

Greifswalder Bodden und Oderästuar – Austauschprozesse (GOAP)

Abschlußbericht 1997

Teilprojekt 4:

Einfluß des Phasenbestandes von Schwebstoffen und Sedimenten des Odermündungsgebietes auf die Bindung und Mobilisierung von Schwermetallen – Beitrag zur Bilanzierung von Stoffaustauschprozessen

J. Eidam, J. Lehmann, T. Puff

Institut für Geologische Wissenschaften, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Friedrich-Ludwig-Jahn-Straße 17a, 17489 Greifswald

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielstellung
2. Material und Methoden
3. Geochemische und phasenanalytische Charakterisierung der rezenten Schlicksedimentation
4. Geochemische und phasenanalytische Charakterisierung der suspendierten partikulären Substanz
5. Schwermetall–Akkumulation im Oderästuar
6. Schwermetallbindung und –mobilisierung
7. Bilanzierung der Schwermetallbelastung des Oderästuars – Quelle oder Senke
8. Zusammenfassung
9. Literatur
10. Anlagen

1. Einleitung und Zielstellung

Das Oder-Ästuar ist mit den in der Literatur als "Coastal Lagoons" bezeichneten ästuaren Sedimentations-räumen zu vergleichen (Perillo 1995). Dieser spezielle lagunäre Ästuartyp ist aufgrund eingeschränkter Austauschverhältnisse mit der Ostsee durch verhältnismäßig niedrige Salinitäten charakterisiert. In den überwiegend sehr flachen Gewässern wird die Stoffverteilung in starkem Maße durch windinduzierte Resuspensionsvorgänge modifiziert. Während für durch Gezeiten dominierte Ästuarie bereits zahlreiche Ergebnisse geochemisch-analytischen und experimenteller Untersuchungen vorliegen, bestehen zur Schwermetallverteilung in diesem Sedimentationsmilieu noch zahlreiche offene Fragen. Das Odermündungsgebiet stellt aufgrund seiner hohen Schadstoffbelastung eine Modellregion für das Studium der Austausch- und Transportprozesse in lagunären Ästuarssystemen dar.

Für das Odermündungsgebiet wurde erstmals im Zuge einer vergleichenden Charakterisierung der Sedimente der vorpommerschen Boddenküste von Leipe u. a. (1989) auf eine signifikante Schwermetallanreicherung in den Oberflächensedimenten hingewiesen. In einem DFG-geförderten Projekt zur holozänen Sedimentationsgeschichte und rezenten Sedimentdynamik im Küstenbereich Nordost-Vorpommerns sind Untersuchungen zur Verteilung von

