (überwiegend aus Ostracodenschalen bestehend), der sich im Ergebnis der Durchmischungsvorgänge herausgebildet hat (Sortierungseffekt) und eine Art "Hartgrund" darstellt. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß noch tiefergehende Durchmischungen des Sedimentes (bis über 50 cm) im Bereich der Schifffahrtslinien, vermutlich durch das Schraubenwasser verursacht, beobachtet werden konnten (Kern 18037). Im Kapitel 6 wird auf die Entstehung der Karbonatlage und ihre Beziehungen zu den Mischungsprozessen und anthropogenen Einflüssen näher eingegangen.
- Unterhalb der Karbonatlage bzw. Mischungstiefe wird im permanent anoxischen Milieu die maximale Sulfidbildung (Pyrit) erreicht. In diesem Bereich ist der Schlick tief schwarz.
- Der darunter liegende grauoliv-farbene Schlick repräsentiert den Fermentationshorizont (Methanbildung) in dem Eisen mit gleichbleibend hohen Gehalten offenbar auch in anderen zweiwertigen Bindungsformen vorliegt, als im Pyrit, da die Schwefelgehalte wieder zurückgehen. Dieser tiefere Fermentationshorizont stellt gleichzeitig den vorindustriellen und natürlichen "background" der Sedimentgeochemie des Oderhaffs dar.

Wegen der Schwierigkeit einer exakten Datierung der Sedimentkerne mittels  $^{210}\text{Pb}$  läßt sich eine zeitliche Eingrenzung der beschriebenen Horizonte nur dahingehend vornehmen, daß der vorindustrielle Untergrund mindestens älter als ca. 100 Jahre ist und daß der Bereich der oberen Durchmischungstiefe überwiegend Material enthält, welches im Zeitraum der letzten 100 Jahre in das Oderhaff eingetragen wurde. Da im Haff nicht die gesamte partikuläre Oderfracht dauerhaft abgelagert wird (siehe Kapitel 7.3. Massenbilanzen), muß ein Teil des Sedimentmaterials weiter in die Ostsee transportiert worden sein. Für diejenigen Elemente, die zu erheblichen Anteilen auf anthropogene Ursachen zurückgeführt werden können (Eutrophierung, Kontamination), sind die deutlich erhöhten Konzentrationen in der Oberflächenschicht, gegenüber dem vorindustriellen Untergrund charakteristisch (vgl. Tab. 4, Kapitel 4.3.). Der Anstieg der konservativen (inerten) Elemente Al und Li im unteren Bereich der Sedimentkerne ergibt sich zwangsläufig aus der "Verdünnung" durch organische Substanz, Karbonat und Opal im oberen Bereich (s. Kapitel Schwebstoffe).



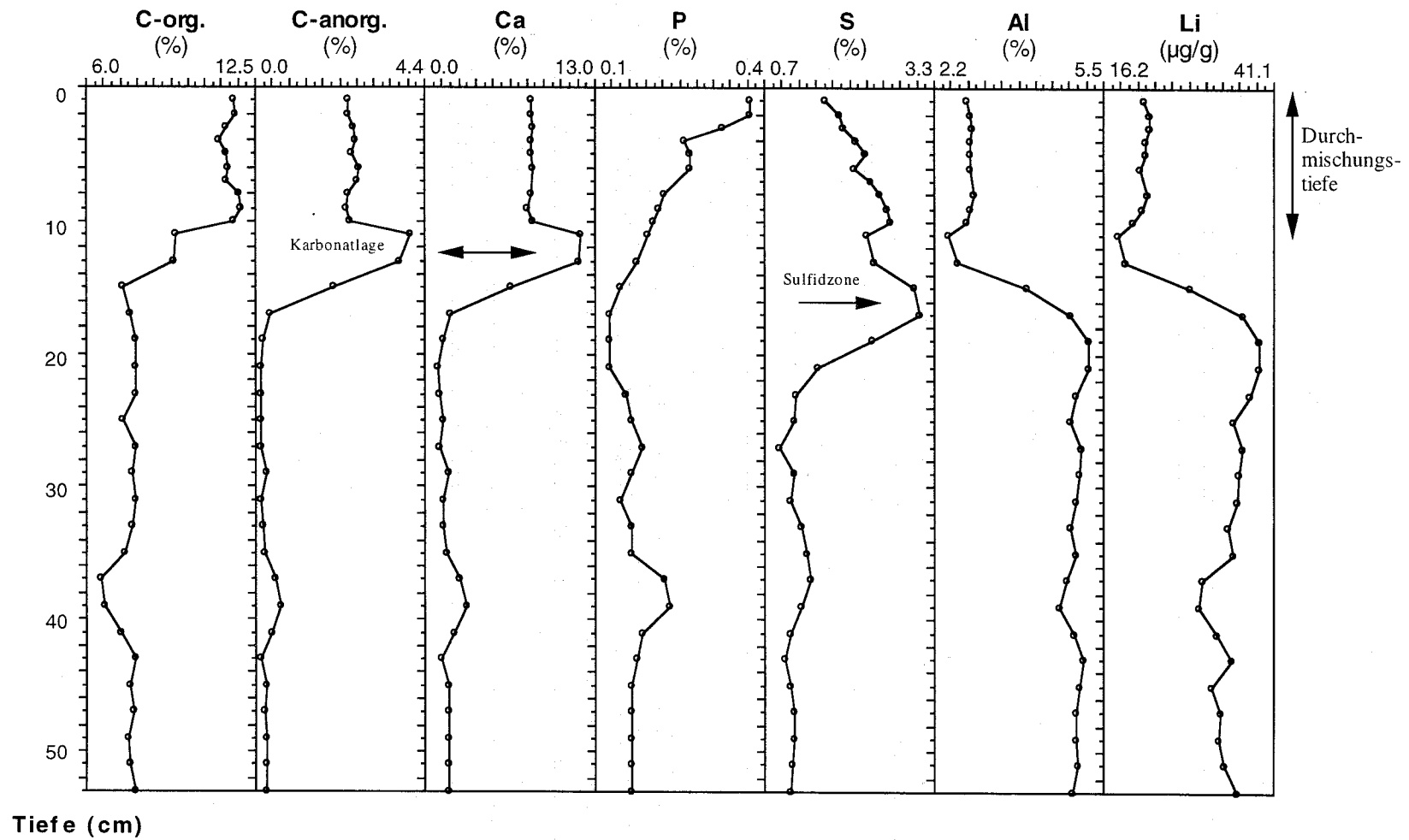


Abbildung 13 a). Vertikale Verteilung ausgewählter Haupt- und Spurenelemente im Kern 18 035 aus dem Kleinen Haff (vgl. Abb. 11).

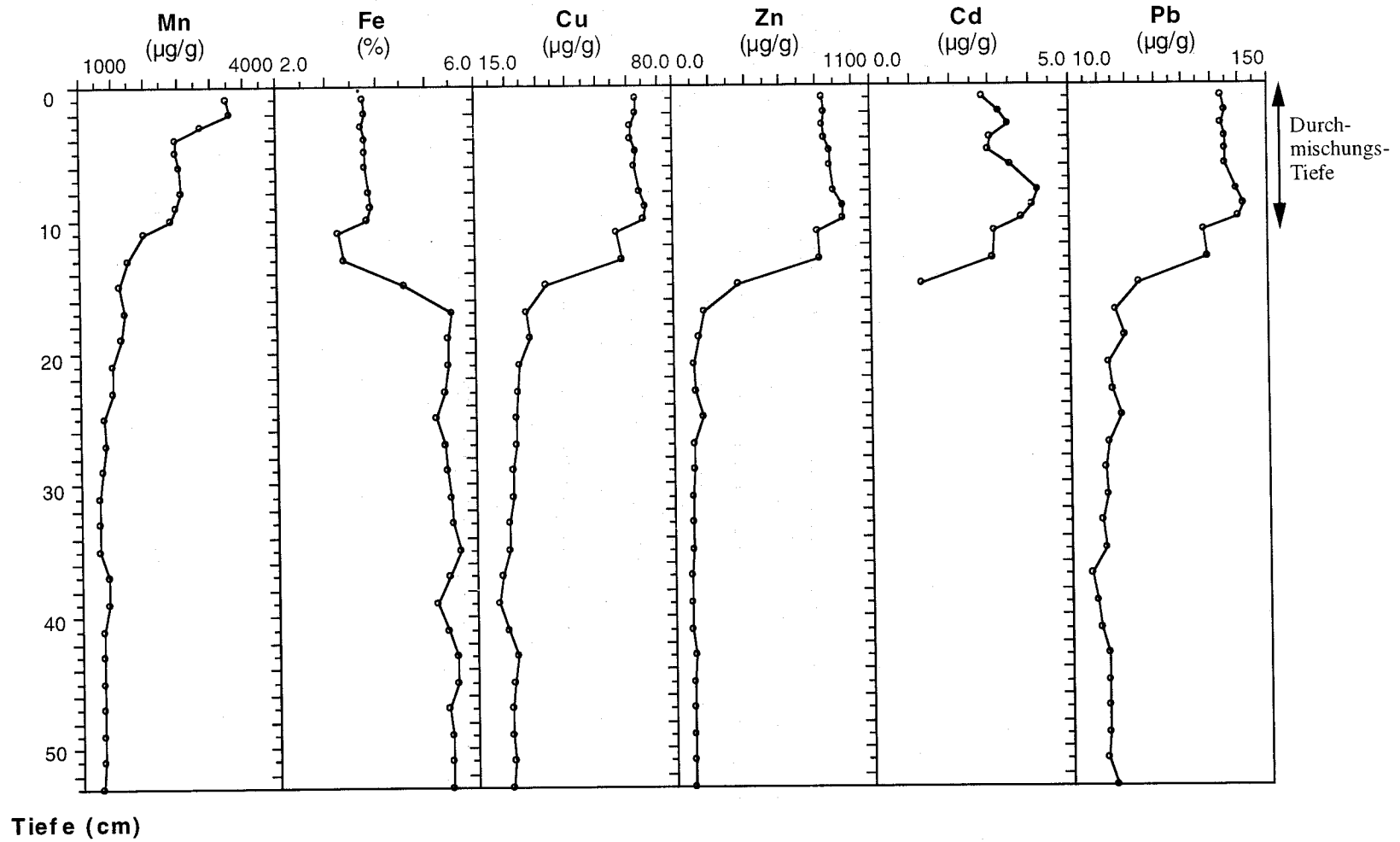


Abbildung 13 b). Vertikale Verteilung ausgewählter Spurenelemente im Kern 18 035 aus dem Kleinen Haff (vgl. Abb. 11).

## 5.2. Hauptelement-Chemismus und Frühdiagenese

Im Hauptelementchemismus und Phasenbestand grenzen sich die Oberflächensedimente des Oberhaffs deutlich von den Sedimenten ab, die dem geochemischen "background" zuzuordnen sind (siehe Tab. 4, Kapitel 4.3.). Im Vergleich zu den Untergrundwerten sind die Oberflächensedimente durch höhere Calcium-, Phosphor-, TOC- und TIC-Konzentrationen bzw. höhere Anteile biogen-organogener Phasen (z.B. Calcit, Opal und organische Substanz) sowie durch niedrigere Silicium-, Titan-, Aluminium-, Eisen-, Magnesium-, Natrium-, Kalium- und Schwefel-Gehalte bzw. niedrigere Anteile silikatischer Phasen charakterisiert. Wie die Abb. 14 a, b [Kern 18118] veranschaulichen, sind die Hauptelemente im oberen Profilabschnitt im Bereich der Mischungszone mit Ausnahme von Mangan und Phosphor annähernd homogen verteilt. Im darunterliegenden Abschnitt bzw. unterhalb der teilweise ausgebildeten Karbonatlage ist die Elementverteilung tiefenabhängig ausgeprägt, wobei die Hauptelemente durch unterschiedliche Verteilungstendenzen gekennzeichnet sind: Während sich die Gehalte von Ca, TOC, TIC und P mit Annäherung an den geochemischen "background" verringern, ist beispielsweise eine Zunahme der Si-, Ti-, Al- und Mg-Werte zu beobachten.

Die Anreicherung biogen-organogener Phasen in den Oberflächensedimenten im Vergleich zum geochemischen Untergrund bzw. die Tiefenabhängigkeit der Hauptelementverteilung kann in den Grundzügen durch eine Änderung des Sedimentationsmilieus im Zusammenhang mit einer zunehmenden Eutrophierung der Gewässer in dem betrachteten Zeitraum von ungefähr 100 Jahren erklärt werden. In Übereinstimmung hiermit stehen auch Untersuchungsergebnisse zum Porenwasserchemismus der Sedimente. Beispielsweise ergeben sich aus der vergleichsweise geringen Variation der Ca-Konzentrationen im Porenwasser keine Hinweise auf eine frühdiagenetische Calcitlösung in einem Ausmaß, das die signifikante tiefenabhängige Variation der Ca-Gehalte in den Sedimenten erklären könnte.

Für einige Elemente, wie z. B. Mangan, Phosphor, Eisen und Schwefel ist eine deutliche Beeinflussung der Elementverteilung durch frühdiagenetische Prozesse zu erkennen. Die Konzentrationsprofile von Eisen und Schwefel stimmen in ihrem Verlauf weitgehend überein. Sie weisen unterhalb der Mischungszone einen Anreicherungshorizont auf, der auf einer diagenetischen Eisensulfidbildung beruht. Während unterhalb der Eisensulfid-Anreicherungszone die Sulfatkonzentrationen im Porenwasser gegen Null gehen, steigen die Eisengehalte in der Lösungsphase deutlich an. Damit erweist sich das Sulfat in den Haffgewässern mit einer geringen Salinität als begrenzender Faktor für die bakterielle Sulfatreduktion und Sulfidfällung (Pyrit). Das gilt zumindestens für die oberflächennahen Sedimente. In tieferen Sedimentschichten (einige Meter) sind in den Porenwässern wieder höhere Chlorit- und Sulfatgehalte gemessen worden. Das könnte im Zusammenhang mit der Konservierung älterer, salzreicher Wässer oder mit dem Aufdringen fossiler Wässer aus dem tieferen Untergrund im Zusammenhang stehen (vgl. Kapitel 6).

Mangan wird diagenetisch unter reduktiven Bedingungen als  $Mn^{2+}$  mobilisiert und oxidativ als Mangan(IV)-Oxihydrat ausgefällt. Die Mangan-Konzentrationen der Porenwässer sind daher ein empfindlicher Indikator für den Redoxzustand der Oberflächensedimente. Beispielsweise

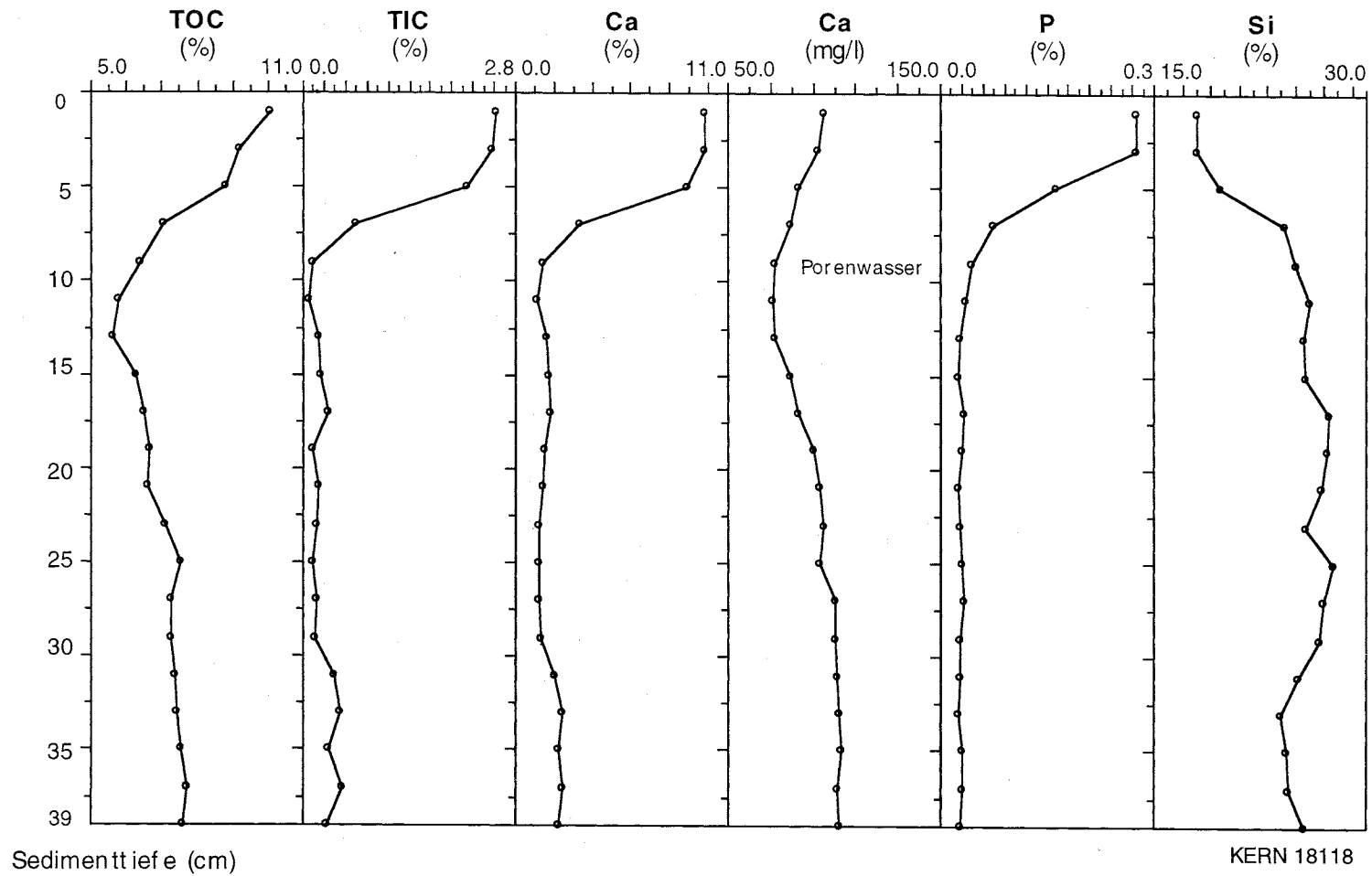


Abbildung 14 a). Vertikale Verteilung einiger Hauptelemente im Sediment und Porenwasser (Ca) des Kernes 18 118 aus dem Kleinen Haff zur Veranschaulichung diagenetischer Prozesse.

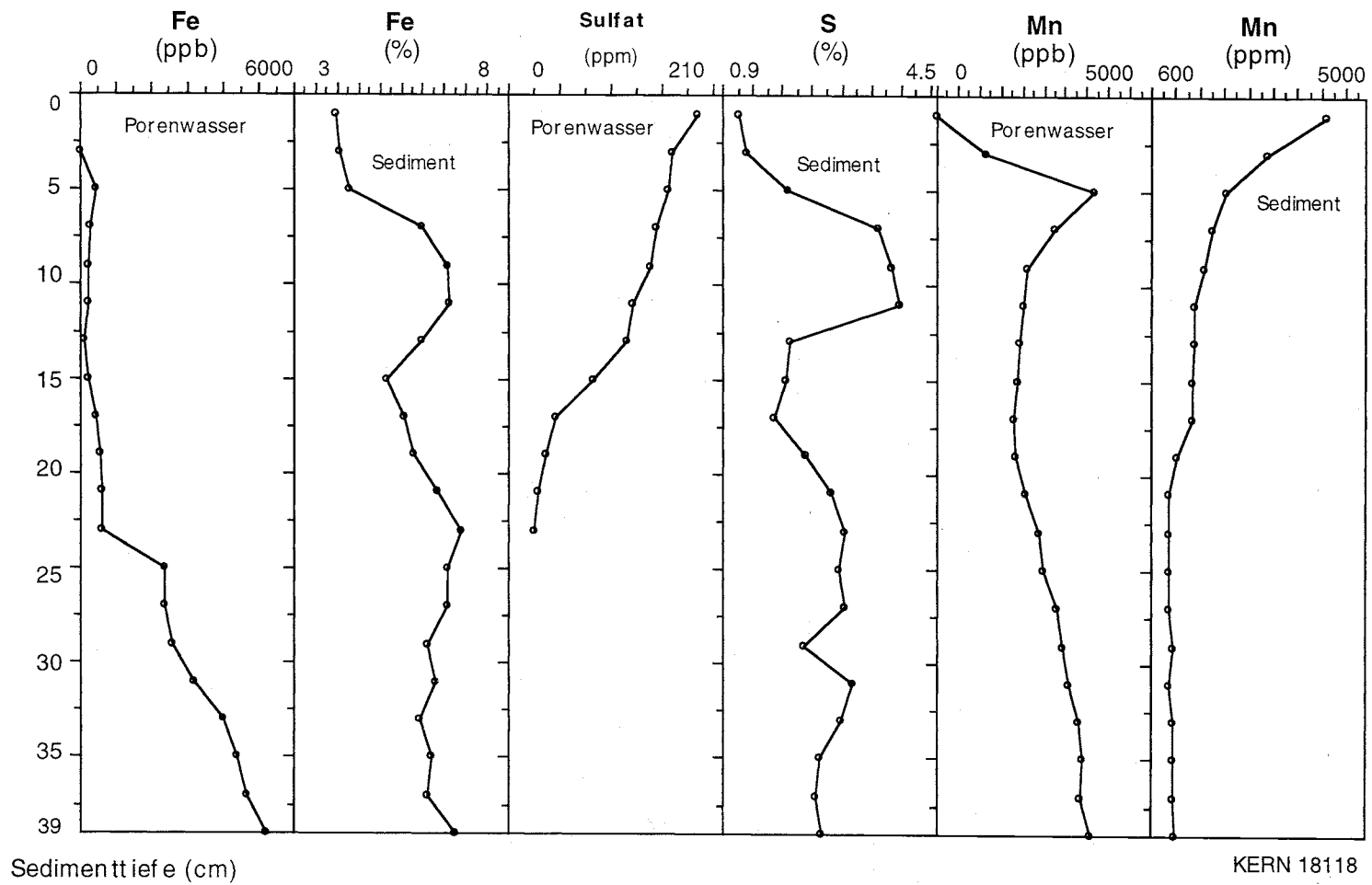


Abbildung 14 b). Vergleich von Porenwasser- und Sedimentchemismus für die Elemente Fe, S und Mn im Sedimentkern 18 118 aus dem Kleinen Haff zur Veranschaulichung diagenetischer Prozesse.

weist die Verringerung der Mn-Gehalte des Porenwassers im oberen ca. 4 bis 5 cm mächtigen Sedimenthorizont, die mit einer Mn-Anreicherung im Sediment parallel verläuft, auf die Ausbildung oxischer bis suboxischer Milieubedingungen in dieser Zone hin. In Abb. 14 b [Kern 18118] treten die höchsten Mangan-Gehalte im Grenzbereich Sediment/Bodenwasser auf, so daß der anaerobe Bereich bis an die Sedimentoberfläche heranreicht.