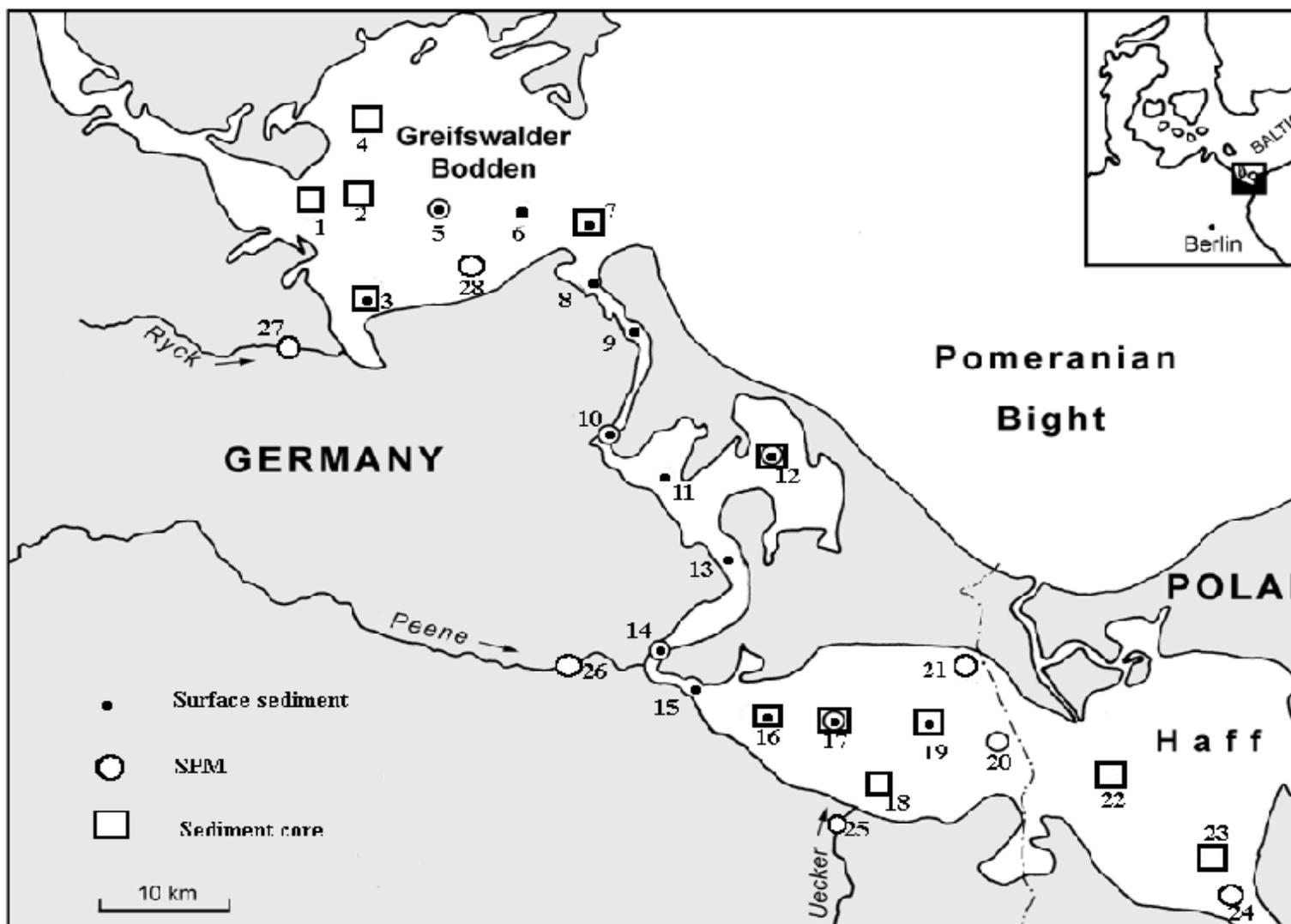
Zn, Cu, Pb in der Fraktion $< 2 \mu\text{m}$ von rezenten und subrezentem Schlicksedimenten des Greifswalder Boddens durchgeführt worden (Rösel et al. 1996). Der Erkenntnisfortschritt der letzten Jahre wird durch Arbeiten bestimmt, die im Rahmen verschiedener interdisziplinärer Forschungsprojekte durchgeführt wurden. Das im Environment-Programm der EU im Zeitraum von 1993 bis 1994 geförderte Projekt "Oder Discharge Environmental Response" (ODER) hatte die Aufgabe, Transportwege der Oderfracht in die vorge-lagerte Ostsee - Arkona- und Bornholmbecken - zu klären sowie durch Pb-210-Untersuchungen die historischen Abläufe der Schwermetallakkumulation zu rekonstruieren. Erste Teilaspekte sind von Leipe u. a. (1995) und Neumann u.a. (1996) publiziert worden. Durch das vom BMBF geförderte Projekt "Transport- und Umsatzprozesse in der Pommerschen Bucht" (TRUMP) ist der Einfluß physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse auf den Transport, Modifikation und Akkumulation der aus dem Mündungsbereich der Oder in die Pommersche Bucht eingetragenen Stoffe untersucht worden.

Ziel des BMBF-Verbundprojektes "Greifswalder Bodden und Oderästuar – Austauschprozesse" (GOAP) ist die Bewertung der Pufferfunktion des Oderästuars durch Untersuchung der Transport- und Austauschprozesse. Teilergebnisse zur Schwermetallverteilung sind von Lampe u.a. (1995) sowie von Osadczuk u.a. (1996) veröffentlicht worden. Resultate des vorliegenden Teilprojektes sind von Eidam u.a. (1996), Lehmann u.a. (1996) und Puff u.a. (1997) publiziert worden. Eine zusammenfassende Darstellung zum Phasenbestand und zur Geochemie der Schwebstoffe des Oderästuars liegt mit der Dissertation von Fietz (1996) vor. Das Ziel der Forschungsarbeiten im Teilprojekt besteht in der Bilanzierung der Schwermetallbelastung des Oderästuars auf der Grundlage einer umfassenden stofflichen Charakterisierung von Schwebstoffen und Sedimenten typischer Ablagerungsräume im Gebiet zwischen Oder und Ostsee mit geochemisch-analytischen und mineralogischen Methoden. Mit den durchgeführten Untersuchungen wird ein Beitrag zur Klärung des Zusammenhanges zwischen dem stofflich-strukturellen Bau der Schwebstoffe und Sedimente und ihrem Schwermetallbindungs- und Mobilisierungsverhalten geleistet.

2. Material und Methoden

Schwebstoff- und Sedimentproben sind an den aus der Abb. 1 ersichtlichen Stationen entnommen worden. Angaben zu den Probenahmestationen sind der Anlage 1 zu entnehmen. Zum Vergleich wurden Schwebstoff- und Sedimentproben aus der Oder in die Forschungsarbeiten einbezogen Puff u.a. (1997).

Die Abtrennung der Schwebstoffe erfolgte mit der Durchflußzentrifuge "Contifuge 17 RS" der Fa. HERAEUS unter Verwendung eines Titan-Durchflußrotors mit einem Radius von 140 mm (15 000 U/ min) aus Wasserproben mit einem Volumen von 200 bis 1000 l bzw. teilweise auch durch Membranfiltration mit Celluloseacetatfiltern (Porengröße $0,45 \mu\text{m}$). Die Förderung erfolgte mit PE-Schöpfern und Pumpen aus ca. 1 m unter der Wasseroberfläche.



(1) QR6; (2) QR2; (3) TG2; (4) 18041-15; (5) Ariadne; (6) (Elsabodd; (7) Loch, 18040-11; (8) Freest; (9) Hollendf; (10) Wolgast; (11) Krummin; (12) Achterws; (13) Rankwitz; (14) Zecherin; (15) Karnin; (16) Peene_Sd, 18112-3; (17) H3, 18118-3; (18) 18116-1; (19) H5, 18119-3; (20) Haff; (21) Kamminke; (22) 18122-6; (23) 18121-1, 18121-2; (24) Trzebiecz; (25) Ueckermünde Hafen; (26) Anklam Hafen; (27) Greifswald Hafen; (28) Vierow

Abb. 1: Untersuchungsgebiet mit Probenahmestationen. (1) QR6; (2) QR2; (3) TG2; (4) 18041-15;

(5) Ariadne; (6) (Elsabodd; (7) Loch, 18040-11; (8) Freest; (9) Hollendf; (10) Wolgast; (11) Krummin; (12) Achterws; (13) Rankwitz; (14) Zecherin; (15) Karnin; (16) Peene_Sd, 18112-3; (17) H3, 18118-3; (18) 18116-1; (19) H5, 18119-3; (20) Haff; (21) Kamminke; (22) 18122-6; (23) 18121-1, 18121-2; (24) Trzebiecz; (25) Ueckermünde Hafen; (26) Anklam Hafen; (27) Greifswald Hafen; (28) Vierow

Für die Beprobung der Oberflächensedimente wurden Kastengreifer eingesetzt. Zur Untersuchung der subrezentem Sedimentation, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Ostseeforschung Warnemünde im Rahmen des EU-Projektes ODER (Oder Discharge – Environmental Response) erfolgte, wurden mit dem Rumohr-Lot gewonnene Sedimentkerne mit einer maximalen Länge von 70 cm in 1 bis 2cm-Intervalle unterteilt. Die Abtrennung des Porenwassers wurde unter Inertgasbedingungen in einer Box vorgenommen. Das Probenmaterial wurde bis zur Verarbeitung durch Frostung bei -20°C konserviert. Filtrate wurden durch Zugabe von HNO_3 bei pH 2 stabilisiert.

Die Entwässerung der Proben erfolgte durch Gefriertrocknung. Zur röntgendiffraktometrischen Phasenanalyse wurde die organische Substanz durch Oxidation mit H_2O_2 beseitigt, das auf pH 7 abgepuffert wurde.

Die analytischen Schwebstoffuntersuchungen wurden an Gesamtproben, die an den Sedimenten vorwiegend an der durch Naßsiebung abgetrennten Kornfraktion $< 63 \mu\text{m}$ durchgeführt. Für die Elementbestimmungen wurden salpetersaure Lösungen von Lithiummetaborat/-tetraborat-Schmelzaufschlüssen sowie Königswasserauszüge mittels verschiedener Methoden der Atomabsorptions-Spektrometrie und der ICP-Atomemissions-Spektrometrie analysiert. Die ermittelten Haupt- und Spurenelementdaten, die aus der [Anlage 2](#) ersichtlich sind, beziehen sich auf die gefriergetrockneten Proben. Zur Ermittlung der Bindungsform der Elemente wurde eine Extraktionssequenz modifiziert nach Tessier (1979) und Förstner (1983) angewendet.

Zur Ermittlung des Mineralbestandes und des Gefüges der Feststoffe wurde eine Kombination verschiedener phasenanalytischer Methoden eingesetzt: Röntgendiffraktometrie, Differentialthermoanalyse, Transmissionselektronenmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikroanalyse. Zur quantitativen Mineralbestimmung mit der Röntgenpulverdiffraktometrie (SIEMENS D 5000) wurde Al als innerer Standard verwendet. Die [Anlage 1.3](#) vermittelt eine Übersicht über die phasenanalytisch untersuchten Proben. Zur Gefügeanalyse von Schwebstoffen an cryopräparierten Proben wurde die Rasterelektronenmikroskopie eingesetzt. Die Gefügeanalyse von Sedimenten erfolgte an gefriergetrockneten Proben mit Rasterelektronenmikroskopie. Weitere Angaben zu den phasenanalytischen Methoden sind den Arbeiten von Lehmann & Eidam (1994) sowie Fietz (1996) zu entnehmen.