### 5.3. PCB's in Sedimentkernen

Polychlorierte Biphenyle (PCB's), die neben den Dioxinen am häufigsten untersuchten und ausschließlich anthropogenen Schadstoffe in der Umwelt, sind organische chlorierte Kohlenwasserstoffe. Sie wurden seit 1929 in größeren Mengen als technische Gemische (Arochlor, Chlorophen, Phenochlor) hergestellt und in die Umwelt freigesetzt. Mitte der 60er Jahre wurde der Produktionshöhepunkt mit jährlich 100.000 Tonnen weltweit erreicht (Schulz, 1990). Ende der 70er Anfang der 80er Jahre wurde die Produktion in den westlichen Industrieländern eingestellt, weil man die Gefährlichkeit dieser Umweltgifte erkannt hatte.

Von den über 50 verschiedenen niedrig- bis hochchlorierten Biphenylen, die in den Sedimentproben und Schwebstoffen des Oderhaffs identifiziert werden konnten, wurden die eindeutig quantifizierbaren aufsummiert und als Tiefenprofile an drei Kernen aus dem Haff dargestellt (Abb. 15). Die PCB-Gehalte in den Sedimenten des Oderhaffs reichen bis 25 ng/g TG und liegen somit deutlich höher, als in anderen Gebieten des Oderästuares und der vorgelagerten Ostsee (BLANZ, 1995).

Die Vertikalverteilung zeigt, daß nur in der durchmischten Oberflächenschicht des Sedimentes PCB's nachzuweisen sind, was wegen der beschriebenen Altersbeziehungen auch zu erwarten war. Wegen der Vermischungsprozesse kann auch das Einsetzen des PCB-Signals in der Sedimentsäule nicht als Zeitmarke verwendet werden. Entgegen den Schwermetallen und einigen anderen Sedimentparametern sind die Konzentrationen der PCB's nicht so einheitlich und homogen über dieses Tiefenintervall verteilt, es zeichnet sich eine deutliche Zunahme zur Oberfläche hin ab. Diesbezüglich ergeben sich Parallelen zu den reaktiven Elementen Mn und P (siehe Abb. 13), worüber aber nur spekuliert werden kann, da über die Mobilität von PCB's wenig bekannt ist. Da das "Signal" der einsetzenden PCB-Kontamination im Haff zeitlich jünger ist, als das der Schwermetalle, könnte der Anstieg zur Oberfläche auch bedeuten, daß die Vermischung noch nicht so vollständig erfolgt ist. Demzufolge wären die Kurvenverläufe noch in einer gewissen zeitlichen Tendenz zu interpretieren, also der Anstieg der Schwermetallkonzentrationen bereits abgeschlossen war, als die PCB's einsetzten.

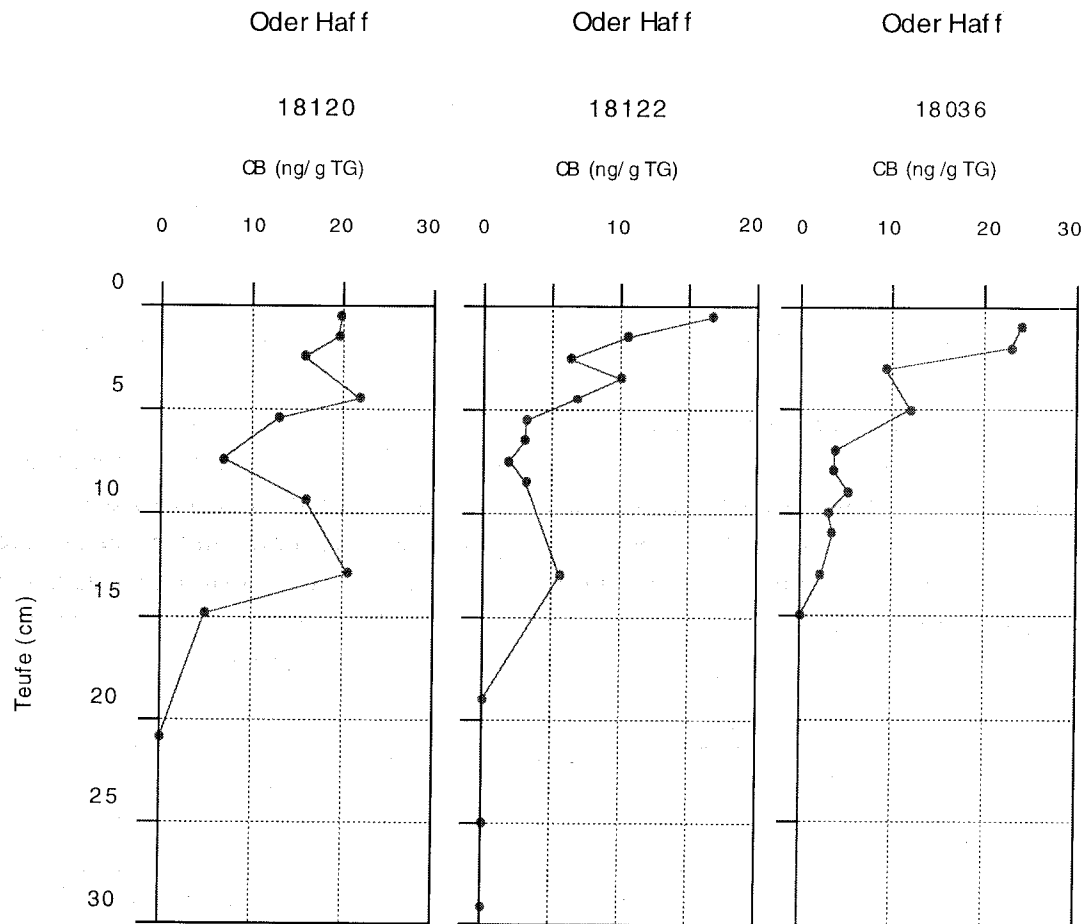


Abbildung 15. Vertikale Verteilung von PCB's in drei kurzen Sedimentkernen des Oderhaffs.

## 6. Postpleistozäne Sedimentation (lange Kerne)







### 6.1. Sedimentcharakteristik und Stratigraphie

Die in Abb. 16 dargestellte Schichtenfolge der langen Sedimentkerne auf einem schematischen West-Südost-Profil durch das Oderhaff verdeutlicht die unterschiedliche Entwicklung des westlichen und des östlichen Haffbeckens. Beide müssen durch eine Schwellenregion über längere Zeiträume mehr oder weniger voneinander getrennt gewesen sein. Während im westlichen Teil die Ingression des Littorinameeres durch die sandigen Cardieschlicke repräsentiert ist, folgt im östlichen Teil auf die limnische Fazies direkt der Brackwasserschlick, der nur gelegentlich einzelne Cardien enthält.

Die Torfhorizonte bzw. Torfmudden verdeutlichen die alte Landoberfläche, die im mittleren Teil, zwischen den beiden Haffbecken, durch eine Schwellenfazies überlagert wird.

Von den im Kleinen und Großen Haff gezogenen Kernen wurden drei pollen- und diatomeenanalytisch ausgewertet (18112, 18118 und 18120). Der Vergleich dieser Kerne untereinander sowie mit den publizierten Bohrungen nördlich des Repziner Hakens (BRAMER, 1978), Zerninsee, Swineniederung Kamminke (beide KLIWE, 1960) und den für das Stettiner Haff beschriebenen Profilen 1, 13 und 31 (MAJEWSKI, 1980) ergibt außer Gemeinsamkeiten in ihrer Entwicklung auch einige, insbesondere die prälitlorinzeitliche Entwicklung betreffende Besonderheiten. Deren Ursachen resultieren sowohl aus der Lage der Bohrpunkte innerhalb der Haffgewässer - die Bohrung 18120 z. B. befindet sich nahe der Südflanke des Großen Haffs nur wenig östlich des Oderdurchflusses - als auch aus der Lage der Sedimentkörper zu NN.

#### Legende zur Abbildung 16:

	Brackwasserfazies, Schlick mit einzelnen Schillresten (Bithynia, Dreissena, Ostracoden) und Pflanzenresten.
	Marine Fazies, sandiger Schlick mit Cardien. zum Teil doppelklappig.
	Schwellenfazies, Feinsand, schluffig, schlickig, mit wenig Schill- und Pflanzenresten.
	Torf, Torfmudde, an der Oberfläche zum Teil aufgearbeitet.
	Torfmudefazies mit reichlich limnischer Fauna und Flora, zum Teil aufgearbeitet.
	Spätglaziale mergelige Sande mit wenig organischen Resten



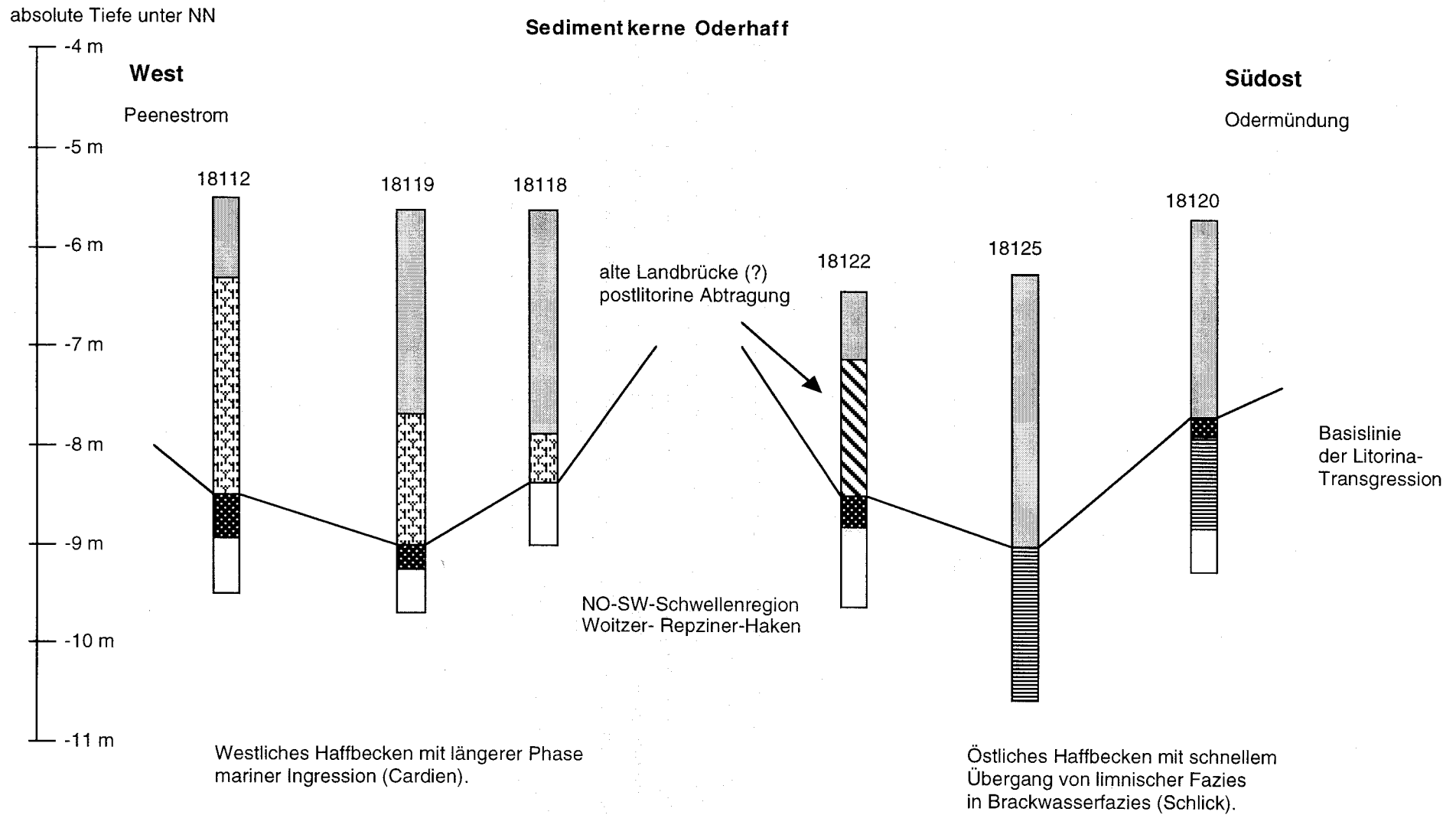


Abbildung 16. Sedimentologische Entwicklung des Oderhaffs am Beispiel einer Reihe langer Sedimentkerne auf einem Profil quer durch das Haff von West nach Südost (Legende siehe Textseite).

Die Spätglazialabfolge der Bohrung 18112 beinhaltet über den Sanden des Haffstausees zwischen 2,90 und 3,40 m (-8,40 m bis -8,90 m NN) ein mehr oder weniger vollständiges Allerödprofil, dessen Feinsand-Torf-Wechselagerung ein sehr flaches Gewässer mit ansteigendem Wasserspiegel charakterisiert. Die artenarme Diatomeenflora ist vorwiegend durch epiphytische und epipelische Arten, insbesondere *Epithemia turgida*, *Cocconeis*- und *Eunotia*-Arten sowie *Achnanthes flexella*, vertreten. Während im Kern 18118 das Spätglazial ausschließlich durch die pollen- und diatomeenfreien Haffstausande verkörpert wird, enthalten die liegenden Sande von 18120 vereinzelt Brackwasser- und oligohalob-halophile Diatomeen. Besonders charakteristisch sind *Campylodiscus echeneis*, *Cyclotella meneghiniana*, *Epithemia adnata*, *Epithemia turgida*, *Rhabdonema arcuatum* und *Rhopalodia gibba*. Die Diatomeenflora dürfte umgelagert sein; sie entspricht in ihrer Artenzusammensetzung ebenso jener des yoldiazeitlichen Rha-Meeres als auch eem- und früh- bis mittelweichselzeitlicher Brackwasserphasen als auch der küstennaher Bereiche der heutigen Ostsee.

Die pollen- und diatomeenanalytisch auswertbaren Profilabschnitte der drei Kerne umfassen die Zeiträume:

- zwischen dem beginnendem Atlantikum (Kern 18120) und der Gegenwart,
- zwischen mindestens 7000 B.P. und der Gegenwart (Kern 18118) und
- zwischen dem Alleröd und dem beginnenden Subboreal (Kern 18112), wobei bei diesem Profil die oberen 2 Sedimentmeter nicht zur Verfügung standen.

Die aus der pollenanalytischen Altersansprache abgeleitete Sedimentationsrate der holozänen Sedimente betrug bei Sand 0,35-0,6 mm und bei Schlick 0,5-1,0 mm pro Jahr, wobei letztere in ihrem basalen Bereich nur Werte um 0,5 und oberflächennah in wenig kompaktierter Form um 1,0 und in den Kurzkernen bis zu 1,3 mm/Jahr erreichen.

Sowohl zeitweise im Spätglazial (Kern 18112) als auch zwischen 8200 und 5000 - bis zum jeweils gebietstypischen Einsetzen der Litorinatransgression - bestanden im Haffgebiet von der Oder bzw. Ücker - Kerne 18120 und 18118 - durchflossene oligotrophe (Spätglazial) bzw. meso- bis eutrophe Seen (Älteres Atlantikum). Der von der Oder durchflossene atlantikumzeitliche See wurde in der im südlichen Zentralbereich des Großen Haffes gelegenen Bohrung 18120 erfaßt. Dieses Gewässer besaß eine artenreiche meso- bis eutrophe Diatomeenflora bei hohem Pflanzen-, Humus- und Nährstoffgehalt. Im oberen Drittel, in 2,2-2,3 m Bohrtiefe der limnisch-fluviatilen Sedimentfolge, ist eine Verlandungsphase mit Massenenwicklung von *Thelypteris phegopteris* zwischengeschaltet, die schon in den Beginn der Pollenzone VII fällt. Die arten- und individuenreiche Diatomeenflora gleicht in ihrer Zusammensetzung durchaus jener des Ancyclus-Großsees, obwohl weder ein zeitlicher noch ein räumlicher Zusammenhang mit ihm bestand. Eine der Litorinatransgression vorausgegangene Seephase mit artenreicher Diatomeenflora ist auch aus den Bohrungen Zerninsee und Swineniederung-Kamminke (KLIWE, 1960) sowie 1 und 31 (MAJEWSKI, 1980) bekannt, wobei im Bereich der polnischen Haffbohrung 1 die Seebildung schon im Boreal einsetzte. Ein in etwa gleichaltriger See füllte während des Atlantikums auch Teile des Peenetales unterhalb Anklam aus (JANKE, 1983), wo in 2,70 m -NN um 5080 ± 100BP die See- von Brackwassersedimenten abgelöst wurden. Die in 2,8 bis 3,9 (-8,6 bis -9,7 m NN) m Tiefe des Kernes 18118 erfaßte Flachseephase ist

diatomeenarm und enthält so gut wie ausschließlich Epiphyten, weist im oberen Drittel jedoch einen kräftigen *Pediastrum*-Gipfel auf.

Im Bereich der sandig-marinen Fazies unterliegen die Pollenkurven im Zusammenhang mit der stärkeren Gewässerdynamik zum Teil markanten Verlaufsschwankungen. Zeittypische Kurvenverläufe werden von Pollenproben älteren umgelagerten Materials unterbrochen. Trotz dieser abschnittsweise möglichen Schwierigkeiten sind die zur zeitlichen Datierung erforderlichen pollenanalytischen Kennwerte (z. B. Buchenmaximum, Getreide- und Kulturbegleiterkurve, Linden- und Ulmenmaximum) gut ausgeprägt.

Die höchste Gewässersalinität bestand zwischen 6000 und maximal 3700 B.P., und ließ gegen Ende des Atlantikums schon merklich nach. Die für die heutigen Boddengewässer charakteristische Schlicksedimentation setzte erst im Verlaufe der subborealen Schließung der Usedomer Außenküsten ein. Die Kontaktbereiche zwischen Offensee und Haffen wurden aber auch in der Folgezeit immer noch weiter eingeengt durch das bis in die Gegenwart sich fortsetzende Wachstum der Zinnowitz-Peenemünder Meeressandebene und der Swine-Nehrung. Ein junger Eutrophierungsschub erfolgte mit der Rodungsphase des 13. Jahrhunderts, die starke Veränderungen im terrestrischen Gewässer- und Nährstoffabfluß nach sich zog. Er äußert sich in einem kurzzeitigen *Pediastrum*-Pik, der zeitgleich mit dem mittelalterlichen Getreide-Pik einsetzt. Im Unterschied zum größten Teil der Schlicksäule weisen die hangenden 1 bis 3 Schlickdezimeter eine artenreiche Diatomeenflora vorwiegend oligohalober/halophiler Arten mit gutem Erhaltungszustand auf. Diatomeenanalytisch können in den Kernprofilen bis zu sechs Entwicklungsabschnitte unterschieden werden (vgl. Abb. 17 a).

## 6.2. Geochemie und Mineralogie der langen Sedimentkerne

Ergebnisse der geochemischen und mineralogischen Untersuchungen über die gesamte holozäne Schichtenfolge sind am Beispiel des Kerns 18120 (und 18125) dargestellt (Abb. 17 a, b), in der auch die stratigraphischen Angaben enthalten sind. Die obersten ca. 10-15 cm der jüngsten, zähflüssigen Schlickauflage fehlen in den langen Kernen, da diese, durch die Probenahmetechnik bedingt, verloren gehen.

Im oberen Kernbereich des Brackwasserschlickes sind die dargestellten Elemente überwiegend durch einen ausgeglichenen Kurvenverlauf gekennzeichnet. Nur einige Schwermetalle zeigen an der Sedimentoberfläche eine Anreicherung, die auf die einsetzende anthropogene Belastung hindeuten. An der Basis des Schlickes zum Torf finden wir die höchsten Schwefelgehalte, die durch Sulfatreduzierung im Pyrit festgelegt sind. Diese Pyritbildung ist in den westlichen Teilen des Haffes und im Achterwasser weitaus stärker und über ein größeres Tiefenintervall ausgeprägt, da dort der Salzwassereinfluß (Sulfatzufuhr) größer war und ist.

Der Torfhorizont besteht aus fast reiner organischer Substanz mit hohem C/N-Verhältnis und geringen anorganischen Beimengungen. Die etwas erhöhten Li-normierten Schwermetallwerte im Torf kommen deshalb rechnerisch zustande und besagen nicht, daß hier erhöhte

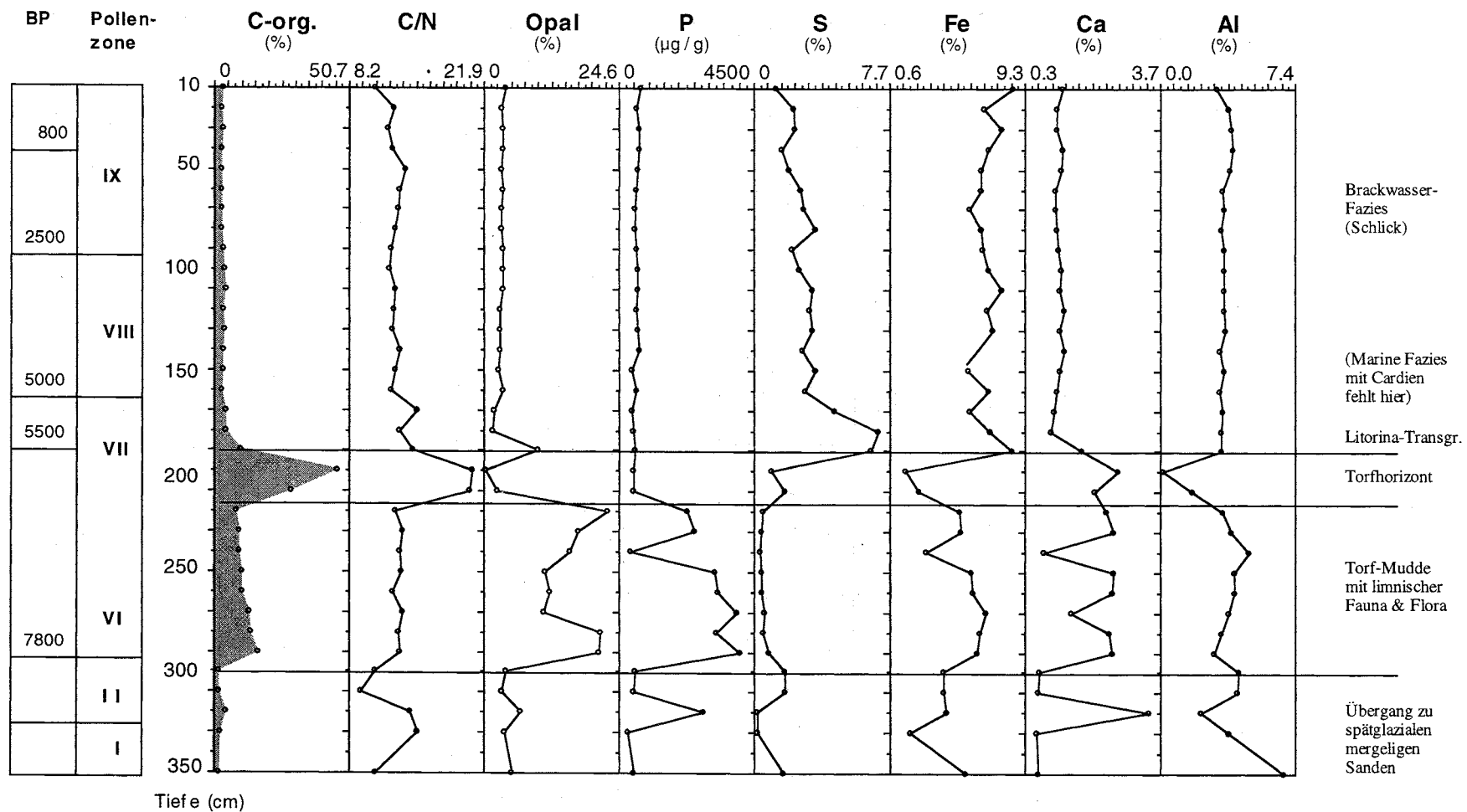


Abbildung 17 a). Altersaufbau, Stratigraphie und Vertikalverteilung ausgewählter geochemischer Parameter im Kern 18120 aus dem Großen Haff.