3. Geochemische und phasenanalytische Charakterisierung der rezenten Schlicksedimentation

Die Schwermetallakkumulation im Oderästuar ist vor allem an die Schlicksedimentation der Beckenbereiche gebunden. Wie der Vergleich von Schwermetallgehalten der Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ mit denen der Fraktion $< 2 \text{ mm}$ von Oberflächensedimenten des Peenestroms veranschaulicht (Tab. 1), sind die feinsandigen Bereiche durch sehr geringe Schwermetallkonzentrationen gekennzeichnet. Die geochemische Charakteristik der Schlufffraktion der feinsandigen Sedimente (z.B. Wolgast 0,7 % und Krummin 1 % Kornanteil $< 63 \mu\text{m}$) stimmt weitgehend mit der der schlickreichen Sedimente (z.B. Rankwitz und Zecherin) überein, wie der Vergleich der Gehalte von Elementen mit vorwiegend geogener Verteilungstendenz, wie z.B. Nickel und Kobalt, verdeutlicht. Die Variation der Zn-Konzentrationen resultiert aus dem Anstieg der anthropogenen Belastung in Richtung der Odermündung. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß mit der Untersuchung der Schlufffraktion Korngrößeneffekte auf die Schwermetallverteilung weitgehend unterdrückt werden können. Da in den Sedimenten des Oderästuars der Kornanteil zwischen 6,3 bis 63 μm dominiert (Neumann et al. 1996), wurde die Abtrennung der Schlufffraktion $< 63 \mu\text{m}$ gegenüber der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ bevorzugt, um bei Bilanzbetrachtungen einen möglichst großen Sedimentanteil zu erfassen.

Tabelle 1. Vergleich von Elementgehalten der Fraktion $< 63 \mu\text{m}$ mit denen der Fraktion $< 2 \text{ mm}$ in Oberflächensedimenten des Peenestroms. (Konzentrationsangaben in mg/kg)

		Wolgast	Krummin	Achterws	Rankwitz	Zecherin	Karnin
		15.09.95	15.09.95	20.09.95	15.09.95	14.09.95	14.09.95
Cu	$< 63 \mu\text{m}$	52	41	43	55	51	49
	$< 2 \text{ mm}$	< 5	< 5	42	52	48	< 5
Cr	$< 63 \mu\text{m}$	67	60	52	69	66	76
	$< 2 \text{ mm}$	< 5	14	46	63	66	15
Mn	$< 63 \mu\text{m}$	567	967	1330	1530	3740	3300
	$< 2 \text{ mm}$	70	135	1130	1380	3560	366
Ni	$< 63 \mu\text{m}$	37	40	41	43	44	44
	$< 2 \text{ mm}$	< 5	< 5	37	42	42	< 5
Zn	$< 63 \mu\text{m}$	309	273	364	620	588	571
	$< 2 \text{ mm}$	8	20	326	540	556	48
< 63							

μm	0,7%	1,0%	86,1%	93,4%	95,6%	6,7%
---------------	------	------	-------	-------	-------	------

Nach den phasenanalytischen Untersuchungsergebnissen (Tab. 2) sowie nach der Haupt- und Spurenelementcharakteristik (Tab. 3, 4 und 5) sind in der oberflächennahen rezenten Schlicksedimentation des Oderästuars zwei Hauptfaziestypen abgrenzbar:

Lagunärer Faziestyp der Schlicksedimentation:

Das Sedimentationsmilieu der rezenten Schlicksedimentation des Stettiner Haffs, des südlichen Peenestroms und des Achterwassers ist aufgrund eingeschränkter Austauschverhältnisse mit der Ostsee mit Werten von durchschnittlich 2 PSU durch verhältnismäßig niedrige Salinitäten charakterisiert. Die Redoxverhältnisse in den C_{org} -reichen oberflächennahen Schlicksedimenten sind durch suboxische bis anaerobe Bedingungen gekennzeichnet. Aus dem hohen Eutrophierungsgrad der Gewässer – poly- bis hypertroph – leitet sich eine Dominanz biogen-organogener bzw. authigener Phasen (z.B. Calcit, Opal und organische Substanz) an der Sedimentzusammensetzung ab. Detritische silikatische Mineralphasen sind nur mit < 50 % am Stoffbestand der Schlufffraktion beteiligt. Das im Vergleich zu den Schlicksedimenten des Greifswalder Boddens höhere Kaolinit/ Dreischichttonmineral-Verhältnis der lagunären Fazies weist auf den fluviatilen Eintrag aus der Oder hin. Kirchner (1994) hat für die fluviatile Sedimentfazies der Oder laterale Gehaltsänderungen festgestellt, die durch die geologischen Bedingungen der jeweiligen Teileinzugsgebiete bestimmt werden. So verringert sich in Fließrichtung das Kaolinit/Dreischichttonmineral-Verhältnis, da die Mineralassoziation des mesozoisch-tertiär geprägten Nordrandes des Böhmischeschlesischen Grundgebirges von der Assoziation der quartären Ablagerungen abgelöst wird.

- Brackisch-mariner Faziestyp der Schlicksedimentation:

Das Sedimentationsmilieu der Schlicksedimentation des Greifswalder Boddens ist durch den aktiven Wasseraustausch mit der Ostsee im Vergleich zu den inneren lagunären Ästuargewässern mit Durchschnittswerten von 7 PSU durch höhere Salinitäten charakterisiert. Die bräunliche Färbung einer ca. 5 cm mächtigen Oberflächenschicht weist auf oxische Bedingungen in den Oberflächensedimenten hin.

Tabelle 2. Phasenbestand von Schlicksedimenten des lagunären Faziesbereiches (Oderhaff und südlicher Peenestrom) im Vergleich mit denen der brakisch-marinen Fazies des Greifswalder Boddens.