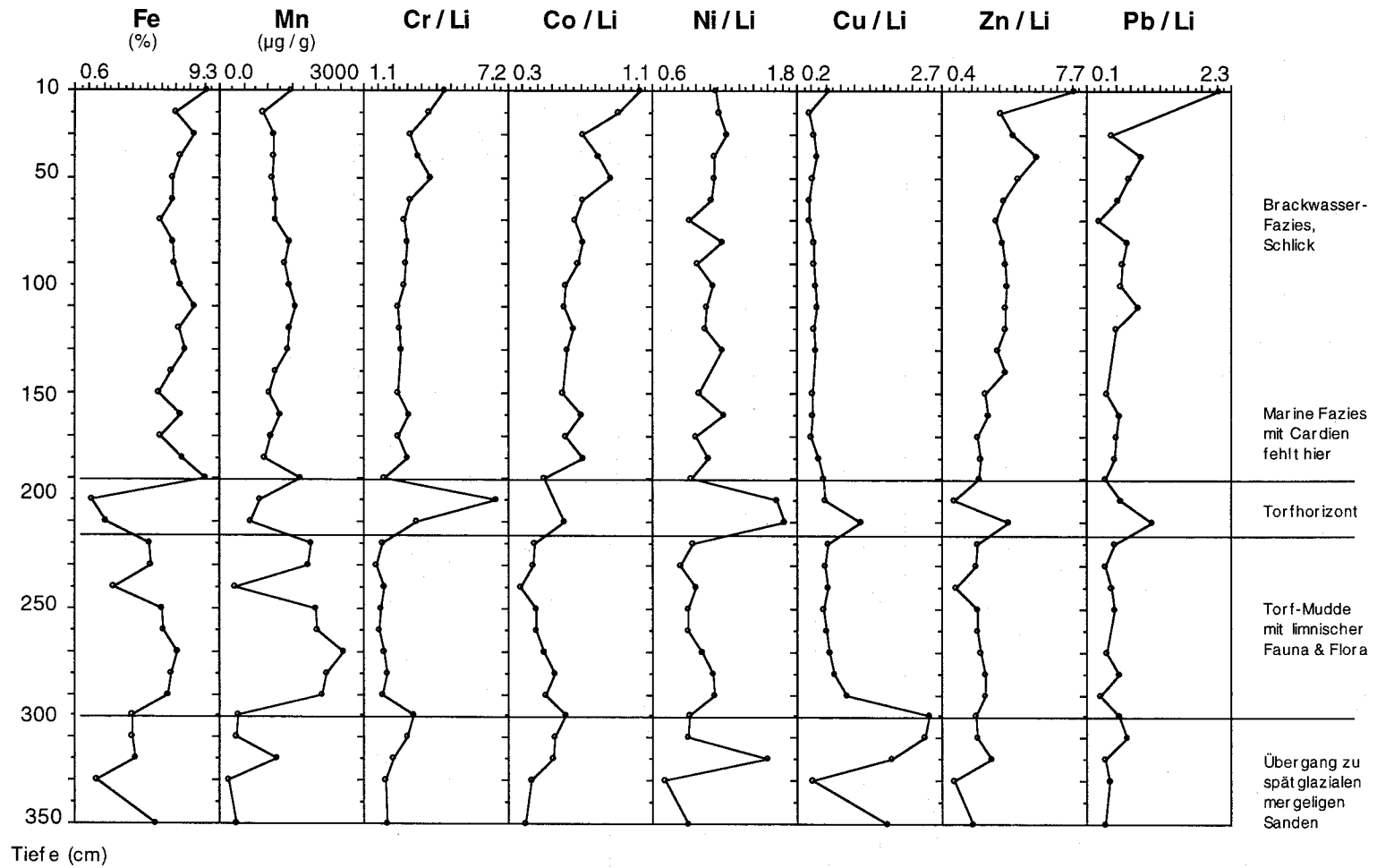


Abbildung 17 b). Vertikale Schwermetallverteilung im Kern 18120 aus dem Großen Haff. Außer für Fe und Mn sind die Li-normierten Quotienten dargestellt, um die natürlichen Schwankungen in der Sedimentzusammensetzung (Ton Gehalt) herauszurechnen (Erläuterungen siehe Text).

Konzentrationen vorliegen. Für die überwiegend klastischen Sedimente kann durch die Li-Normierung der Schwermetalle überprüft werden, ob Anreicherungshorizonte vorliegen, die nicht auf die natürliche Variabilität der Mineralogie (und Korngrößenverteilung) zurückzuführen sind. Das ist für den einsetzenden anthropogenen Eintrag der Fall und in bestimmten Fällen (z.B. Cu) an der Basis der Torfmudde und im Übergangsbereich zum spätglazialen, mergeligen Sand (geochemische Barrieren).

Die Torfmudde ist reich an Phosphor, was möglicherweise auf Eisenphosphatbildungen (Vivianit) hindeutet. Ebenfalls biogener Opal (Kieselskelette von Diatomeen) ist in der Torfmudde in größeren Konzentrationen vorhanden. Die gesamte Folge unterhalb des Brackwasserschlickes ist durch stark schwankende und teilweise hohe Karbonatgehalte (hier Vertreten durch Ca) gekennzeichnet (Schill, limnische Karbonate, Mergel).

An 2 Kernen aus dem östlichen Oderhaff (18120, 18125) wurden Korngrößen, Mineralogie der Gesamtfraktion und semiquantitative Tonmineralanalysen durchgeführt (Abb. 18 a, b, c). Die Kerne reichen mehr als 8000 Jahre B.P. zurück und beinhalten fluviatile, limnische und brackische Sedimente. Die Entwicklung dieser sedimentären Abfolge spiegelt sich deutlich in Korngröße und Mineralbestand wider. Während die Oder vor allem Smektit, Kaolinit und Quarz aus dem Hinterland liefert, entstammen Chlorite, Illite, Feldspäte und Dolomit aus gering verwitterten Geschiebemergeln der Küste und Flachwasserzone. In Kern 18120 gehen die quarzreichen, fluviatilen Sande und Silte des Spätglazials und des Alleröds langsam in limnische Tone und Silte über. Diese Entwicklung wird durch einen Anstieg des Smektit und eine Abnahme von Chlorit und Illit nachgezeichnet. Die höchsten Smektitgehalte, Kaolinit/Chlorit- und Quarz/Feldspat-Verhältnisse werden im Atlantikum während der Ablagerung eutropher Seesedimente erreicht. Nach Auffüllung dieses Sees mit Odermaterial setzte Verlandung mit Torfbildung ein. Die Auflösung von Feldspäten im sauren Milieu erzeugt ein extrem hohes Quarz/Feldspatverhältnis im Gesamtsediment. Ein deutliches marines Signal mit Minima in Smektitgehalten, Kaolinit/Chlorit- und Quarz/Feldspat-Verhältnissen und Maxima in Illitgehalten dokumentiert sich in transgressiven Sanden (5500 Jahre B.P.), die eine brackische Sequenz einleiten deren Ablagerung bis heute andauert. Sie ist durch deutlich niedrigere Smektitgehalte, Kaolinit/Chlorit- und Quarz/Feldspat-Verhältnisse gekennzeichnet als der limnische Faziesbereich und weist durchgehend eine Illit- Chlorit- und Dolomit-reiche Komponente auf, deren Herkunft auf eine Erosion glazialer Geschiebemergel zurückgeführt werden kann. Oberhalb 60 cm Kerntiefe (ca. 1200 Jahre) deutet ein Rückgang dieser Komponenten einen wachsenden Einfluß limnischer Ablagerungsbedingungen und damit eine zunehmende Abschnürung des Oderhaffs an. Eine ähnliche Faziesentwicklung und Tonmineralverteilung zeigt sich in Kern 18125. Aufgrund der höheren Sedimentationsraten werden jedoch nur die limnischen Sedimente des Atlantikums erreicht. Der für die postlitorinen Schlicksedimente typische Pyrit wird im anaeroben Sediment durch die Sulfatreduktion bei Anwesenheit von gelöstem zweiwertigem Eisen neu gebildet. Erst durch die Transgression salzreichen und damit auch sulfatreichen Wassers war die Bildung größerer Pyritmengen möglich geworden. Reduzierbares Eisen ist durch den Flußeintrag genügend vorhanden und die anoxischen Bedingungen im Sediment werden durch das hohe Angebot organischer Substanz gesteuert.

Abb. 18 a) Kern18120

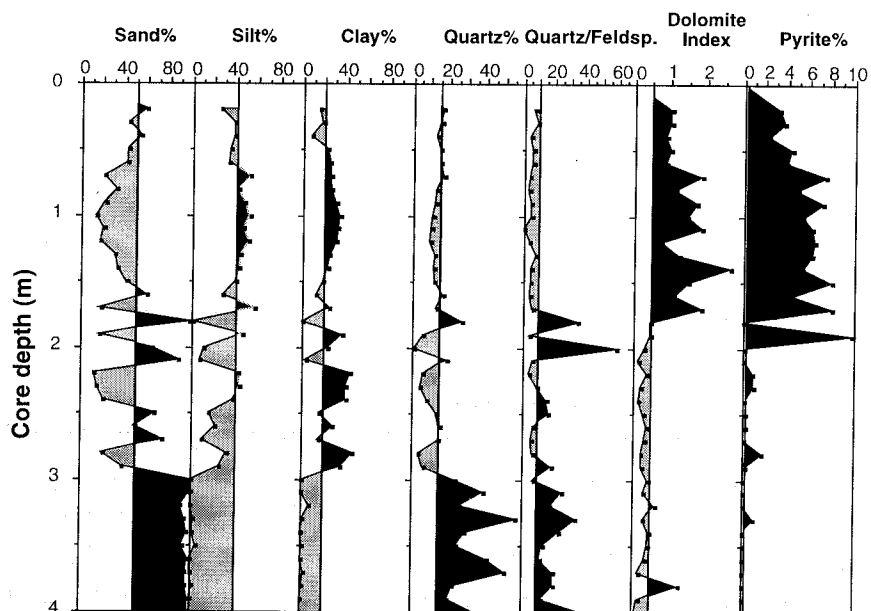


Abbildung 18 a, b. Korngrößenverteilung, Gesamtmineralogie (Gesamtproben) und Tonmineralogie (Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$ ) des Sedimentkerns 18 120 (vgl. Abb. 17).

Abbildung 18 c. Tonmineralogie (Fraktion  $< 2 \mu\text{m}$ ) des Sedimentkerns 18 125. Beide Kerne aus dem Großen Haff.

Legende zur Abbildung 18:





-  Brackwasserfazies, Schlack mit einzelnen Schillresten (Bithynia, Dreissena, Ostracoden) und Pflanzenresten.
-  Torf, an der Oberfläche zum Teil aufgearbeitet.
-  Torfmudde mit reichlich limnischer Fauna und Flora, zum Teil aufgearbeitet.
-  Spätglaziale mergelige Sande mit wenig organischen Resten

Abb. 18 b) Kern 18120

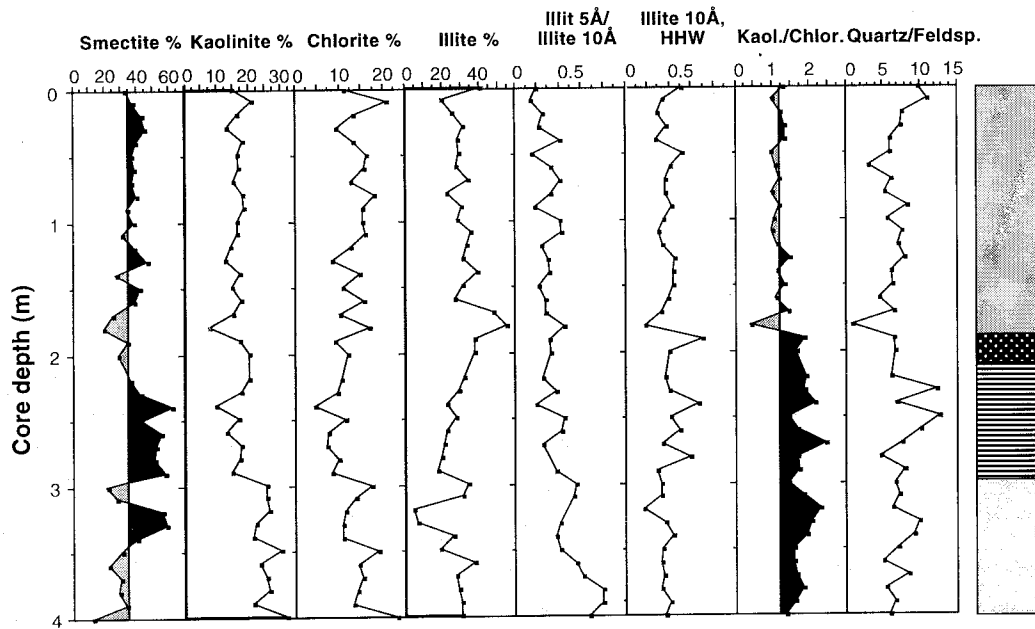
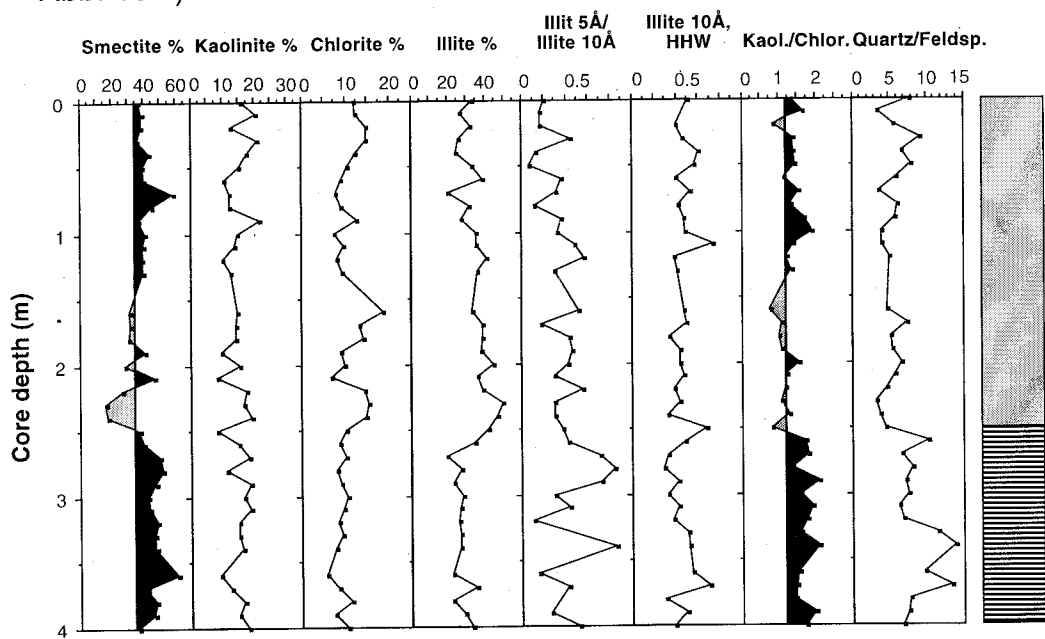


Abb. 18 c) Kern 18125





## 7. Schlußfolgerungen

### 7.1. Sedimentologische Entwicklung des Haffs

Die Basis der von uns untersuchten langen Sedimentkerne (max. 4 Meter) bilden spät- oder postpleistozäne mergelige Sande auf denen geringmächtige Torfe und Torfmudden auflagern, die den fluvial-limnischen Charakter dieser alten Landoberfläche repräsentieren. Über diesen Torfen, die an der Oberfläche teilweise aufgearbeitet sind, setzt nach der Litorina-Transgression zunächst eine im westlichen und im östlichen Haffbecken unterschiedliche Entwicklung ein.

Die litorine Hauptphase der Transgression erreichte von Norden her das morphologisch vorgeprägte Haffbecken, wobei sich nur im westlichen Haff eine über längere Zeit stabile, an höher salinare Wässer gebundene Cardiengemeinschaft herausgebildet hat, die heute in der 1-2 m mächtigen marinen Fazies (sandiger Schlick mit reichlich Cardenschill, auch doppelklappig) enthalten ist. In östlichen Haff dagegen finden sich an der Basis des Schlickes nur sehr vereinzelt Schalenreste von Cardien. Daß auch in diesem Gebiet anfangs höhere Salinitäten anzutreffen waren, ist in den geochemischen und mineralogischen Profilen des Sedimentkernes 18120 zu erkennen. Dort finden sich an der Basis des Schlickes höhere Schwefel- und Pyritgehalte, die nach oben hin beständig abnehmen. Im Prinzip jedoch folgen im östlichen Haff auf den limnischen Torfen sofort die Brackwasserschlicke (mit *Bithynia*, Ostracoden, *Dreissena* und Pflanzenresten), deren Ausprägung sich bis in die heutige Zeit kaum verändert hat. Im westlichen Haff setzen diese Brackwasserschlicke zeitlich verzögert erst über den Cardien-schichten ein. Über die Ursachen dieser räumlichen Differenzierung kann man spekulieren. Es bietet sich aber folgende Erklärung an:

Das östliche und das westliche Haff waren zur Zeit des Meeresspiegelanstieges und auch noch längere Zeit danach durch eine Landschwelle vollständig voneinander getrennt. Diese alte Landbrücke verlief etwa entlang der heutigen deutsch-polnischen Grenze im Bereich der Einschnürung zwischen Großem und Kleinem Haff vom Woitziger Haken im Nordosten zum Repziner Haken im Südwesten. Sie begrenzte vor der Transgression den Verlauf der Oder im Westen, die damals über die Swinepforte nach Norden entwässerte. Mit dem Meeresspiegelanstieg drang über den heutigen Peenestrom aus dem Greifswalder Bodden und vielleicht auch über Usedom (Koserower Niederung) salziges Wasser in das Kleine Haff ein und bildete dort über längere Zeit ein marines Milieu mit entsprechender Fauna (Cardien). Wegen der geringen Zuflüsse vom Festland und des guten Wasseraustausches mit der Ostsee war die Tendenz zur Aussüßung nur zögerlich verlaufen. Im Großen Haff dagegen war durch den mächtigen Oderfluß auch nach dem Meeresspiegelanstieg immer nur sehr salzarmes Wasser vorhanden. Somit existierten damals ein salzreiches westliches Haff und ein salzarmes östliches Haff als getrennte Gewässer nebeneinander. Gleichzeitig setzte durch die erosive Wirkung des Wassers in den aufgefüllten Haffbecken eine Abtragung der Landschwelle ein, die zum Durchbruch dieser Barriere und zum Ende der Salzwasserperiode im Kleinen Haff führte. Der damit neu geschaffene Weg des Ausstroms von Oderwasser in nordwestliche Richtung über das

Kleine Haff gewann an Bedeutung, da im Zuge der allgemein einsetzenden Küstenausgleichsprozesse die Swinepforte im Norden stark eingeengt wurde.

Dieser Durchbruch ist als Rinne (bis max. 8 m Wassertiefe) in der Mitte der Einschnürung zwischen den beiden Haffs bis heute erhalten und wegen der häufig starken Strömung in diesem Bereich nicht zusedimentiert. Bei der im Kern 18122 als Schwellenfazies gekennzeichneten Sedimentschicht könnte es sich um die erodierten, umgelagerten Sedimente der ehemaligen Landschwelle handeln. Den vorläufigen Abschluß der sedimentologischen Entwicklung im Haff bilden die weitverbreiteten Schlicke, welche im westlichen Teil bis 2 m, im östlichen Teil bis über 3 m und in den Schwellen- und Randbereichen des Haffs weniger als 1 m Mächtigkeit erreichen.

## **7.2. Anthropogener Einfluß, Kontamination, Eutrophierung**

Wie wir in den Darstellungen der geochemischen Befunde an den Oberflächensedimenten und Kurzkernen gesehen haben läßt sich der anthropogene Einfluß deutlich vom vorindustriellen, natürlichen Untergrund trennen. Wegen der Unmöglichkeit einer exakten Altersbestimmung kann auf der Basis der  $^{210}\text{Pb}$ -Untersuchungen für den Zeitraum der intensiven Kontamination nur eine summarische Periode von ca. 80-100 Jahren angenommen werden. Alle Ablagerungen aus diesem Zeitraum sind in einer ca. 15 cm mächtigen Schicht an der Sedimentoberfläche des Schlicks enthalten, die mehr oder weniger intensiv durchmischt ist. Die mittleren Konzentrationen der Schwermetalle, Nährstoffelemente und organischen Schadstoffe liegen hier höher als in den angrenzenden Ablagerungsräumen der südlichen Ostsee und ihrer Küstengewässer. Wir können davon ausgehen, daß in der Periode der Industrialisierung und Intensivierung der Landwirtschaft die Prozesse der Eutrophierung und Kontamination mit Schadstoffen parallel verlaufen sind.

Ob nun die Schadstoff-Fracht der Oder über längere Zeit im Haff zurückgehalten (Auffangbecken, Pufferwirkung) oder schnell in die vorgelagerte Ostsee weitertransportiert wird und welche Massenbilanzen sich daraus ergeben, soll im folgenden behandelt werden. Dabei spielen die Prozesse des Transportes, der Ablagerung und der Resuspension (Sedimentdynamik) eine besondere Rolle.

Solange die Haffbecken nach ihrer Überflutung einer mehr oder weniger raschen und kontinuierlichen Auffüllung unterlagen, wurde die Verteilung des durch die Oder eingetragenen Materials im wesentlichen durch die Transportkapazität des Wassers bestimmt. Mit zunehmender Verflachung gewinnen aber Durchmischung und Resuspension von Sedimenten infolge Grundeinwirkung des Seeganges an Bedeutung, da diese von dem Verhältnis der Oberfläche zur mittleren Tiefe eines Gewässers abhängig ist (s. LAMPE u.a., 1987). Zoobenthische Lebensgemeinschaften haben ebenfalls eine beträchtliche Resuspensionswirkung, abgesehen von der eigentlichen Bioturbation im Sediment selbst.

Neben diesen natürlichen Prozessen treten in der jüngsten Zeit direkte Eingriffe des Menschen durch Grundfischerei, Ausbaggerungen der Schifffahrtslinien und durch die Motorschifffahrt (Schraubenwasser) als zusätzliche Ursachen einer erhöhten Sedimentdynamik in Erscheinung.

Sollten nun insbesondere die natürlichen Prozesse der Resuspension und Sedimentdynamik immer in gleicher Intensität gewirkt haben, so hätte sich der nachgewiesene "Hartgrund" in Form einer Karbonatlage und der markante Sprung von Elementen (s.  $^{210}\text{Pb}$ , Schwermetalle usw.) vom natürlichen Untergrund auf das hohe Niveau an der Basis des Durchmischungshorizontes nicht herausbilden können. Die gemessenen Parameter würden in diesem Fall kontinuierlich ansteigen, je nach Sedimentationsgeschwindigkeit und die Durchmischungszone würde mit dem Aufwachsen des Sedimentes nach oben wandern.

Deshalb muß es Veränderungen in der Sedimentdynamik gegeben haben, die zu der jetzigen Situation führten. Eine wesentliche Ursache könnte die um die Mitte des Jahrhunderts weiträumig einsetzende Eutrophierung der Gewässer sein. Die dadurch einsetzende Massenvermehrung des Phytoplanktons hat mit ihren bekannten Folgen (erhöhte Trübung, Absterben der Makrophytenbestände, verstärkte Sauerstoffzehrung im Sediment) vermutlich zur Destabilisierung des Sedimentes beigetragen (LEIPE, 1997).

Da die nach-litorinazeitliche Sedimentation bereits zur weitgehenden Auffüllung der Becken geführt hatte (die durchschnittliche Wassertiefe im Haff beträgt nur 5 m), konnte die Grundeinwirkung des Seeganges zum entscheidenden Prozess der Sedimentremobilisierung werden. Die Folge ist eine bedeutende Erhöhung des Schwebstofftransportes, die bis heute andauert. Es liegt nahe zu vermuten, daß gegenwärtig überhaupt keine Netto-Sedimentation im Haff mehr stattfindet. Das von der Oder eingetragene Material wird zunächst teilweise abgelagert, periodisch in die Sedimentoberfläche eingemischt, resuspendiert und früher oder später in die Ostsee weiter transportiert. Praktisch ist damit der Zustand eines dynamischen Gleichgewichtes, mit ausgeglichener Bilanz erreicht.

Weitere Indikatoren für die Hypothese, daß die Eutrophierung als Ursache für die Herausbildung des charakteristischen Durchmischungshorizontes in Frage kommt, sind die deutlich höheren Karbonatgehalte und C-org.-Gehalte in dieser Schicht (s. Abb. 13 a). Die durch das eutrophe Wasser einsetzende Massenvermehrung des Phytoplanktons führte neben der erhöhten Akkumulation von Biomasse zu einer sommerlichen pH-Verschiebung des Wasserkörpers ins Basische und zur biochemischen Kalzitfällung. ANDRÉN (1995) konnte anhand von Diatomeenprofilen in Sedimentkernen der Oderrinne vor Saßnitz nachweisen, daß etwa nach der Jahrhundertwende ein charakteristischer Wechsel von periphytischen Arten zu planktonischen Arten einsetzte. Dieser Befund wird ebenfalls als Ausdruck der einsetzenden Eutrophierung gewertet, da die Tiefe der euphotischen Schicht (Lichteinfall bis zum Grund) geringer wurde.

Die bereits erwähnte Karbonatlage, die sich als Hartgrund an der Basis des Durchmischungshorizontes ausgebildet hat und die aus größeren Schillpartikeln, Ostracodenschalen, chemisch gefällten Kalziten und untergeordnet auch aus größerem silikatisch-detritischen

Material besteht, ist dann eine Folge der periodischen Durchmischung der Sedimentoberflächenschicht bis auf dieses Tiefenniveau (ca. 15 cm).

### 7.3. Massenbilanzen

An Hand von Beispielen einiger Parameter soll versucht werden, über Massenbilanzen die Pufferkapazität des Haffs als "Zwischenlager" im Übergangsbereich vom Fluß zur Ostsee zu charakterisieren.

In den Tabellen 5, 6 und 7 sind die Ergebnisse der Kalkulationen für einzelne Schwermetalle und für das Gesamtsediment aufgeführt. Als Basis für die Berechnungen des Odereintrages wurden die Daten aus DEHMEL (1992) und HELCOM (1993) verwendet. Die Mengenergebnisse im Oderhaff basieren auf der Abschätzung der flächenmäßigen Verbreitung feinkörniger Schlicksedimente (ca. 350 km<sup>2</sup>) und einer mittleren Mächtigkeit der durchmischten Oberflächenschicht von 15 cm, die nach den 210-Pb-Befunden mindestens alle Ablagerungen aus den zurückliegenden ca. 100 Jahren enthält.

Für die durchmischte Oberflächenschicht konnte eine mittlere Trockenraumdichte (dry bulk density) von 0,192 g/cm<sup>3</sup> und eine "scheinbare" lineare Sedimentationsrate von 1,5 mm/Jahr ermittelt werden. Das entspricht einer durchschnittlichen Massen-Akkumulationsrate von 0,29 kg/m<sup>2</sup>/Jahr (Trockensubstanz, Gesamtsediment). Für den natürlichen Untergrund des holozänen Schlickes im Haff betragen die entsprechenden Werte für Trockenraumdichte im Mittel 0,280 g/cm<sup>3</sup> und die "scheinbare" lineare Sedimentationsrate 1,0 mm/Jahr. Wegen der oben erläuterten Mischungsprozesse kann die scheinbare lineare Sedimentationsrate an der Sedimentoberfläche nicht im Sinne eines ungestörten, kontinuierlichen Aufwachsens des Sedimentes gedeutet werden.

Tabelle 5: Massenberechnungen von Sedimentparametern für Schlicksediment im Oderhaff. Die Daten beziehen sich nur auf die durchmischte Oberflächenschicht (mittlere Mächtigkeit: 15 cm) und eine Fläche von ca. 350 km<sup>2</sup> Schlickbedeckung im Haff.

	Gehalte bzgl. DBD (mg/cm <sup>3</sup> )	Masse (15 cm Mächt.) (kg/m <sup>2</sup> )	Gesamtmasse (350 km <sup>2</sup> ) Tonnen (t)
Gesamtsediment (trocken)	192	28,80	10.080.000
C-org.	19,0	2,85	996.912
CaCO <sub>3</sub>	34,6	5,18	1.814.400
P	0,58	0,086	30.240
Al	5,86	0,878	307.440
Fe	6,11	0,916	320.544
Mn	0,61	0,092	32.256

Von insgesamt 10 untersuchten Sedimentkernen im Oderhaff wurden für die beschriebenen, charakteristischen Horizonte Mittelwerte aller Parameter berechnet, die den Massenbilanzen zugrunde gelegt werden können. Für die Schwermetalle wurden von den Gesamtgehalten in der

durchmischen Oberflächenschicht die vorindustriellen, geogenen Untergrundwerte abgezogen, um den anthropogenen Anteil zu erfassen.

Tabelle 6: Massenbilanzen für Schwermetalle im Schlicksediment des Oderhaffs.

Element	Konzentrationen bezgl. Trockensubst.			Gehalte bei DBD=0,192 g/cm <sup>3</sup>		
	gesamt (µg/g)	natürlich (µg/g)	anthropogen (µg/g)	gesamt (µg/cm <sup>3</sup> )	natürlich (µg/cm <sup>3</sup> )	anthropogen (µg/cm <sup>3</sup> )
Pb	12,0	2,2	9,8	23,0	4,2	18,8
Zn	80,0	7,6	72,4	153,6	14,5	139,1
Cu	6,0	1,9	4,1	11,5	3,6	7,9
Cd	4,5	0,5	4,0	0,86	0,10	0,77
Hg	1,0	0,1	0,9	0,19	0,02	0,17

Element	15 cm Sedimentmächtigkeit			350 km <sup>2</sup> Schlickgebiet		
	gesamt (g/m <sup>2</sup> )	natürlich (g/m <sup>2</sup> )	anthropogen (g/m <sup>2</sup> )	gesamt (t)	natürlich (t)	anthropogen (t)
Pb	3,46	0,63	2,82	1.210	222	988
Zn	23,04	2,18	20,86	8.064	762	7.302
Cu	1,73	0,55	1,18	605	192	413
Cd	0,130	0,014	0,115	45	5	40
Hg	0,029	0,003	0,026	10	1	9

Auf der Basis der genannten Werte ergibt sich eine Gesamtmenge von ca. 10 Millionen Tonnen Trockensediment im Schlick der durchmischen, kontaminierten Oberflächenschicht für das gesamte Haff. Da dieser Horizont nach den Befunden der 210-Pb-Daten alle Ablagerungen der letzten ca. 100 Jahre enthält, kann in Beziehung zu den mittleren Daten des Sedimenteintrages durch die Oder eine Auffüllzeit von 24 Jahren berechnet werden. Das heißt, daß wir heute nur etwa 1/4 des gesamten Eintrages im Haff wiederfinden. 3/4 sind in dieser Zeit bereits in die vorgelagerte Ostsee weitertransportiert worden.

Für die partikulär gebundenen Schwermetalle Pb, Zn und Cu ergeben sich analog Füllzeiten von nur etwa 10 Jahren. Berücksichtigt man die Geschichte des Metalleintrages in die Sedimente der westlichen Ostsee (LEIPE u.a., 1995), die ein deutliches Maximum von etwa 1940 bis heute ausweist, so kann für die letzten 50 Jahre eine Schwermetallfracht von der Oder in die Ostsee postuliert werden, die um das Vierfache höher liegt, als das was wir heute noch in den Haffsedimenten nachweisen können.

In ähnlichen Relationen bewegen sich die Kalkulationen für Eintrag und Ablagerung von Chlorbiphenylen (PCB's) im Oderhaff. Setzen wir als Zeitraum der intensiven technischen Verwendung und Umweltbelastung dieser Substanzen die letzten 40 Jahre an, so ergibt sich ein Eintrag von ca. 460 kg in das Haff im Verhältnis zu ca. 95 kg, die im Sediment des Oderhaffes wiederzufinden sind (20%). Als Berechnungsgrundlage für den Odereintrag wurden die aktuellen Konzentrationen von PCB's in der Schwebfracht direkt vor der Odermündung verwendet, da entsprechende Daten aus dem Fluß nicht verfügbar sind.

Tabelle 7: Massenbilanzen für Schwermetalle im Sediment und für Schlicksediment (gesamt) im Oderhaff in Beziehung zum Odereintrag.\*

Element	Oderhaff (gesamt) (t)	Oder (Fracht) (t/Jahr)	Oderhaff Füllzeit (Jahre)
Pb	1.210	85	14,2
Zn	8.064	700	11,5
Cu	605	50	12,1
Cd	45	4	11,3
Hg	10	1	10,0
Sediment	10 Mill.	425.000	23,5

\*Die Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf die kontaminierte durchschnittlich 15 cm mächtige Oberflächenschicht des Schlickes mit einer Bedeckung von etwa 350 km<sup>2</sup> im gesamten Haff und unter der Annahme einer konstanten Frachtrate der Oder. Die „Füllzeit“ entspricht der theoretischen Zeitdauer die nötig ist, um die in dieser Sedimentschicht vorgefundenen Mengen zu erklären.

Die Nährstoffelemente bzw. Nährsalze haben die Besonderheit der hohen Reaktivität und relativ kurzen Verweilzeit in den verschiedenen Komponenten des Ökosystems (organisch und anorganisch gebunden, partikulär und gelöst). Deshalb ist eine Bilanzierung dieser Stoffe schwierig. Die Mengen für Gesamt-P und Gesamt-N in der durchmischten Schlickschicht an der Sedimentoberfläche des Haffes belaufen sich auf ca. 30.000 t (P) und 100.000 t (N). Setzen wir nun dieses Reservoir in Beziehung zu den durchschnittlichen Einträgen an Gesamt-P und -N durch die Oder für den Zeitraum der stärksten Eutrophierung der letzten 50-60 Jahre (4.000 t P und 38.000 t N pro Jahr), so ergeben sich in der Größenordnung Werte von 15% P und 6% N, die in partikulärer Form im Haffsediment „zurückgehalten“ wurden.

Tabelle 8 gibt eine grobe Abschätzung der „Pufferkapazität“ des Oderhaffes bezüglich der Speicherung von Gesamtsediment, partikulär im Sediment gebundenen Nährstoffen und Schadstoffen in Beziehung zum Odereintrag.

Die Diskrepanzen zwischen den voneinander unabhängig berechneten Anteilen von Eintrag, Ablagerung und Durchgang von resistenten Schadstoffen und Sediment sind relativ gering, was unsere These bestätigt. Man muß bedenken, daß über längere Zeiträume keine entsprechenden Daten z.B. für Schwermetalle und chlorierte Kohlenwasserstoffe aus der Oder verfügbar sind. Somit geben diese Resultate eine realistische Vorstellung, von der „Pufferkapazität“ des Oderhaffes.

Tabelle 8: Grobe Abschätzung der „Pufferkapazität“ des Oderhaffs bezüglich der Speicherung von Gesamtsediment (Schlick), partikulär gebundenen Nährstoffen und Schadstoffen im Übergangsbereich zwischen Oder und Ostsee.

Material	Verbleib im Oderhaff	Abtransport in die Ostsee	Bezugszeitraum in Jahren v. H.
Sediment	1/4	3/4	100
Schwermetalle	1/5	4/5	50
PCB's	1/5	4/5	40
Nährstoffe	1/10	9/10	50

Ein Vergleich mit entsprechenden Untersuchungen über Akkumulationsraten von Schwermetallen in den Beckengebieten der westlichen Ostsee macht den Gesamtzusammenhang deutlich. Zwar sind die gemessenen Konzentrationen für alle Schwermetalle in den Haffsedimenten am größten, jedoch wird wegen der Unterschiede in den Trockenraumdichten der Sedimente und linearen Sedimentationsraten z.B. im Arkonabecken für Pb und Cu die dreifache Menge pro Flächen- und Zeiteinheit abgelagert (Leipe u.a., 1995). Damit ist die Ostsee und ihre Sedimentbecken als „Endlager“ der kontaminierten Fracht der Oder zu verstehen.

Für den Versuch einer Prognose würde das bedeuten, daß bei sinkender Schadstofffracht der Oder das Haff innerhalb weniger Jahrzehnte einen „Reinigungsprozess“ durchläuft, der die kontaminierte Deckschicht des Sedimentes sukzessive durch neu eingetragenes Material „verdünnt“, austauscht und in die Ostseebecken abtransportiert. Wegen der zeitlichen Verzögerung der Wirkung von Umweltschutzmaßnahmen im gesamten Einzugsgebiet der Oder wird dieser Prozess jedoch noch längere Zeiträume in Anspruch nehmen.

## 8. Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten entstanden, wofür unseren Förderern Dank gebührt: European Commission - Environment Programme, Project „Oder Discharge Environmental Response“, Contract # EV5V-CT 920063. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Projekt „Greifswalder Bodden und Oderästuar - Austauschprozesse“ FKZ 03F 0095 C, und Projekt „Frühdigenese und Milieuindikation der Mineralassoziationen spätquartärer Schlicksedimente in der westlichen Ostsee“ FKZ 03F 0101 A. Die Arbeiten zur flächendeckenden Untersuchung von organischen Schadstoffen in Sedimenten des Oderästuars wurden vom Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommerns unterstützt.

## 9. Literaturverzeichnis

- ALBRECHT, H., 1993: Normalizing of trace metal concentrations in sediments. - ICES Report of the working group on marine sediments in relation to pollution, Charlottenlund, Denmark, 31. March - 3. April 1993, p. 28-38.
- ANDRÉN, E., 1995: Recording environmental changes in the Southern Baltic Sea - current results from a diatom study within Project ODER. - in: MARINO, D., MONTRESOR, M. (eds.): Proceedings of the 13th International Diatom Symposium, Maratea, Italy, 1st-7th September 1994, pp. 443-455, Biopress Ltd., Bristol.
- BALLSCHMITER, K., ZELL, M., 1980: Analysis of chlorinated biphenyls by gas capillary chromatography. *Fresenius Z. Anal. Chem.* 302, 20-31.
- BCEOM. French Engineering Consultants, 1992: Prefeasibility study of the Oder/Odra river basin. Commission of the European Communities. Dir. XI-C2.
- BLANZ, T., 1996: Dokumentation und Massenbilanz des Chlorbiphenyl-Eintrages der Oder in die südpommerische Bucht. *Ber. Inst. f. Meereskunde Kiel*, Nr. 277, 101 S., Anhang.
- BLANZ, T., EMEIS, K.-C., PETRICK, G., SCHULZ-BULL, D. E., 1997: Bilanzierung und Quantifizierung des Chlorbiphenyl-Eintrages in das Oderhaff. - *Meyniana* 49, 47-58.
- BRAMER, H., 1978: Über Transgressionsvorgänge am Südrand des Kleinen Haffs. - *Wiss. Zeitschr. d. E.-M.-Arndt-Univ. Greifswald, Math.-nat. Reihe*, 27, 1/2, S.11-15.
- BRANDT, K., 1896: Über das Stettiner Haff. - *Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen N.F.*, Bd. 1, Heft 2, S. 109-121, Kiel und Leipzig.
- BUCKMANN, K.; PFEIFFER, K., 1995: Hydrographische Messungen, Datenauswertung und -aufbereitung sowie Simulation der Hydrodynamik und der Wasserrausaustauschprozesse. Zwischenbericht zum BMFT-Projekt GOAP (03F0095C), Teilprojekte 2 und 2b. Univ. Greifswald, 12 S.
- CALLAWAY, J.C., DELAUNE, R.D., PATRICK Jr., W.H., 1996: Chernobyl 137Cs used to determine sediment accretion rates at selected northern European coastal wetlands. - *Limnology and Oceanography* 41, 444-450.
- CORRENS, M., 1979: Der Wasserhaushalt der Bodden- und Haffgewässer der DDR als Grundlage für die weitere Erforschung ihrer Nutzungsfähigkeit zu Trink- und Brauchwasserzwecken. *Diss. B*, Berlin.
- DANNENBERGER, D., WITT, G., LERZ, A., TROST, E., 1996: Untersuchungen zur Belastung der Sedimente mit organischen Schadstoffen im westlichen Oderästuar (Kleines Haff, Peenestrom) und dessen vorpommerische Zuflüsse (Peene, Uecker, Randow, Zarow, Ziese). - *Abschlußbericht, Institut für Ostseeforschung Warnemünde*, 33 S., Anhang.
- DANNENBERGER, D., 1996: Chlorinated microcontaminants in surface sediments of the Baltic Sea - investigations in the Belt Sea, the Arkona Sea and the Pomeranian Bight. *Mar. Poll. Bull.* 32, 772-781.
- DEHMEL, H., 1992: Analyse und Auswertung des vorhandenen Datenmaterials zur Bewertung der Wasserbeschaffenheit der Oder. - *Texte des Umweltbundesamtes 7/92*, 51 S. 203 Anl., Bonn.
- EIDAM, J.; LEHMANN, J.; PUFF, T.; FIETZ J., 1995: Schwermetallverteilung in Sedimenten und Schwebstoffen des Oderästuars. *Nachr. Dt. Geol. Ges.* 54, 59 - 60.



- EIDAM, J., PUFF, T., LEHMANN, J., FIETZ, J., 1995: Geochemische Charakterisierung von rezenten Sedimenten im Oder-Ästuar. - Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H.1/2, S. 63-72.
- EISMA, D., IRION, G., 1988: Suspended Matter and Sediment Transport. in: SALOMONS et. al. (Eds.): Pollution of the North Sea. An assessment. S. 20-35. - Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- EISMA, D., 1988: Transport and Deposition of Suspended Matter in Estuaries and the Nearshore Sea. in: LERMAN, A. and MEYBECK, M. (Eds.): Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles. S. 273-298. - Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- EISMA, D., 1993: Suspended Matter in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- FIETZ, J., 1996: Die Schwebstoffe des Odermündungsgebietes - geochemische und phasenanalytische Untersuchungen. Unveröffentl. Diss. E.-M.-Arndt-Universität Greifswald, 139 S., 5 Anl.
- GELLERMANN, R., WEIß, D., BRÜGMANN, L., 1990: Datierung von Ostseesedimenten mit  $^{210}\text{Pb}$ . - Isotopenpraxis, 26, 375-380.
- GEORGI, F., 1985: Verteilung und Beschaffenheit des Sestons in inneren Küstengewässern der DDR sowie der westlichen und mittleren Ostsee unter besonderer Berücksichtigung der Wasseraustauschprozesse zwischen beiden Systemen. Beiträge zur Meereskunde 52, 35-48, Berlin.
- Gewässergütebericht 1994: Gütezustand der oberirdischen Gewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers in Mecklenburg-Vorpommern. Herausgeber: Der Minister für Bau, Landesentwicklung und Umwelt des Landes Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin 1996.
- GINGELE, F.X., LEIPE, T., 1997: Clay mineral assemblages of the western Baltic Sea: recent distribution and relation to sedimentary units. - Marine Geology 140, pp. 97-115.
- HAACK, E., 1960: Das Achterwasser. Eine geomorphologische und hydrographische Untersuchung. - Neuere Arbeiten zur mecklenburgischen Küstenforschung, 4. - VEB Deutscher Verlag d. Wissenschaften; Berlin.
- HELCOM (Baltic Marine Environment Protection Commission), 1993: Second Baltic Sea Pollution Load Compilation. - Baltic Sea Environment Proceedings No. 45, 161 p.
- INSTYTUT METEOROLOGII I GOSPODARKI WODNEJ, 1995: Warunki srodowiskowe Polskiej strefy poludniowego Baltyku w 1994 roku. Gdynia, 216 p.
- JANKE, W., 1983: Natürliche Ausstattung, Nutzung und jüngere Landschaftsveränderungen im unteren Peenetal bei Anklam. - Wiss. Zeitschr. d. E.-M.-Arndt-Univ. Greifswald, Math.-nat. Reihe, 32, S. 57-69.
- KEILHACK, K., 1912: Die Verlandung der Swinepforte. - Jahrbuch d. Preuß. Geol. Landesanstalt, 32, Teil II, 2, S. 209-244. Berlin.
- KEILHACK, K., 1928: Zur Frage des Haffstausees. - Jahrbuch d. Preuß. Geol. Landesanstalt, 48, S. 662-666. Berlin.
- KIRCHNER, H.-E., 1994: Zur Mineralogie und Geochemie von Sedimenten der Oder. Unveröff. Diplomarbeit, Univ. Greifswald, 58 S.
- KLIEWE, H., 1960: Die Insel Usedom in ihrer spät- und nacheiszeitlichen Formenentwicklung. - Neuere Arbeiten zur mecklenburgischen Küstenforschung No. 5. VEB Deutscher Verlag d. Wissenschaften, Berlin.