Konzentrationsangaben in %.

.	StettinerHaff		StettinerHaff		GreifswalderBodden	GreifswalderBodden
	Fraktion > 63 μm		Fraktion < 63 μm		Fraktion > 63 μm	Fraktion < 63 μm
.	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Mittelwert
Quarz	42	84	22	50	68	43
Kalifeldspat	6	10	4	8	10	8
Plagioklas	3	6	3	8	3	5
Kaolinit	3	5	6	9	-	3
3-Schichtsilikate	8	11	6	16	2	8

Chlorit	3	10	3	4	-	1
Calcit	15	43	15	22	3	2
Dolomit	2	2	3	5	2	1
Pyrit	4	16	7	19	-	1
Org. Substanz	n.b.	n.b.	24	32	7	14
Opal	n.b.	n.b.	12	15	2	8
Fe-Mn-Oxidhydrate	n.b.	n.b.	2	4	2	2
Kornanteil	19,3	42	80,7	98	43	57

Die Schlicksedimentation leitet sich im wesentlichen aus der Erosion von pleistozänem Kliffmaterial sowie von exponierten Geschiebemergelkuppen im Ostteil des Greifswalder Boddens ab (Janke & Kliewe 1990, Flemming & Bartholomä 1994, Gingele & Leipe 1997). Auf den überwiegend autochthonen Charakter der Sedimente weisen auch Untersuchungen zur Schwermineralzusammensetzung hin. So spricht nach Wehner (1990) der hohe Anteil verwitterungsempfindlicher Minerale (Hornblende, Epidot und Pyroxene) für kurze Transportwege. Auch die signifikante negative Korrelation von Si mit Al, Fe, Mg u.a. Elementen deutet auf einen vergleichsweise niedrigen Verwitterungsgrad hin. Entsprechend der Ableitung der brackisch-marinen Fazies aus der Erosion von pleistozänem Endmoränenmaterial sind die Schlicke des Greifswalder Boddens durch einen dominierenden Anteil silikatischer Phasen (Quarz, Feldspat und Tonminerale) charakterisiert. Der Gehalt an organischer Substanz liegt im Bereich von 14 %. Die Calcit- und Eisensulfid-Konzentrationen sind mit Werten um 1 % vergleichsweise niedrig.

Nach den Ergebnissen einer Clusteranalyse der Hauptelemente der Schlufffraktion (Abb. 2 und 3) grenzen sich die Oberflächensedimente im Ostteil des Greifswalder Boddens (Stationen Elsabodd und Loch), beeinflusst durch den Austrag aus dem Peenestrom, durch niedrigere SiO₂- bzw. höhere CaO-, P- und S-Konzentrationen von denen im Westteil des Boddens ab (Tab. 3, [Abb. 4](#)). Entsprechend unterscheiden sich die Oberflächensedimente des nördlichen Peenestrom (Stationen Freest und Hollendorf) von denen im südlichen Teil und von denen des Stettiner Haffs aufgrund des Einflusses von Einstromereignissen aus dem brackisch-marinen Milieu durch höhere SiO₂-, Na₂O- und K₂O- sowie niedrigere CaO- und S-Gehalte.