- KOLP, O., 1983: Die schrittweise Verlagerung der Odermündung von der Bornholmmulde bis in die Oderbucht infolge holozäner Wasserstandsänderungen im südlichen Ostseeraum. - *Petermanns Geogr. Mitteilungen*, 127, S. 73-87.
- KOPCZYŃSKA-LAMPARSKA, K., CIESLA, A., SKOMPSKI, S., 1984: Evolution of fossil lake basins of the Late Glacial and Holocene in the cliff near Niechiorze (Pomeranian Lakeland, Poland) - *Quaternary Studies in Poland*, 5, S. 39-58.
- KRAUSE, F., 1992: Phasenanalytische und geochemische Untersuchungen an Schwebstoffen und Sedimenten der Oder, des Oderhaffs und angrenzender Gewässer. - Dipl. Arb., Universität Greifswald, 88 S.
- LAMPE, R., GOMOLKA, A., LEIPE, T., SLOBODDA, S., VOIGTLAND, R., 1987: Ergebnisse der Untersuchung von Struktur und Dynamik von Boddenküsten. - *Wiss. Z. d. E.-M.-Arndt-Univ. Greifswald, Math.-naturwiss. Reihe* 36, 99-111.
- LAMPE, R., 1993: : Environmental state and material flux in the western part of the Oder river estuary - results and consequences. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 137, 275-282.
- LAMPE, R., 1994: Die vorpommerschen Boddengewässer - Hydrographie, Bodenablagerungen und Küstendynamik. - *Die Küste* 56, 25-49.
- LAMPE, R., MEYER, H., 1995: Sedimentqualität und hydrographische Bedingungen - ein Vergleich verschiedener Boddengewässer. *Bodden* 2, 7 - 27.
- LEHMANN, J., FIETZ, J., EIDAM, J., PUFF, T., 1995: Veränderungen der Spurenelement-gehalte von Schwebstoffen im Mündungsbereich der Oder. - *Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H.1/2*, S. 217-228.
- LEIPE, T., BRÜGMANN, L., BITTNER, U., 1989: Zur Verteilung von Schwermetallen in rezenten Brackwassersedimenten der Boddengewässer der DDR. - *Chemie der Erde* 49, 21-38.
- LEIPE, T., NEUMANN, T., EMEIS, K.-C., 1995: Schwermetallverteilung in holozänen Ostseesedimenten - Untersuchungen im Einflußbereich der Oder. - *Geowissenschaften* 13, 470-478.
- LEIPE, T., 1997: Geochemische Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Oderhaff zur Rekonstruktion der Eutrophierung und anthropogenen Beeinflussung. *Bodden (Inst. f. Ökologie, Hiddensee)*, Nr. 5, S. 97-108.
- LEWANDOWSKI, A.; PRZEWLOCKI, J., 1995: Engineering aspects of pollution in view of case studies. In: SALOMONS, W., FÖRSTNER, U., MADER, P. (Eds.): *Heavy metals - Problems and Solutions*. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg.
- LORING, D., 1991: Normalization of heavy metal data from estuarine and coastal sediments. - *ICES J. Mar. Sci.* 48, 101-115.
- LORING, D., RANTALA, R.T.T., 1992: Manual for the geochemical analysis of marine sediments and suspended particulate matter. - *Earth-Science-Reviews* 32, 235-283.
- MAJEWSKI, A. (Hrsg.), 1980: *Zalew Szczeciński*. - Instytut meteorologii i gospodarki wodnej. - Wydawnictwa komunikacji i łączności, Warszawa, 339 p. - Kap.3.3. K. WYPYCH: Osady denne Zalewu Szczecińskiego. S. 54-72. Kap.3.4. K. WYPYCH: Powstanie i rozwój Zalewu Szczecińskiego. S. 72-88.
- MÜLLER, P.J., SCHNEIDER, R., 1993: An automated leaching method for the determination of opal in sediments and particulate matter. - *Deep-Sea Research I*, 40, 425-444.

- MUTZKE, A., FENNEL, W., 1996: Zur Rolle mesoskalärer Dynamik bei der Wassermassenumbildung in der Ostsee. - Abschlußbericht BMBF-Projekt 03F0103A, Institut für Ostseeforschung Warnemünde.
- NEUMANN, T., LEIPE, T., BRAND, T., SHIMMIEDL, G., 1996: Accumulation of heavy metals in the Oder estuary and its off-shore basins. - *Chemie der Erde* 56, 207-222.
- NIESSEN, F., STURM, M., 1987: Die Sedimente des Baldeggersees (Schweiz)-Ablagerungsraum und Eutrophierungsentwicklung während der letzten 100 Jahre. - *Archiv f. Hydrobiologie* 108, 365-383.
- NIEDERMEYER, R.-O., LANGE, D., 1989: Modern mud deposits of the Western Baltic Sea (Mecklenburg Bight) - Sedimentary environment and diagenesis: - Beiträge zur Meereskunde 60, 5-20, Berlin.
- OSADCZUK, A., LAMPE, R., MEYER, H., SOBIERAJ, D., 1996: Characteristics of recent sediments from Szczecin Bay. *Rozpr. Hydrotechn.* 60, 119 - 128. (6th German-Polish Seminar: Dynamics of the Odra river and estuary, the Szczecin Bay and the Gulf of Pomerania, Swinoujście, Nov. 14 - 17, 1995).
- PANKOW, H., 1976: Algenflora der Ostsee. II: Plankton (einschl. benthischer Kieselalgen). - VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- PASTUSZAK, M., NAGEL, K., NAUSCH, G., 1996: Variability in nutrient distribution in the Pommeranian Bay in September 1993. *Oceanologia* No. 38 (2), pp. 195-225.
- PETRICK, G., SCHULZ, D., DUINKER, J.C., 1988: Clean up of environmental samples by HPLC for analysis of organochlorine compounds by gas chromatography with ECD. - *J. of Chromatogr.* 435, 241-248.
- PETSCHICK, R., KUHN, G., GINGELE, F.X., 1996: Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic - sources, transport and relation to oceanography. *Marine Geology* 130, 203-229.
- PRITCHARD, D.W., 1967: What is an estuary: physical viewpoint. In: LAUFF, G. H. (ed.): *Estuaries*. American Association for the Advancement of Science, Publication No. 83, Washington.
- SCHULZ, D.E., 1990: Chlorbiphenyle im Meerwasser des Nordatlantiks und der Nordsee. - *Ber. Inst. f. Meereskunde, Univ. Kiel*, Nr. 197, 132 S.
- SONNENBURG, F., 1994: Eine Zusammenfassung, Auswertung und Bewertung des vorhandenen Informationsmaterials über die Oder und ihre deutschen Nebenflüsse. - *Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg* 1, 342 S., Frankfurt/Oder.
- STÖBLING, K., 1995: Geochemische und mineralogische Untersuchungen an Schwebstoffen aus dem Oder-Ästuar. - unveröff. Diplomarbeit, Univ. Greifswald.
- TOBIES, S., 1990: Phasenanalytische Untersuchungen an Schwebstoffen der Oder. - unveröff. Diplomarbeit, Univ. Greifswald, 51 S.
- USCINOWICZ, S., ZACHOWICZ, J., 1996: Geochemical atlas of the Vistula Lagoon. - *Panstwowy Instytut Geologiczny, Warszawa* 1996 (poln. mit engl. summary).
- WEIKER, H., 1927: Die Schleppnetzfisherei im Stettiner Haff und seinen Nebengewässern. - *Zeitschrift für Fischerei* Nr. 25, Neudamm und Berlin.
- WERNICKE, W., 1930: Die Küste der Inseln Usedom und Wollin vom Peenemünder Haken bis zum Swinhöft. - 1. Beiheft zum 47./48. Jahrbuch d. Pomm. Geogr. Gesellschaft (1929/30); Greifswald.

- WESTPHAL, H., KURBJEWIT, F., MEYER, H., LENK, B. (im Druck): Primary production in relation to nutrient regime and effects of transport in the Oder estuary and Greifswalder Bodden (southern Baltic Sea). Proceedings of ECSA - Symposium, Utrecht 1996.
- Winkler, Herrmann, 1986: Zeesboote. - Hinstorff-Verlag, Rostock.
- WITT, G., 1995: Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of the Baltic Sea. - Mar. Poll. Bull. 31, 237-248.
- ZMUDZINSKI, L., 1976: Eutrophierung der Ostsee und ihrer Randgewässer: - Limnologica 10, 419-424.

## **Anhang:**

### **Karten und graphische Darstellungen zur Verteilung ausgewählter sedimentologischer und geochemischer Parameter im Oberflächensediment des Oderhaffs (zu Kapitel 4.3.).**

**Abbildung 5 a) bis k).** Oberflächen-Sedimentkartierung im Oderhaff. Darstellungen zur Verteilung ausgewählter Parameter a) Lageplan der Stationen für die Beprobung; Verbreitung des Schlicksedimentes im Haff b) Glühverlust. c) C-org./N-Verhältnis d) CaCO<sub>3</sub> e) Kieselopal f) Eisen g) Mangan h) Phosphor i) Schwefel j) Zink k) Blei (nach OSADCZUK u.a. 1996).

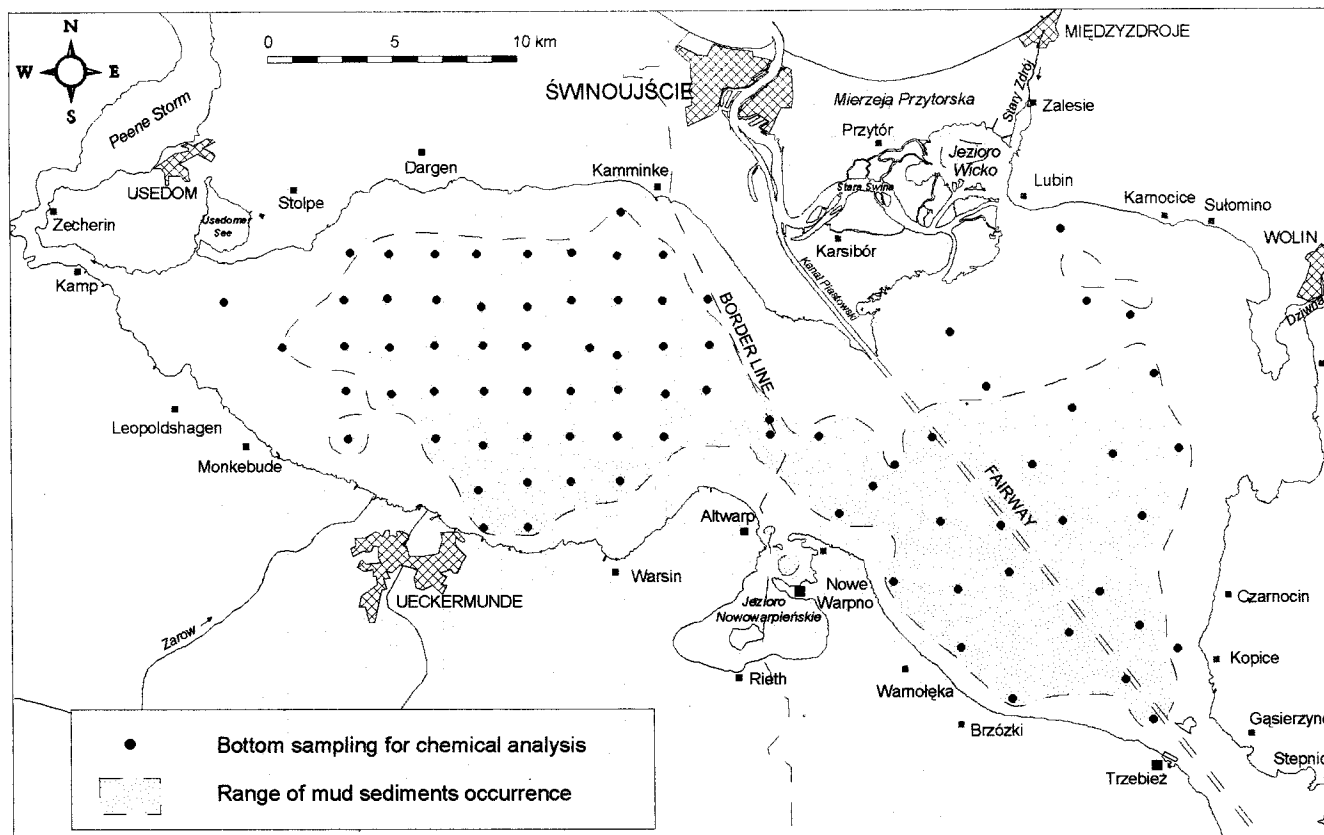
**Abbildung 6 a) bis d).** Kartendarstellungen zur regionalen Verteilung von Faktoren (Ladungen) auf der Basis einer Faktorenanalyse des gesamten Datensatzes von Analysen der Oberflächen-Sedimentproben aus dem Haff (vgl. Abb. 5).

**Abbildung 7 a) b).** Lageplan der Stationen (a) und Verteilung von PCB's (b) im Oberflächensediment des Kleinen Haffs und angrenzender Gewässer (nach DANNENBERGER u.a., 1997).

**Abbildung 8.** Verteilung von p,p'-DDT, HCB und ausgewählten Isomeren des HCH's im Sediment des Kleinen Haffs und angrenzender Gewässer (Daten normiert auf TOC).

**Abbildung 9 a) b).** Verteilung von Naphthalin (a) und Benzo[a]pyren (b) im Sediment des Kleinen Haffs (Daten normiert auf TOC).

**Abbildung 10.** Verteilungsmuster einzelner PAH's in den Sedimenten kleinerer Zuflüsse des Oder-Ästuars.



Anhang

Abbildung 5 a) bis k). Oberflächen-Sedimentkartierung im Oderhaff. Darstellungen zur Verteilung ausgewählter Parameter (nach OSADCZUK u.a. 1996). a) Lageplan der Stationen für die Beprobung und Verbreitung des Schlicksedimentes im Haff.

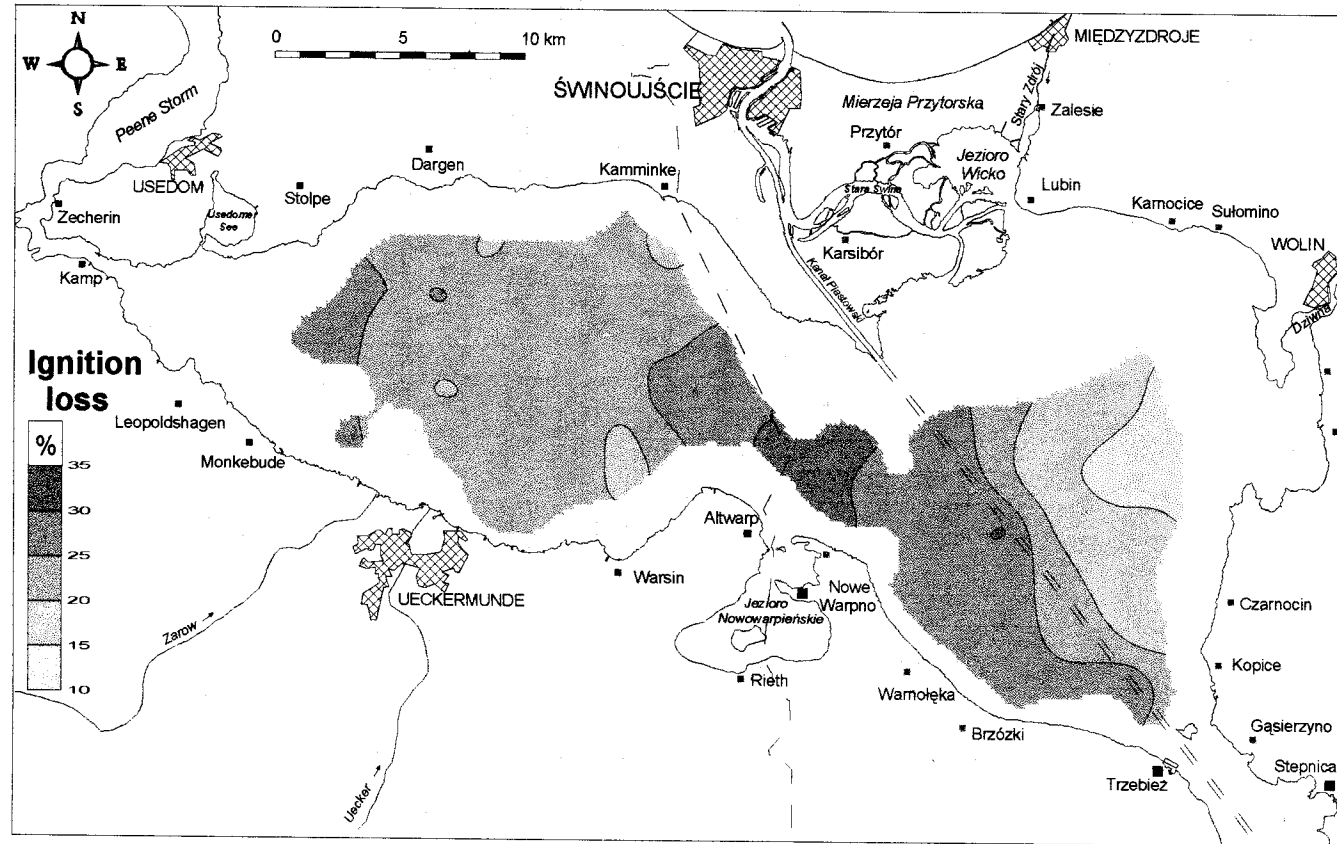
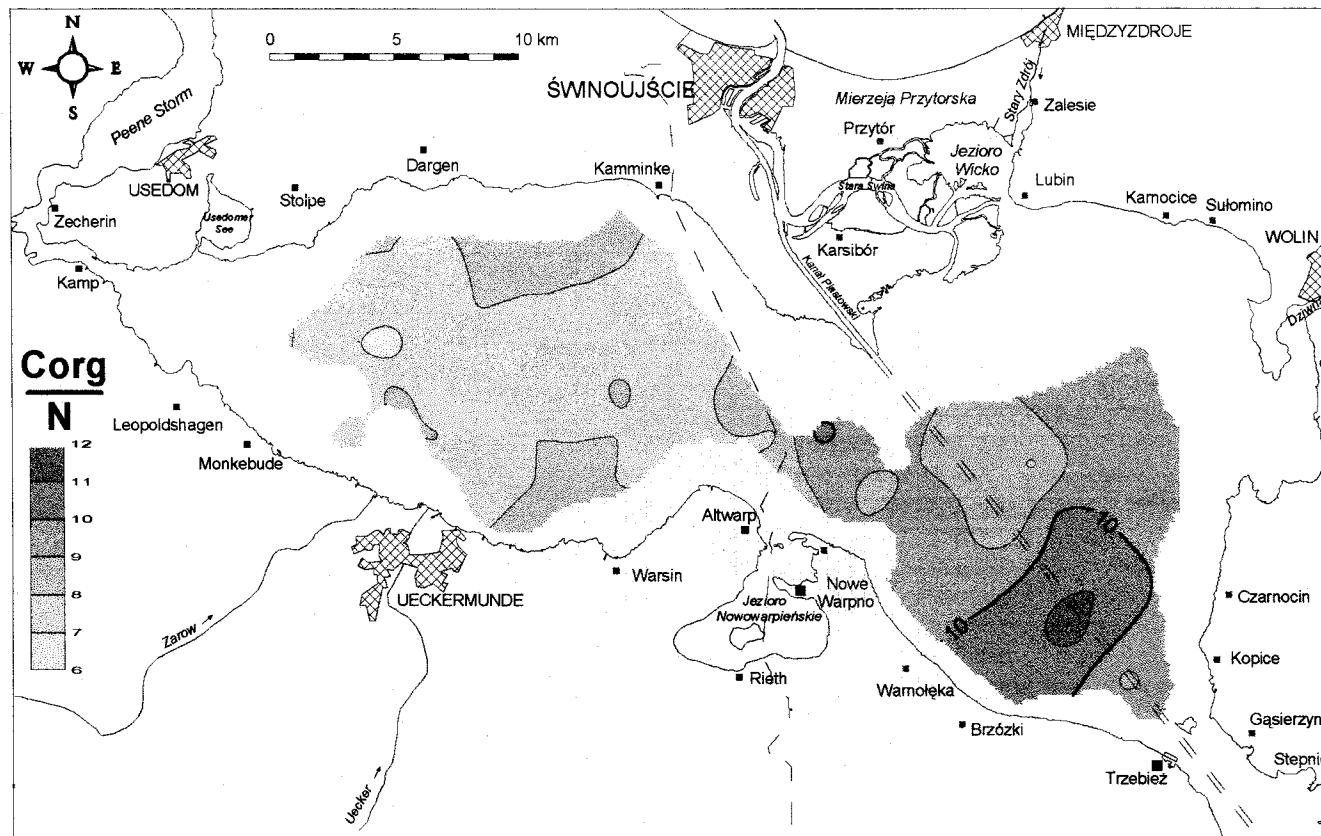


Abbildung 5 b) Glühverlust im Oberflächensediment des Oderhaffs.



Anhang

Abbildung 5 c) C-org./N-Verhältnis im Oberflächensediment des Oderhaffs.



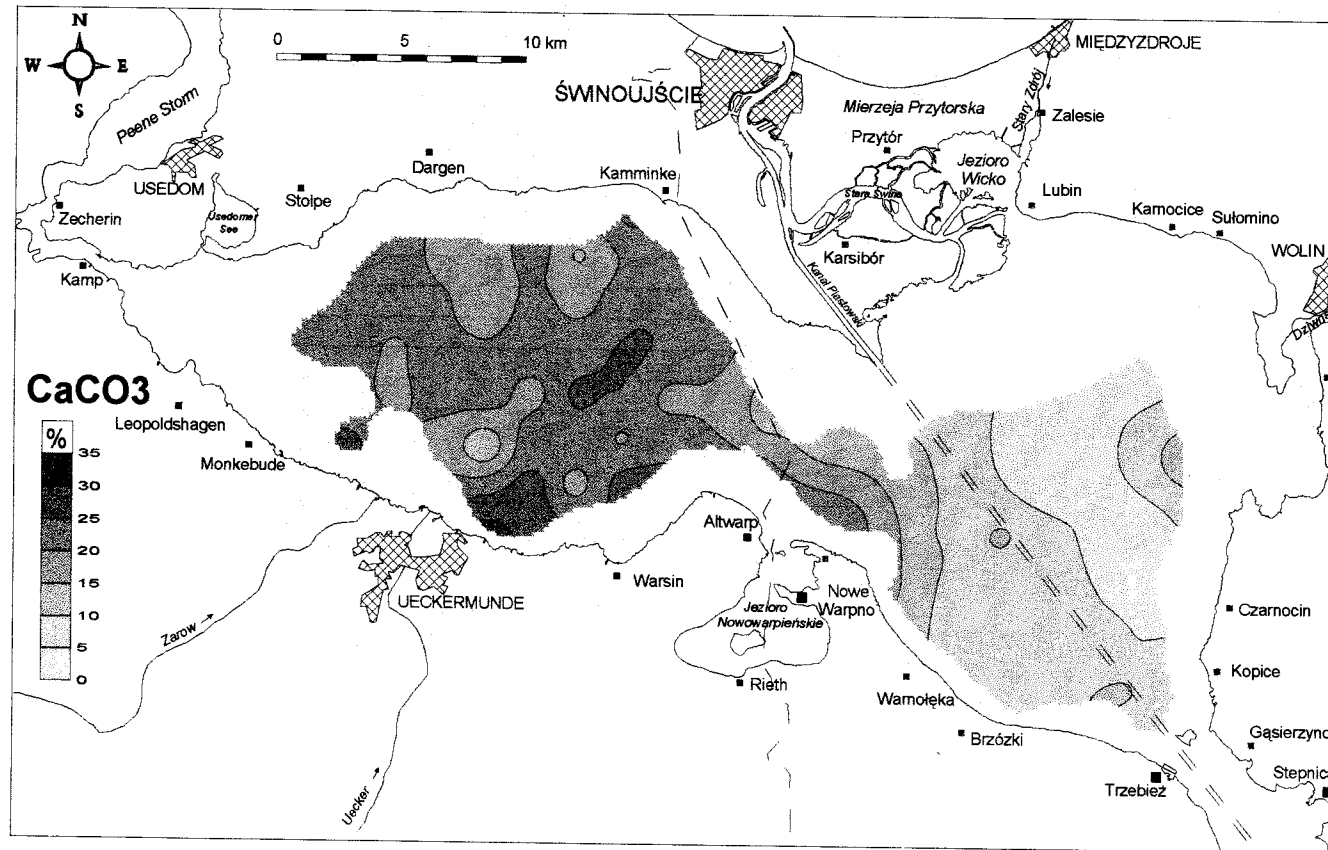
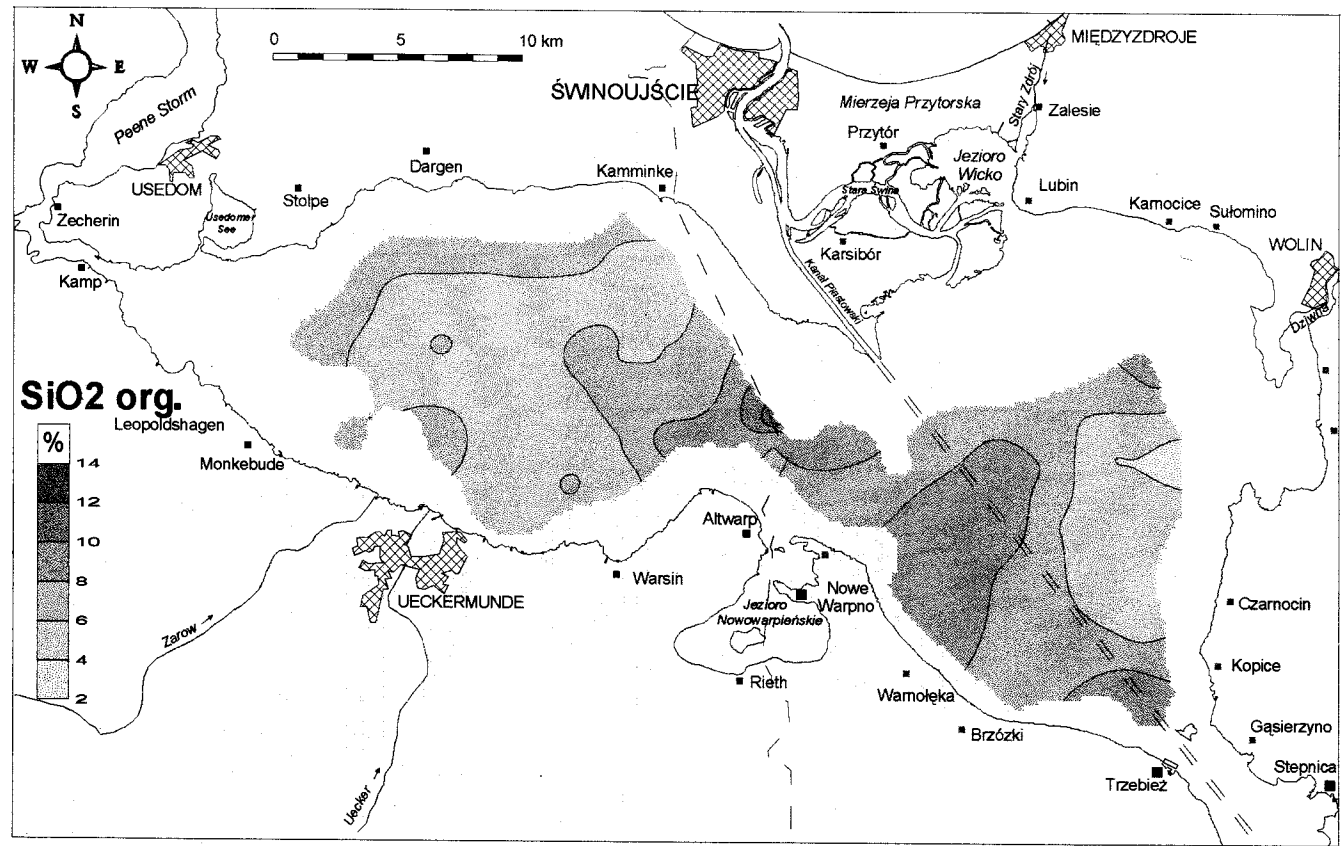


Abbildung 5 d)  $\text{CaCO}_3$  im Oberflächensediment des Oderhaffs.



Anhang

Abbildung 5 e) Kieselopal im Oberflächensediment des Oderhaffs.

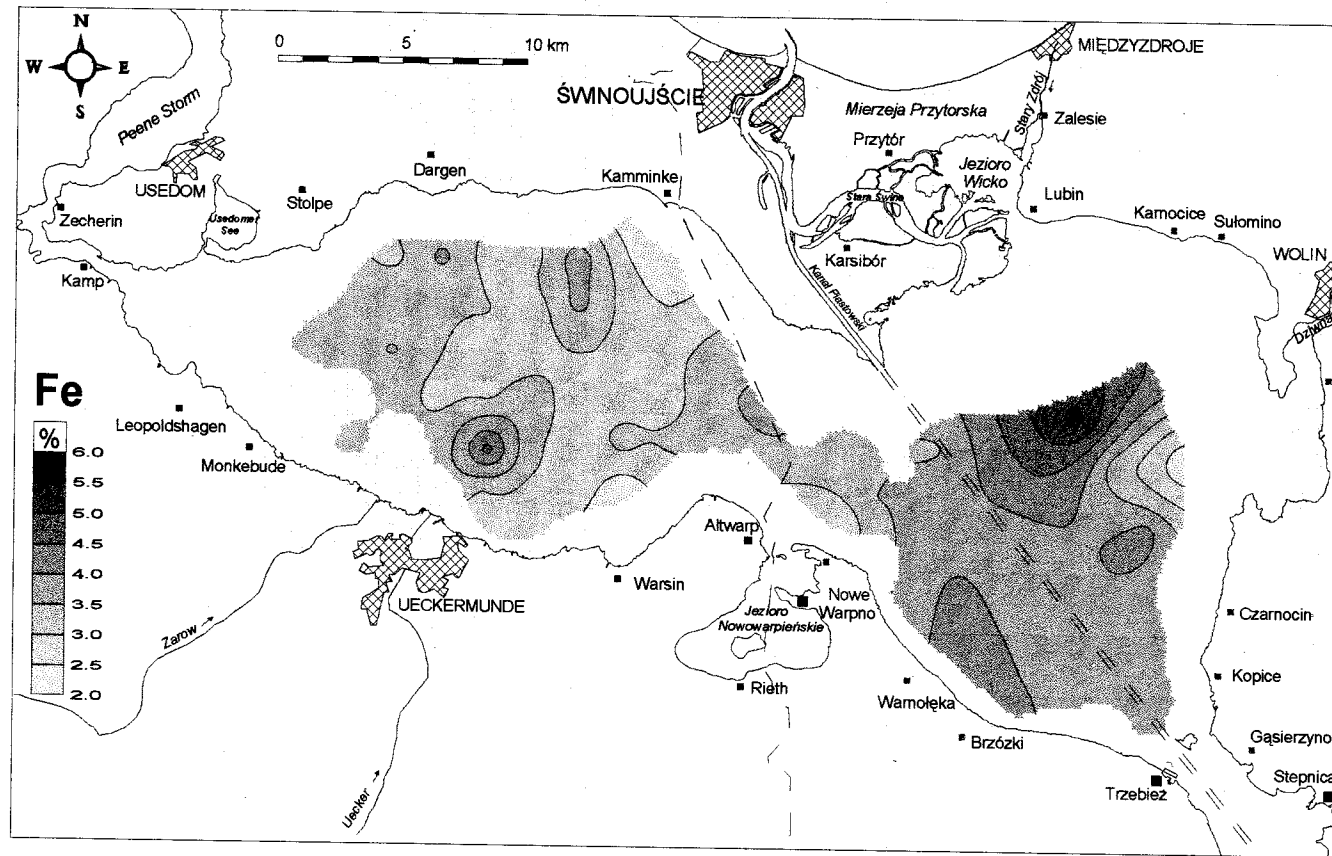


Abbildung 5 f) Eisen im Oberflächensediment des Oderhaffs.

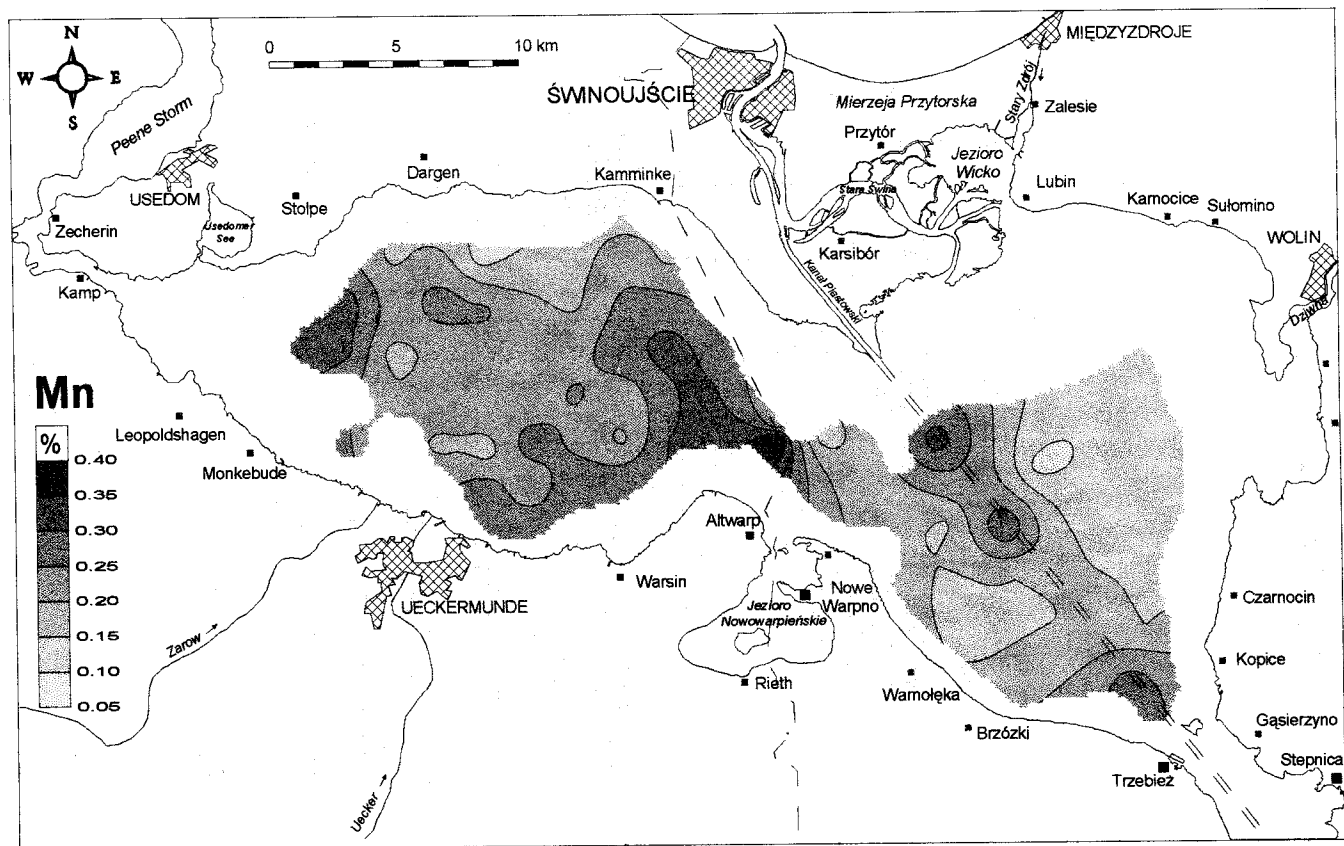


Abbildung 5 g) Mangan im Oberflächensediment des Oderhaffs.

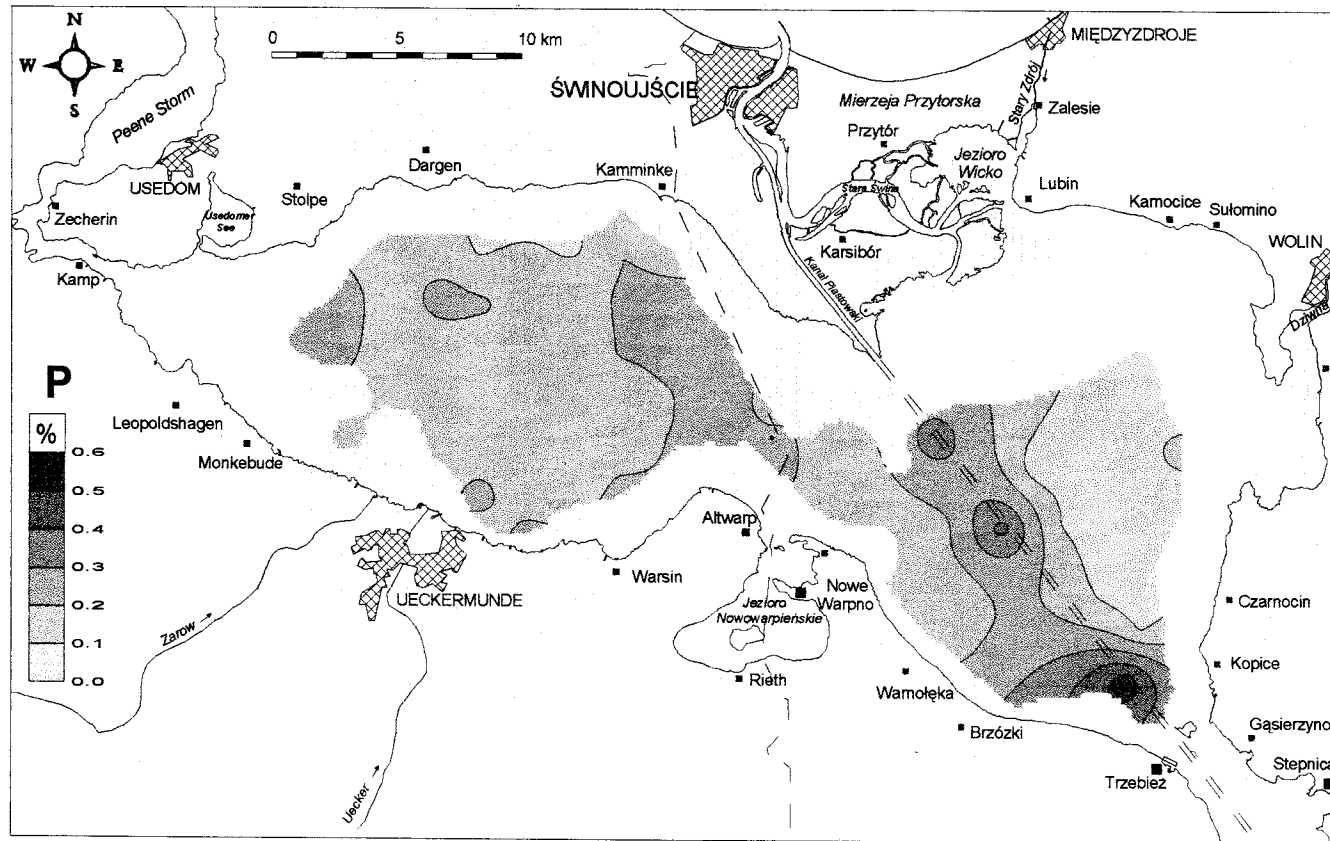
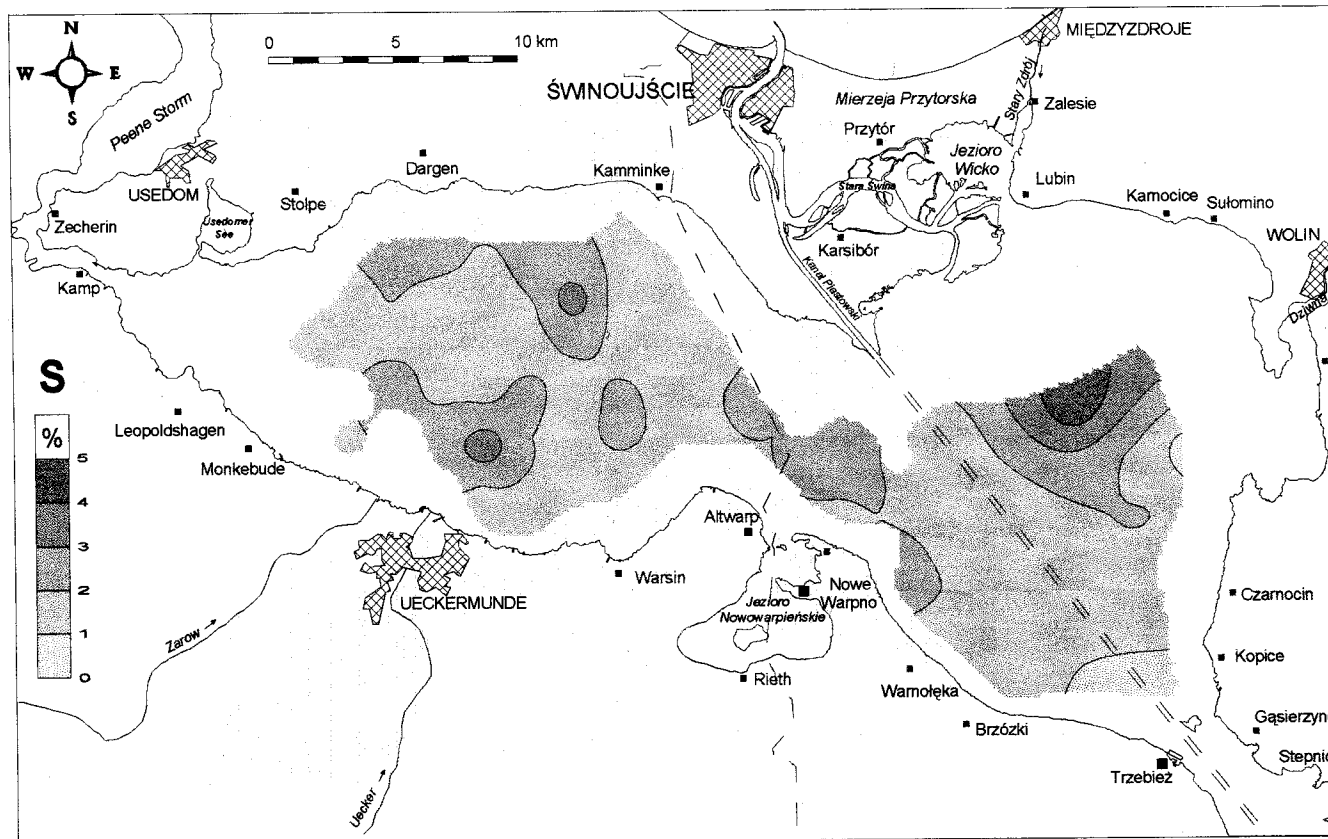


Abbildung 5 h) Phosphor im Oberflächensediment des Oderhaffs.



Anhang

Abbildung 5 i) Schwefel im Oberflächensediment des Oderhaffs.

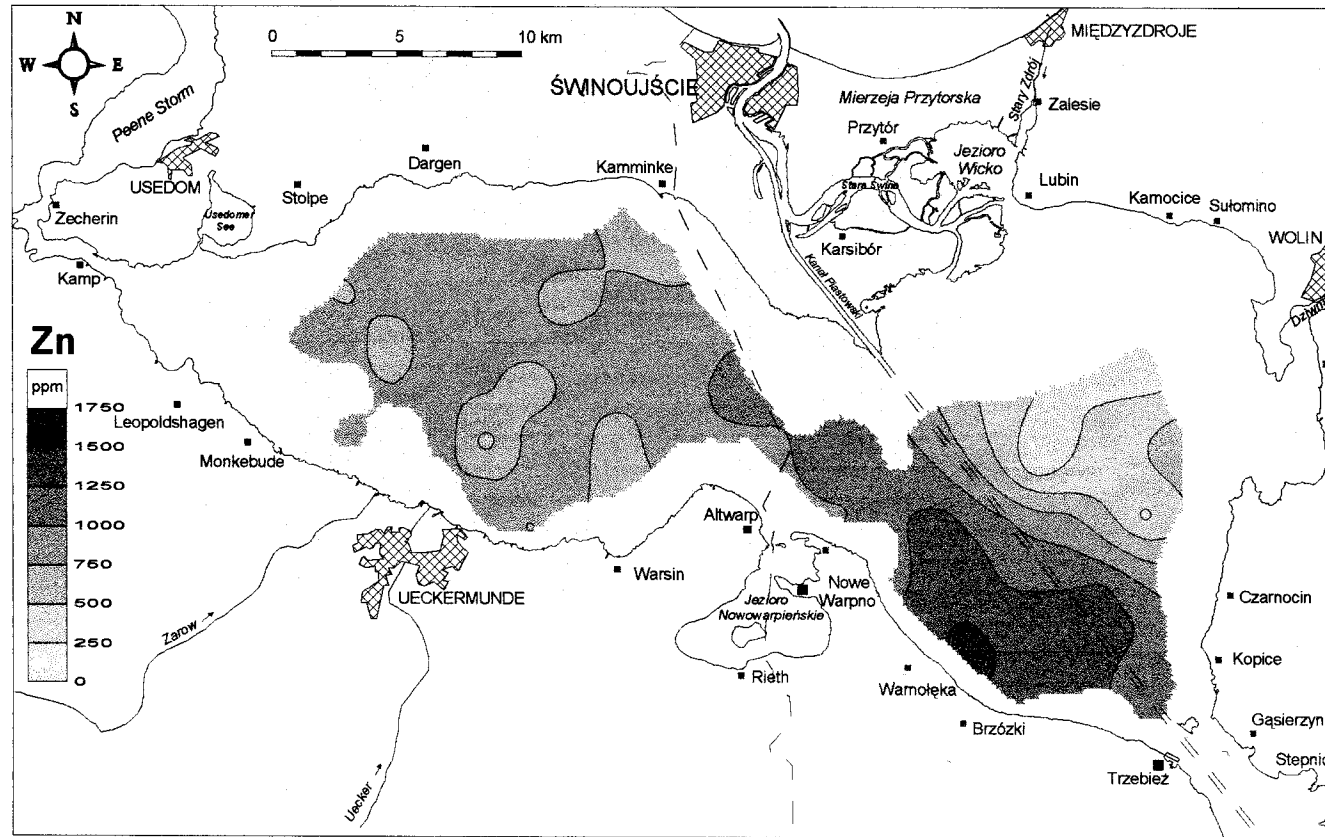


Abbildung 5 j) Zink im Oberflächensediment des Oderhaffs.