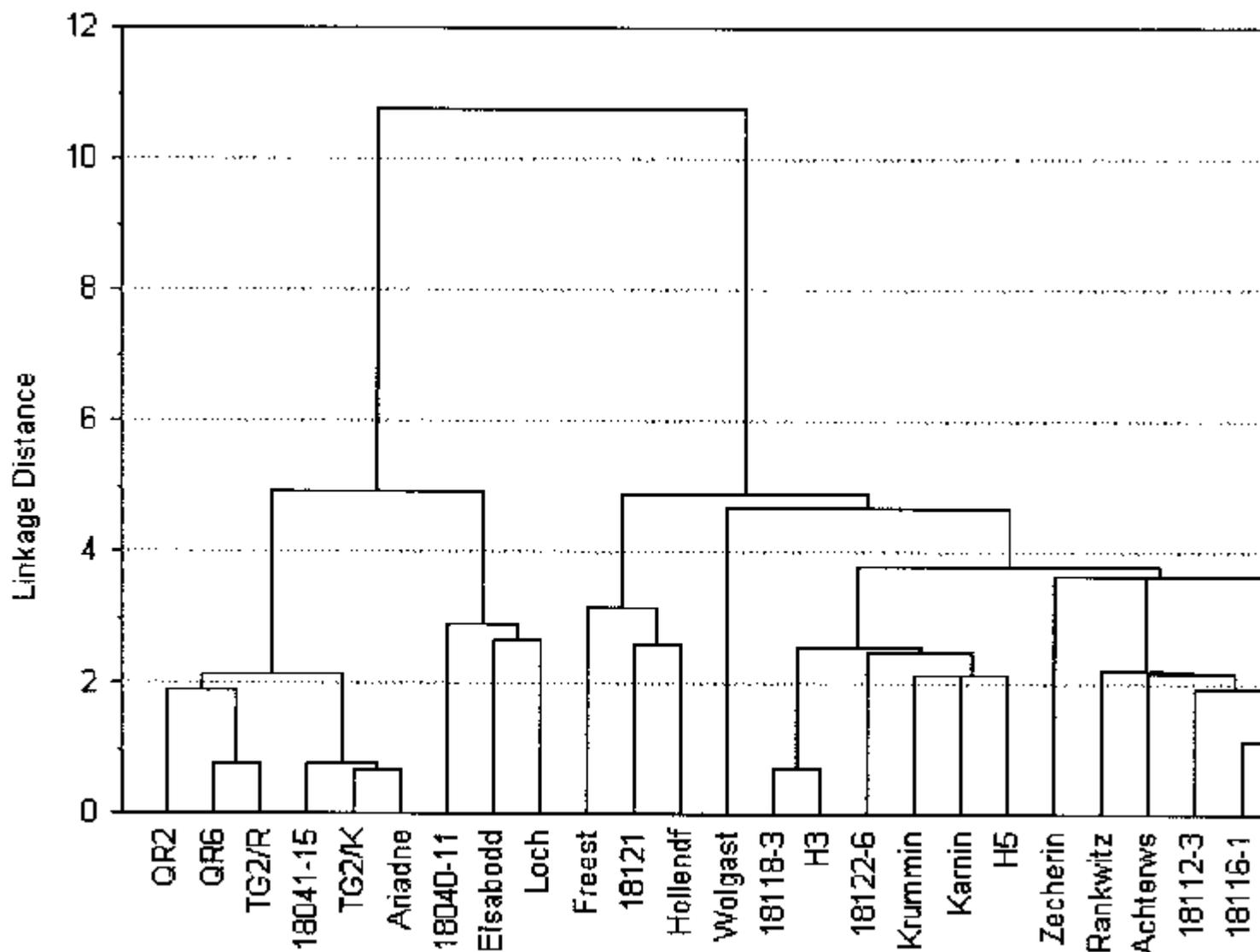
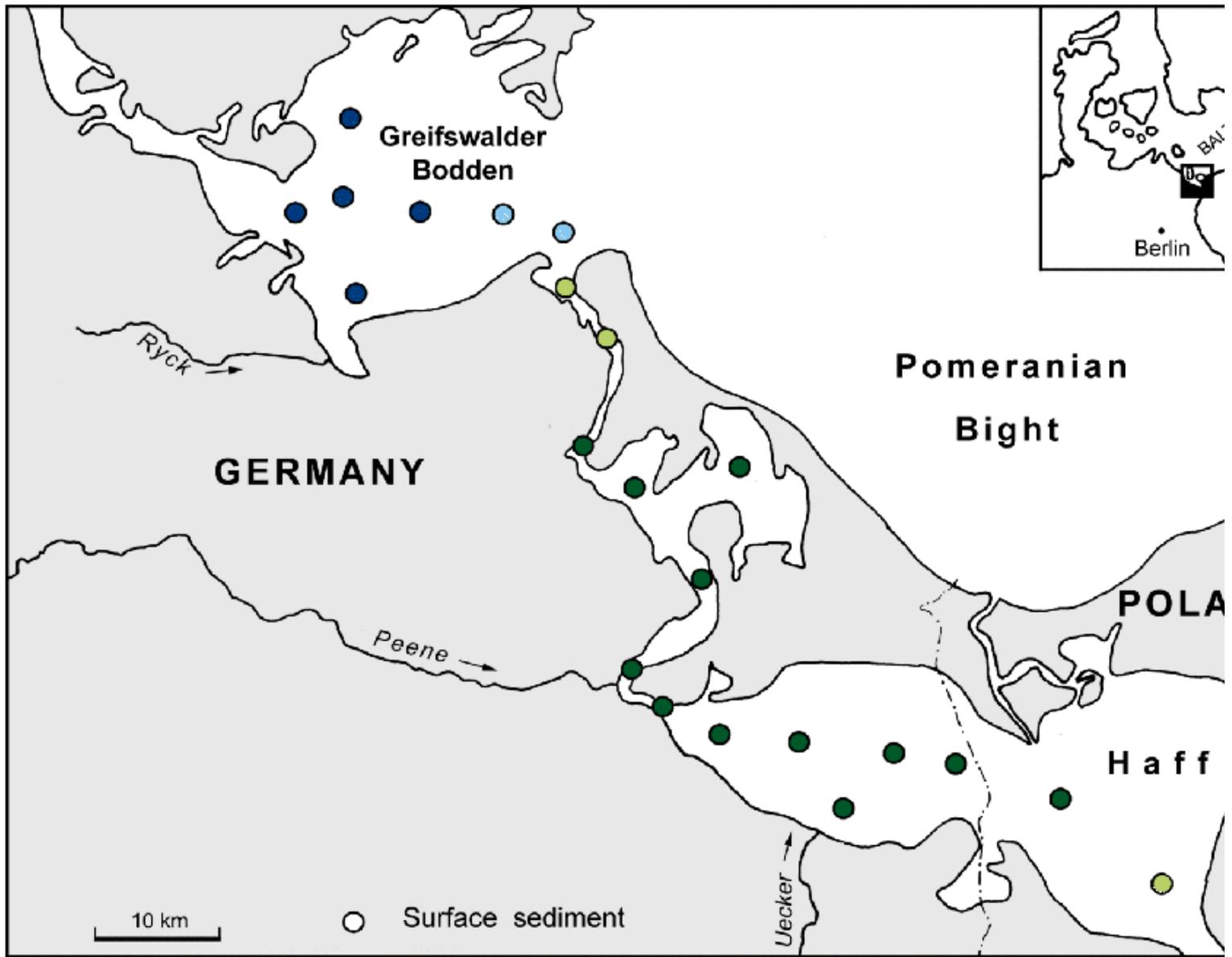