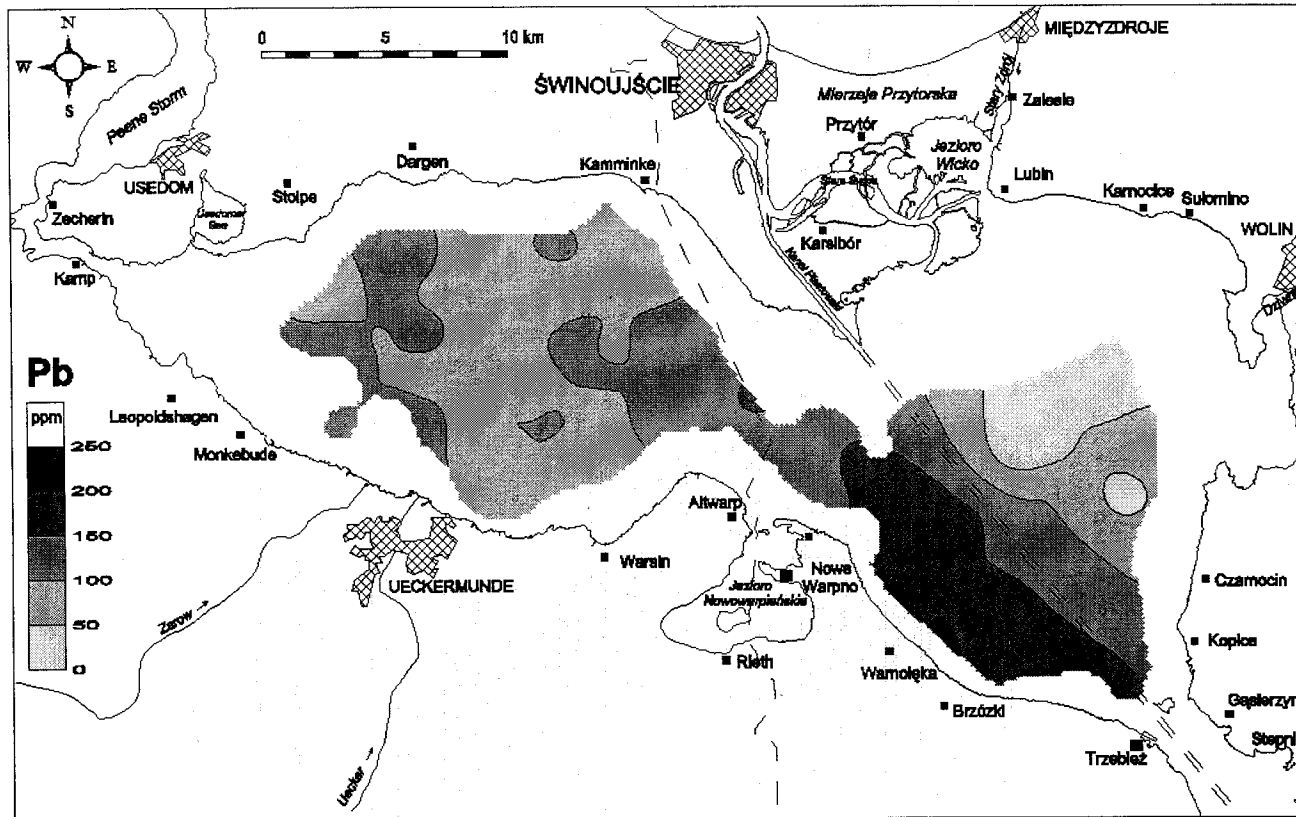


Abbildung 5 k) Blei im Oberflächensediment des Oderhaffs.



1st factor is high loaded for trace elements Zn, Cu, Ni, Cr, coming from river input. The map shows highest values in the sediments near the Oder mouth, but only on the lee-side of the Großes Haff, whereas sediments in the eastern part will be often resuspended and flushed out. Echo profiles show here only a thin sediment layer.

Anhang

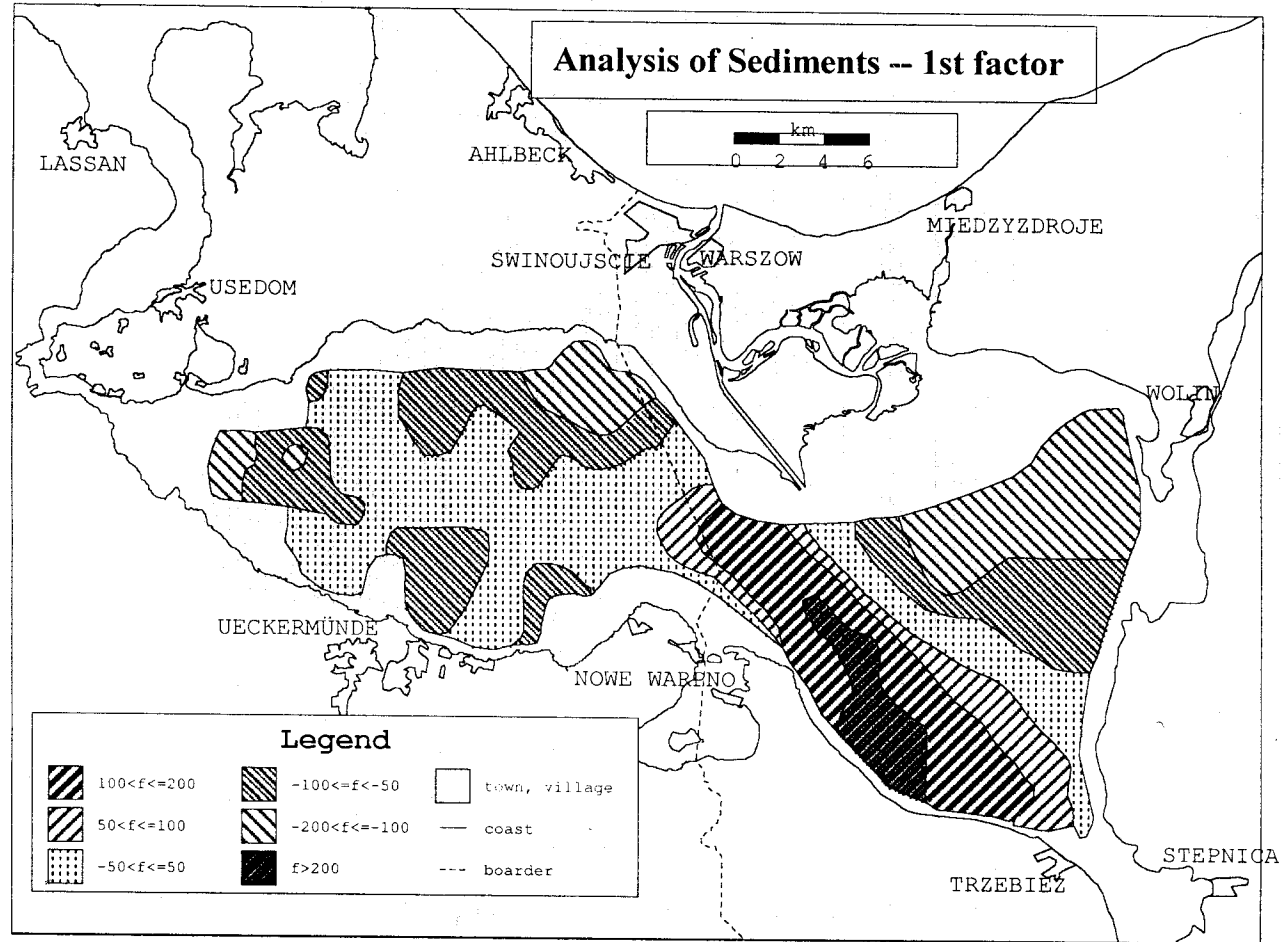
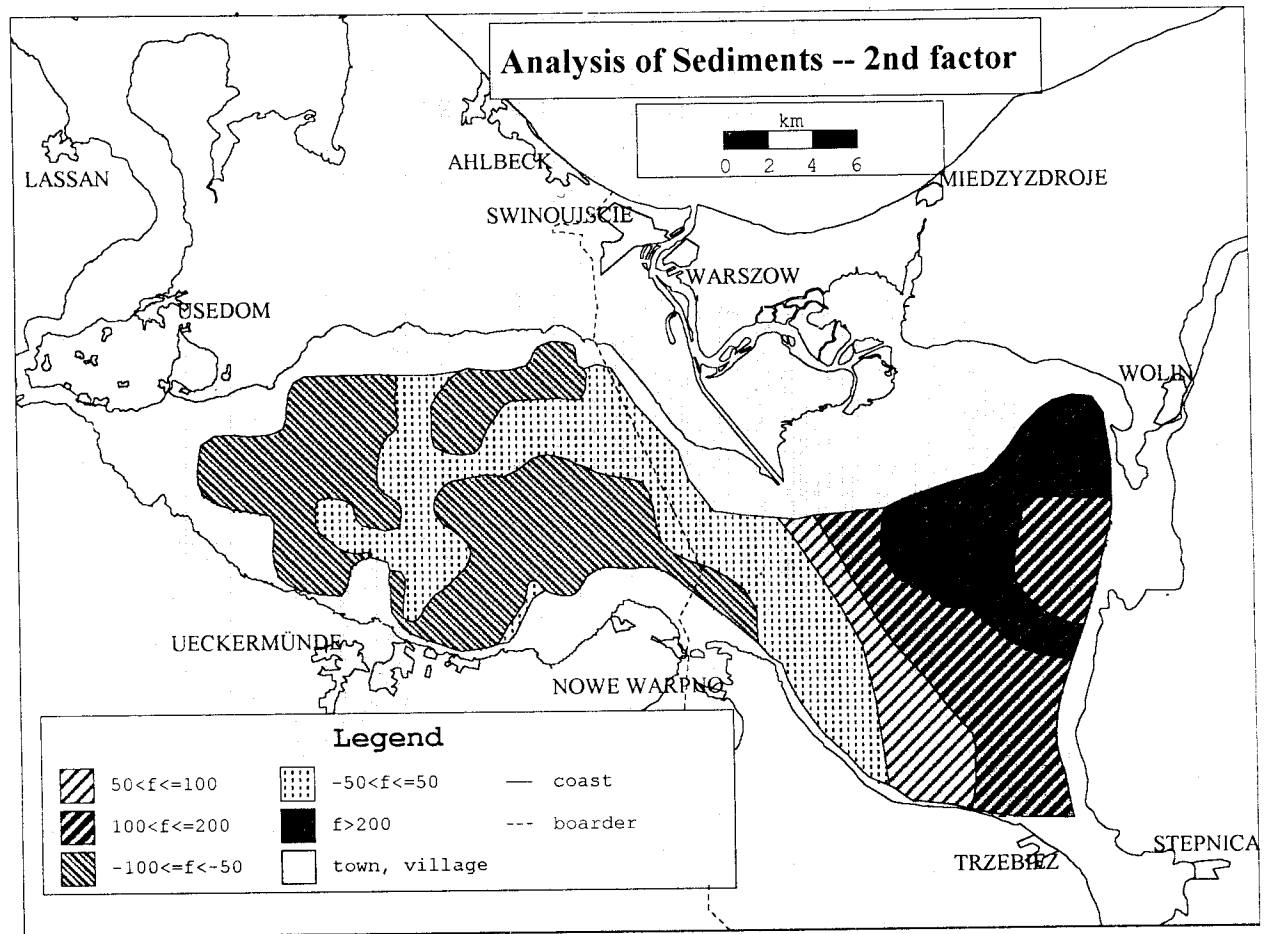


Abbildung 6 a) bis d). Kartendarstellungen zur regionalen Verteilung von Faktoren (Ladungen) auf der Basis einer Faktorenanalyse des gesamten Datensatzes von Analysen der Oberflächen-Sedimentproben. a) Regionale Verteilung des Faktors 1.

2nd factor has high loadings for carbonate, Pb and Fe and shows the carbonate precipitation by phytoplankton and ostracods and in this way the importance of bioproduction for the composition of muds. Pb is carbonate bound and Fe acts as an antagonist, because of its enrichment in sulfur rich sediments where we found the smallest amounts of carbonate.



Anhang

Abbildung 6 b). Darstellung der regionalen Verteilung der Ladungen des Faktors 2 im Oberflächensediment des Oderhaffs.

3rd factor is loaded for sulfur, with highest values in a channel-like depression between the two parts of the Haff and in the NE part of the Großes Haff. Both areas are known as saltwater storing places after its intrusion from the Pomeranian Bay. The more often sulfate delivery, the lack of sulphur near the Odra mouth and the different thickness of the oxidized surface layer determines the distribution.

Anhang

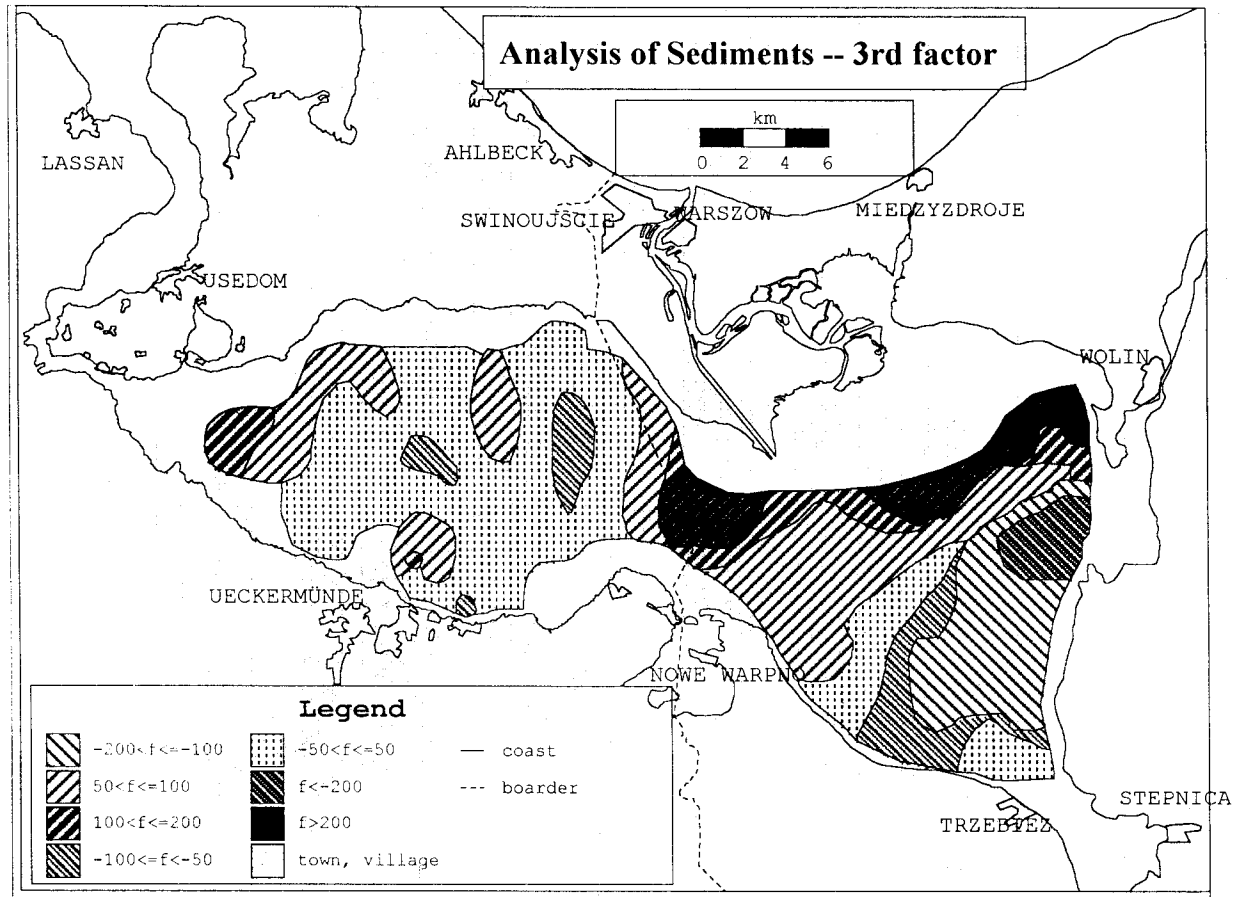
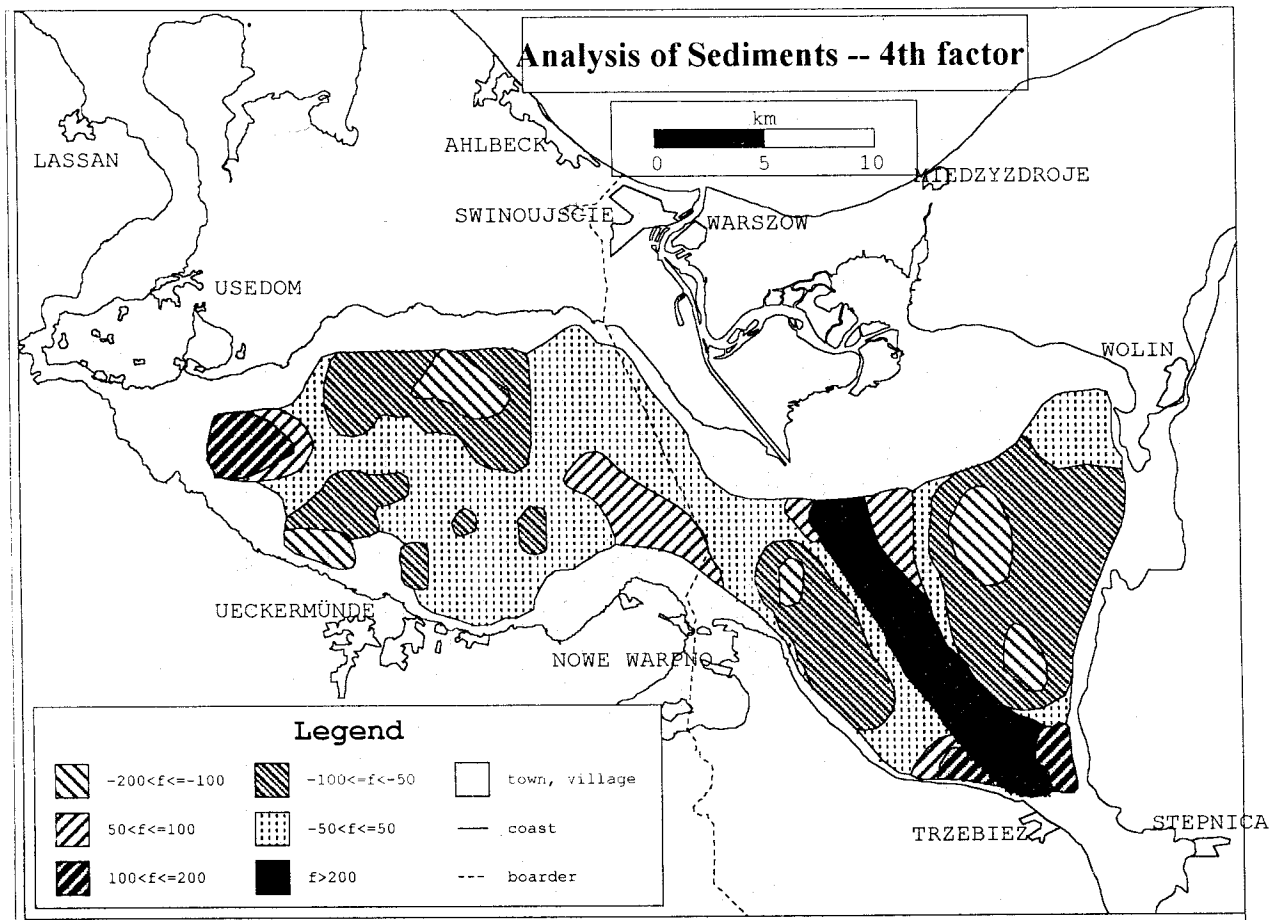


Abbildung 6 c). Darstellung der regionalen Verteilung der Ladungen des Faktors 3 im Oberflächensediment des Oderhaffs.

4th factor is high loaded for Mn and P, both known as redoxsensitive elements. The enrichment is clearly restricted to the shipping channel, showing that both elements are enriched by sorption processes connected with frequent resuspension in the channel. The main higher loadings in Kleines Haff are probably caused by carbonate associated mineral formation.



Anhang

Abbildung 6 d). Darstellung der regionalen Verteilung der Ladungen des Faktors 4 im Oberflächensediment des Oderhaffs.

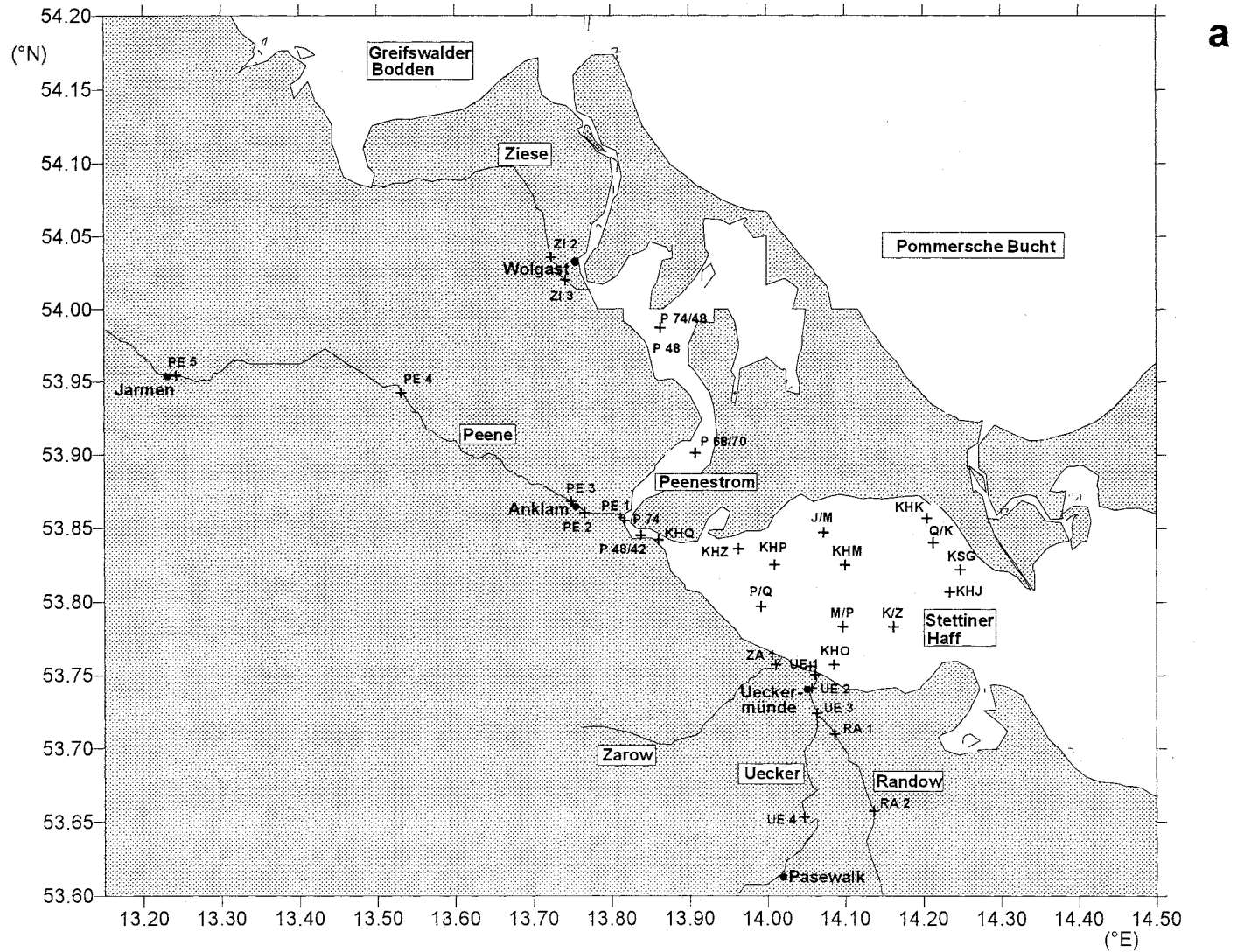
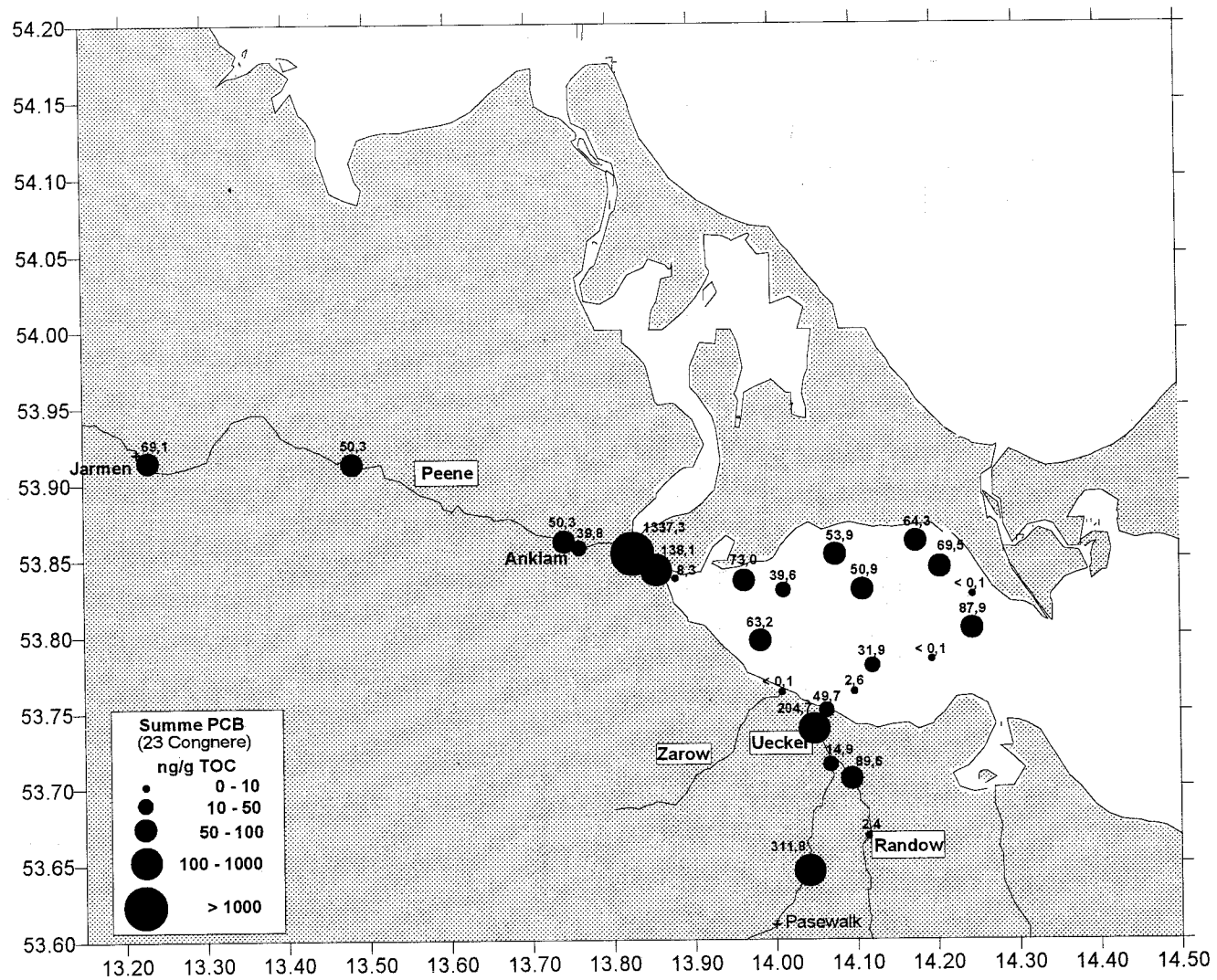


Abbildung 7 a). Lageplan der Stationen zur Untersuchung von organischen Schadstoffen im Oberflächensediment des Kleinen Haffs und angrenzender Gewässer (nach DANNENBERGER u.a., 1997).



Anhang

Abbildung 7 b). Verteilung von PCB's im Oberflächensediment des Kleinen Haffs und angrenzender Gewässer (nach DANNENBERGER u.a., 1997).

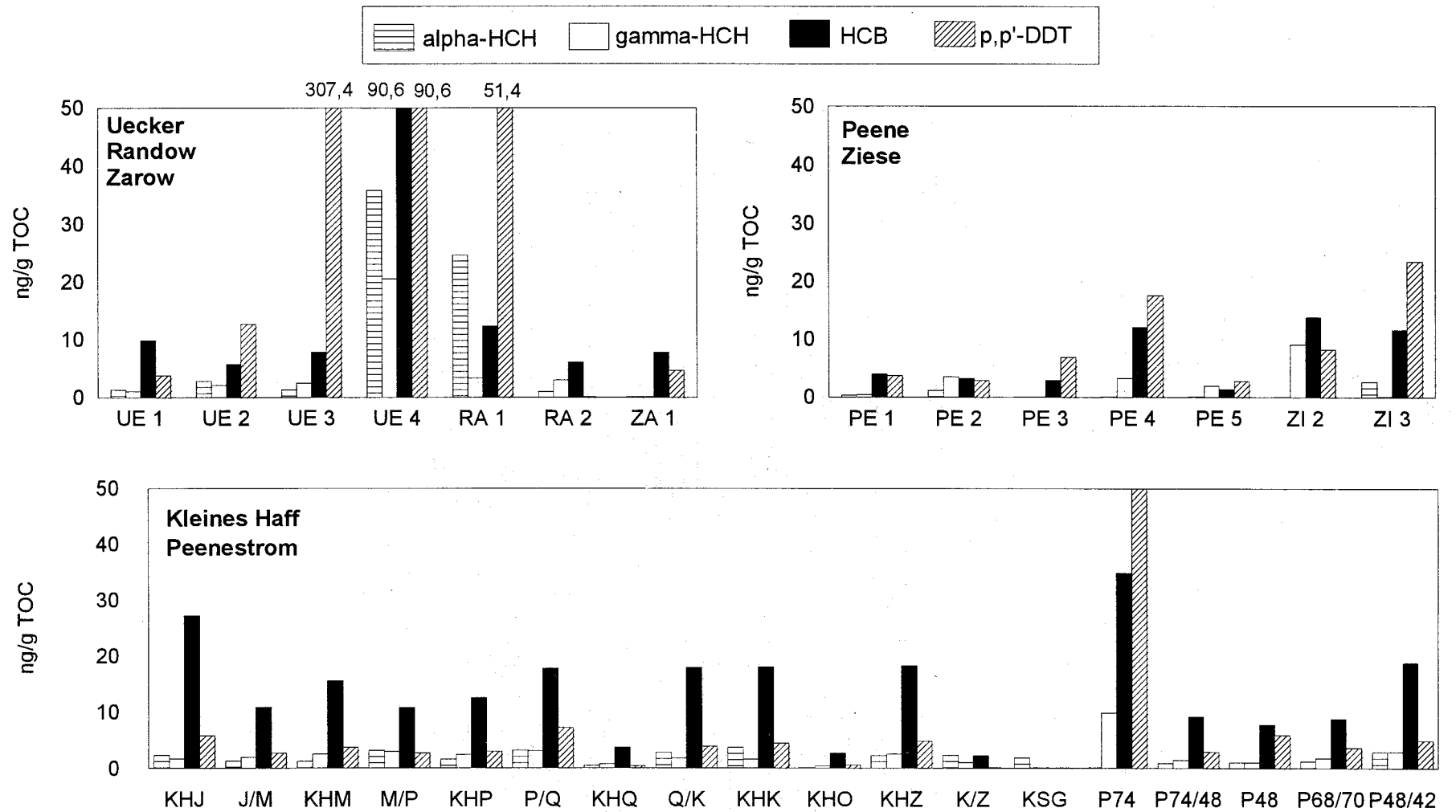


Abbildung 8: Verteilung von p,p'-DDT, HCB und ausgewählten Isomeren des HCHs im Sediment des Kleinen Haffs und angrenzender Gewässer (Daten normiert auf TOC)

Anhang

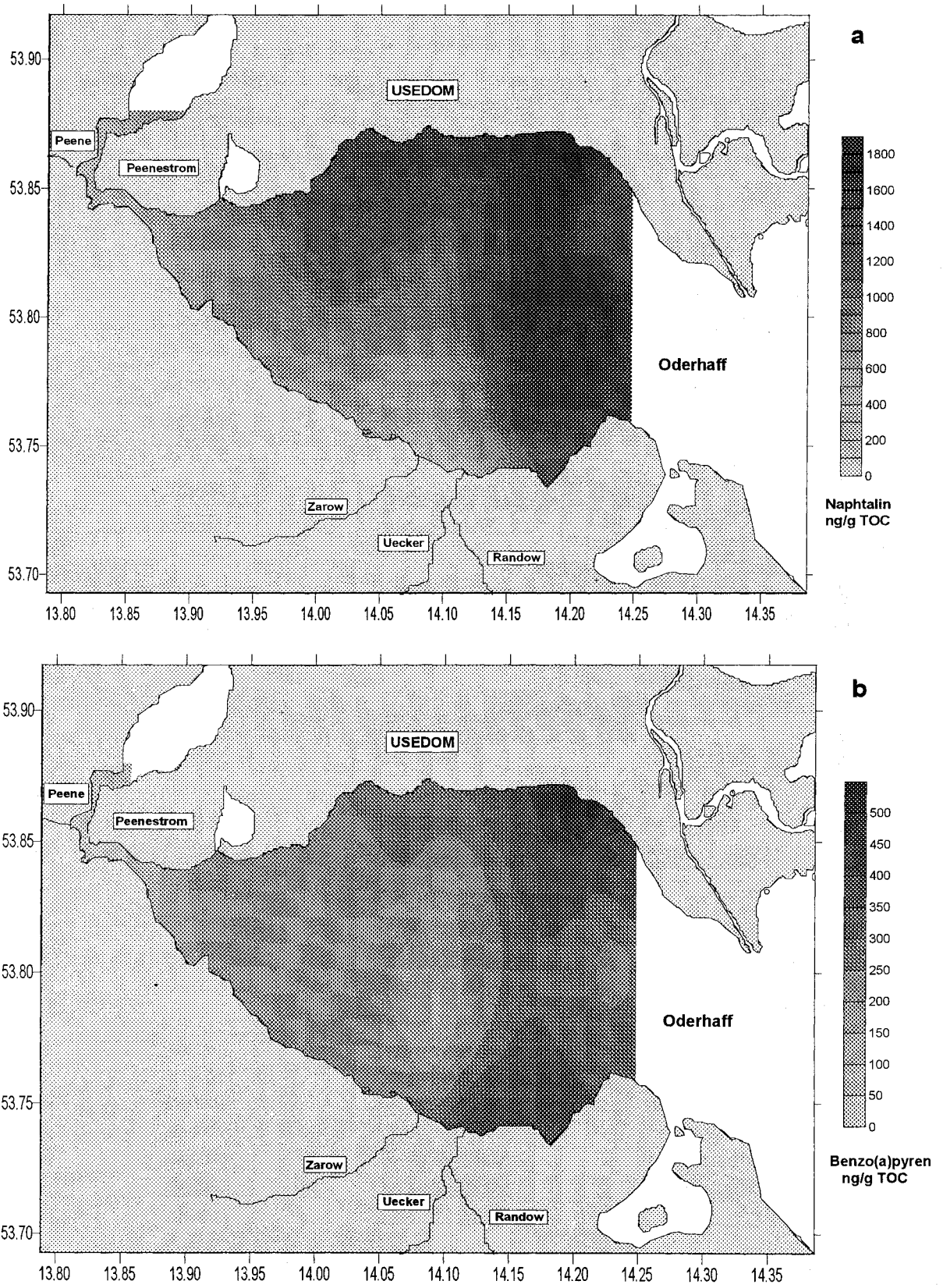


Abbildung 9 a) b): Verteilung von Naphthalin (a) und Benzo(a)pyren (b) im Sediment des Kleinen Haffs (Daten normiert auf TOC)



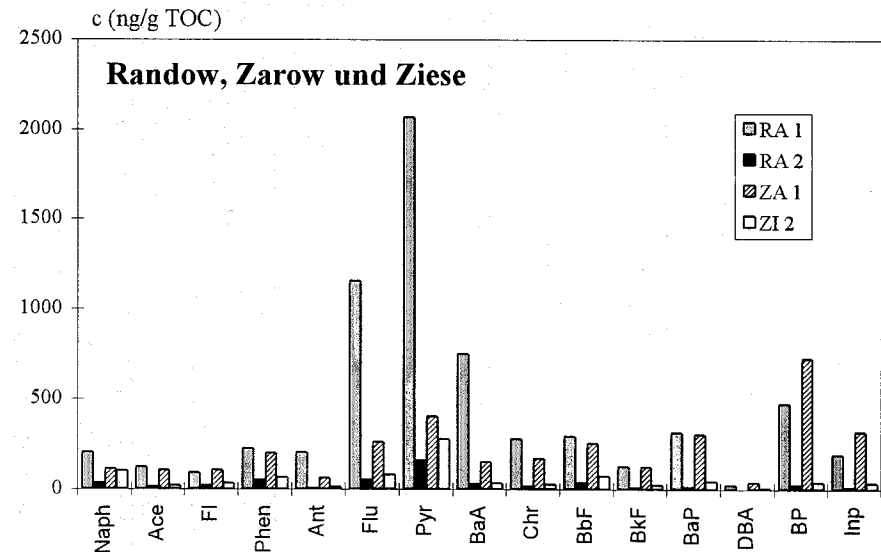
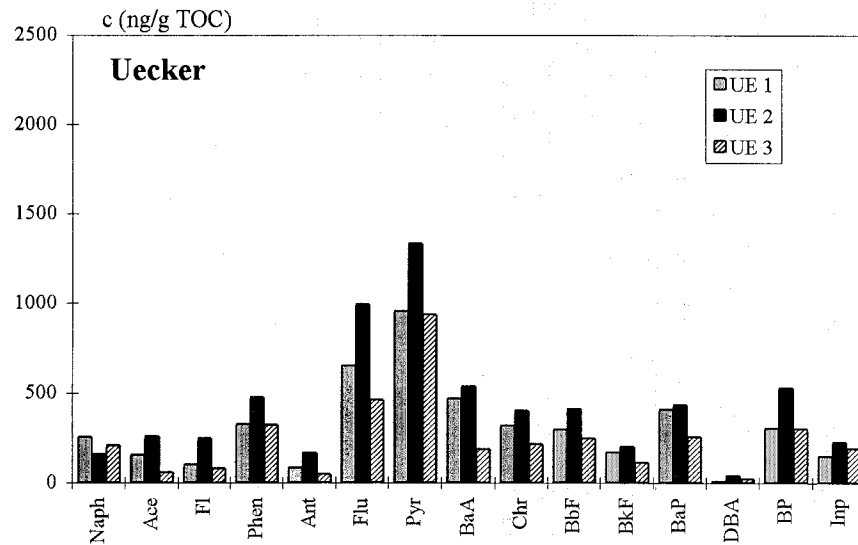
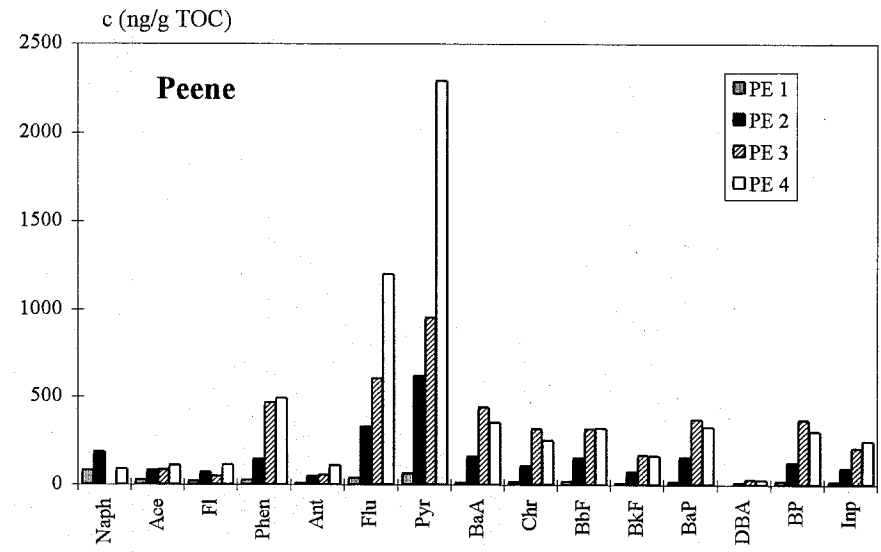
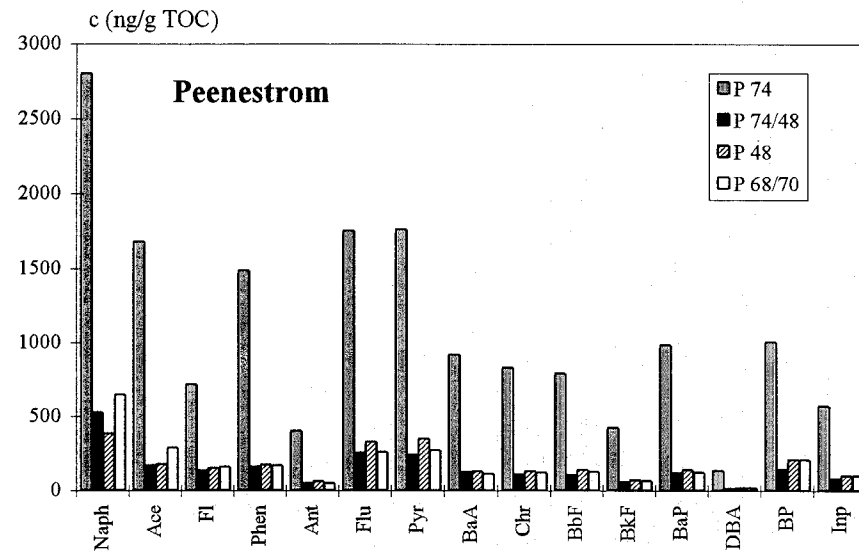


Abbildung 10: Verteilungsmuster einzelner PAH's in den Sedimenten kleinerer Zuflüsse des Oder-Ästuars

# Meereswissenschaftliche Berichte

## MARINE SCIENCE REPORTS

---

- 1 (1990) Postel, Lutz:  
Die Reaktion des Mesozooplanktons, speziell der Biomasse, auf küstennahen Auftrieb vor Westafrika (The mesozooplankton response to coastal upwelling off West Africa with particular regard to biomass)
- 2 (1990) Nehring, Dietwart:  
Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee von 1979 bis 1988 - ein Vergleich (Hydrographic and chemical conditions in the western and central Baltic Sea from 1979 to 1988 - a comparison)  
Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang:  
Aktuelle Trends hydrographischer und chemischer Parameter in der Ostsee, 1958 - 1989 (Topical trends of hydrographic and chemical parameters in the Baltic Sea, 1958 - 1989)
- 3 (1990) Zahn, Wolfgang:  
Zur numerischen Vorticityanalyse mesoskaler Strom- und Massfelder im Ozean (On numerical vorticity analysis of mesoscale current and mass fields in the ocean)
- 4 (1992) Lemke, Wolfram; Lange, Dieter; Endler, Rudolf (Eds.):  
Proceedings of the Second Marine Geological Conference - The Baltic, held in Rostock from October 21 to October 26, 1991
- 5 (1993) Endler, Rudolf; Lackschewitz, Klas (Eds.):  
Cruise Report RV "Sonne" Cruise SO82, 1992
- 6 (1993) Kulik, Dmitri A.; Harff, Jan:  
Physicochemical modeling of the Baltic Sea water-sediment column:  
I. Reference ion association models of normative seawater and of Baltic brackish waters at salinities 1-40 ‰, 1 bar total pressure and 0 to 30°C temperature  
(system Na-Mg-Ca-K-Sr-Li-Rb-Cl-S-C-Br-F-B-N-Si-P-H-O)
- 7 (1994) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans-Ulrich; Nausch, Günther:  
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993
- 8 (1995) Hagen, Eberhard; John, Hans-Christian:  
Hydrographische Schnitte im Ostrandstromsystem vor Portugal und Marokko 1991 - 1992
- 9 (1995) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:  
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1994  
Seifert, Torsten; Kayser, Bernd:  
A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea
- 10 (1995) Schmidt, Martin:  
Analytical theory and numerical experiments to the forcing of flow at isolated topographic features
- 11 (1995) Kaiser, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Breuel, Günter; Wasmund, Norbert; Siegel, Herbert; Witt, Gesine; Kerstan, Eberhard; Sadkowiak, Birgit:  
Zeitreihen hydrographischer, chemischer und biologischer Variablen an der Küstenstation Warnemünde (westliche Ostsee)

- Schneider, Bernd; Pohl, Christa:  
Spurenmittelkonzentrationen vor der Küste Mecklenburg-Vorpommerns
- 12 (1996) Schinke, Holger:  
Zu den Ursachen von Salzwassereintrüben in die Ostsee
- 13 (1996) Meyer-Harms, Bettina:  
Ernährungsstrategie calanoider Copepoden in zwei unterschiedlich trophierten Seegebieten der Ostsee (Pommernbucht, Gotlandsee)
- 14 (1996) Reckermann, Marcus:  
Ultraphytoplankton and protozoan communities and their interactions in different marine pelagic ecosystems (Arabian Sea and Baltic Sea)
- 15 (1996) Kerstan, Eberhard:  
Untersuchung der Verteilungsmuster von Kohlenhydraten in der Ostsee unter Berücksichtigung produktionsbiologischer Meßgrößen
- 16 (1996) Nehring, Dietwart; Matthäus, Wolfgang; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus:  
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1995
- 17 (1996) Brosin, Hans-Jürgen:  
Zur Geschichte der Meeresforschung in der DDR
- 18 (1996) Kube, Jan:  
The ecology of macrozoobenthos and sea ducks in the Pomeranian Bay
- 19 (1996) Hagen, Eberhard (Editor):  
GOBEX - Summary Report
- 20 (1996) Harms, Andreas:  
Die bodennahe Trübezone der Mecklenburger Bucht unter besonderer Betrachtung der Stoffdynamik bei Schwermetallen
- 21 (1997) Zülicke, Christoph; Hagen, Eberhard:  
GOBEX Report - Hydrographic Data at IOW
- 22 (1997) Lindow, Helma:  
Experimentelle Simulationen windangeregter dynamischer Muster in hochauflösenden numerischen Modellen
- 23 (1997) Thomas, Helmuth:  
Anorganischer Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ostsee
- 24 (1997) Matthäus, Wolfgang; Nehring, Dietwart; Lass, Hans Ulrich; Nausch, Günther; Nagel, Klaus; Siegel, Herbert:  
Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996
- 25 (1997) v. Bodungen, Bodo; Hentzsch, Barbara (Herausgeber):  
Neue Forschungslandschaften und Perspektiven der Meeresforschung - Reden und Vorträge zum Festakt und Symposium am 3. März 1997.
- 26 (1997) Lakaschus, Sönke:  
Konzentrationen und Depositionen atmosphärischer Spurenmittel an der Küstenstation Arkona
- 27 (1997) Löffler, Annetrin:  
Die Bedeutung von Partikeln für die Spurenmittelverteilung in der Ostsee, insbesondere unter dem Einfluß sich ändernder Redoxbedingungen in den zentralen Tiefenbecken
- 28 (1998) Leipe, Thomas; Eidam, Jürgen; Lampe, Reinhard; Meyer, Hinrich; Neumann, Thomas; Osadczyk, Andrzej; Janke, Wolfgang; Puff, Thomas; Blanz, Thomas; Gingele, Franz Xaver; Dannenberger, Dirk; Witt, Gesine:  
Das Oderhaff. Beiträge zur Rekonstruktion der holozänen geologischen Entwicklung und anthropogenen Beeinflussung des Oder-Ästuars.