Abb. 2. Dendrogramm der Clusteranalyse der Hauptelemente Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P und S von Oberflächensedimenten des Oderästuars. Kornfraktion < 63 μm des Teufenbereichs 0 bis 10 cm. Methode: Single Linkage, euklidische Distanz.



- – Greifswalder Bodden: Schlicksedimentation des westlichen Beckenbereichs;
- – Greifswalder Bodden: Übergangsbereich zum nördlichen Peenestrom;
- – Stettiner Haff und südlicher Peenestrom;
- – Nördlicher Peenestrom und Odermündung

Abb. 3. Räumliche Verteilung der mit der Clusteranalyse ausgehaltenen Klassen. (1) – Greifswalder Bodden: Schlicksedimentation des westlichen Beckenbereichs; (2) – Greifswalder Bodden: Übergangsbereich zum nördlichen Peenestrom; (3) – Stettiner Haff und südlicher Peenestrom; (4) - Nördlicher Peenestrom und Odermündung

Tabelle 3: Mittelwerte der Analysen der Fraktion < 63 µm von Oberflächensedimenten des Stettiner Haffs, des Peenestroms, des Achterwassers und des Greifswalder Boddens im Zeitraum Mai 1994 bis Oktober 1995. Konzentrationsangaben der Hauptelemente in Prozent, der Spurenelemente in mg/kg.

	Haff	H5	H3	Peene_Sd	Karnin	Zecherin	Rankwitz	Achterws	Krummin	Wolgast	Hollendf	Freest	Loch	Elsaboc
.	n=3	n=3	n=4	n=3	n=3	n=2	n=3	n=3	n=4	n=2	n=4	n=4	n=3	n=3

SiO ₂	36,6	42,2	44,5	37,7	40,3	32,1	35,1	37,6	40,8	40,2	48,5	48,2	60,4	58,8
TiO ₂	0,41	0,41	0,44	0,39	0,43	0,34	0,34	0,33	0,40	0,38	0,51	0,53	0,71	0,95
Al ₂ O ₃	7,40	6,88	7,46	6,21	6,51	5,40	5,59	5,43	6,13	6,15	7,10	7,37	7,98	8,74
Fe ₂ O ₃	6,88	6,49	6,92	6,18	6,14	6,10	5,47	5,33	4,21	5,09	4,85	5,11	4,71	5,12
MnO	0,35	0,31	0,31	0,36	0,38	0,38	0,29	0,14	0,11	0,19	0,12	0,12	0,10	0,08
MgO	1,15	1,04	1,13	1,02	0,98	0,81	0,93	0,91	0,91	1,12	1,20	1,30	1,31	1,36
CaO	10,2	11,2	9,37	13,65	10,41	12,3	15,2	12,2	10,1	9,52	6,31	3,45	1,58	3,18
Na ₂ O	0,46	0,52	0,58	0,41	0,42	0,37	0,51	0,44	0,50	0,62	0,65	0,68	0,83	0,88
K ₂ O	1,24	1,32	1,42	1,12	1,30	1,07	1,12	1,11	1,47	1,51	1,70	1,65	1,57	2,23
P ₂ O ₅	0,63	0,42	0,27	0,50	0,68	0,72	0,50	0,28	0,48	0,57	0,45	0,50	0,41	0,28
S	1,5	1,96	2,62	2,30	2,10	2,55	2,14	3,39	1,64	n.b.	1,17	2,37	1,01	1,91
GV 550	28,9	22,2	21,2	23,4	26,2	29,8	26,1	27,0	28,5	26,5	27,1	30,6	15,3	15,8
Ba	544	415	418	446	414	310	324	227	267	255	261	262	344	344
Cd	7,6	2,5	4,4	3,5	2,1	2,1	2,1	1,4	1,0	n.b.	2,1	1,9	1,7	1,9
Co	18	14	22	15	13	10	9	8	8	10	8	10	10	15
Cr	127	83	84	89	76	67	63	53	63	63	67	72	83	106
Cu	101	60	66	68	46	55	50	35	46	46	41	51	34	37
Hg	1,6	0,8	1,1	0,9	0,6	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3
Mn	2690	2390	2370	2790	2870	2980	2180	1100	864	1480	945	907	771	580
Ni	63	46	44	48	42	44	38	37	42	37	34	40	30	36
Pb	157	86	132	126	94	103	80	63	70	n.b.	57	69	54	80
Sr	223	228	202	259	214	234	266	228	222	214	261	125	157	172
V	71	63	81	65	55	53	53	50	56	71	67	69	69	81
Zn	1290	765	1170	995	532	611	551	302	286	286	295	282	248	247
Zr	86	170	183	155	259	89	162	209	296	317	1500	499	842	1860

Tabelle 4. Haupt- und Spurenelement-Zusammensetzung der Fraktion < 63 µm von Oberflächensedimenten des Oderästuars und der Rügensch Boddengewässer. Konzentrationsangaben der Hauptelemente in Prozent,

der Spurenelemente in mg/kg. ¹⁾ Stationen: Haff, H5, H3, Peene_Sd, 18112-3, 18116-1, 18118-3, 18119-3, 18122-6;

²⁾ Stationen: Karnin, Zecherin, Rankwitz, Krummin; ³⁾ Stationen: Freest, Hollendorf; ⁴⁾ Stationen: Elsabodd, Loch, 18040-11; ⁵⁾ Stationen: Ariadne, TG2/K, TG"/R, QR2, QR6, 18041-15.

.	Greifswalder Bodden Zentralteil	Greifswalder Bodden SE-Teil	Peene-strom N-Teil	Peene-strom S-Teil	Stettiner Haff	Westrügensch Bodden ^{x)}	Großer Jasmunder Bodden ^{x)}	Kleiner Jasmunder Bodden ^{x)}
.	n=41	n=16	n=6	n=12	n=53	n=7	n=5	n=5

	5)	4)	3)	2)	1)	.	.	.
SiO ₂	68,5±0,45	55,1±2,52	48,7+1,43	37,1±2,06	40,7±0,81	63,9	53,4	47,1
TiO ₂	0,68±0,03	0,63±0,04	0,531+0,041	0,38±0,02	0,41±0,005	0,84	0,58	0,48
Al ₂ O ₃	8,20±0,10	7,54±0,15	7,20+0,19	5,9±0,25	6,96±0,12	8,42	8,24	6,18
Fe ₂ O ₃	3,90±0,09	4,70±0,16	4,90+,024	5,48±0,44	6,54±0,08	3,62	4,16	3,93
MnO	0,06±0,00	0,09±0,01	0,122+0,018	0,29±0,06	0,34±0,01	0,034	0,06	0,11
MgO	1,19±0,02	1,34±0,02	1,23+0,01	0,91±0,04	1,06±0,02	1,23	1,55	1,22
CaO	1,46±0,11	2,09±0,47	5,06+1,60	12,0±1,14	11,0±0,39	1,76	4,57	5,01
Na ₂ O	1,15±0,07	1,26±0,35	0,66+0,03	0,45±0,03	0,50±0,02	1,16	1,09	1,00
K ₂ O	2,30±0,06	1,16±0,11	1,69+0,05	1,24±0,09	1,29±0,03	2,51	2,33	1,84
P ₂ O ₅	0,24±0,01	0,41±0,04	0,453+0,04	0,6±0,06	0,47±0,03	0,20	0,24	0,27
S	1,05±0,05	1,68±0,27	1,77+0,75	2,11±0,18	2,01±0,11	1,43	1,84	2,94
LOI 550° C	13,5±0,41	25,1±3,42	28,5+1,48	27,7±0,89	23,9±0,80	11,8	27,5	29,7
Ba	416±15	311±17	259+8,2	329±30	464±13	393	337	289
Cd	1,5±0,1	1,8±0,1	2,0+0,1	1,8±0,3	4,8±0,5	0,7	1,5	1,1
Co	8±0,0	7±2	9+1	10±1	17±1	7	9	8
Cr	71±3	77±2	70+5	67±3	96±4	77	64	50
Cu	24±1	41±4	45+3	49±2	75±4	20	28	24
Hg	0,2±0,01	0,3±0,04	0,4+0,05	0,6±0,1	1,1±0,1	n.b.	n.b.	n.b.
Ni	22±1	33±2	36+2	42±1	58±2	27	26	21
Pb	45±2	59±4	63+2	87±7	110±7	25	51	48
Sr	123±2	132±9	212+57	234±11	212±5	116	162	220
V	65±3	64±4	64+4	54±1		58	93	77
Zn								

	164±10	252±11	276+35	495±70	855±48	80	118	105
Zr	640±107	720±77	430+91	201±46	355±10	1280	426	423
x) Stodian 1996								

Die Übergangszone zwischen Greifswalder Bodden und Peenestrom ist durch eine starke Seegangs- und Strömungsexponiertheit charakterisiert, so daß auch in größeren Tiefen feinsandige Sedimente mit wechselnden Schlickanteilen vorherrschen ([Abb. 5](#)). Damit verbunden ist vielfach eine signifikante Zr-Anreicherung ([Abb. 6](#)), die auf Schwermineralanreicherungen hinweist. Nach Wehner (1990) dominiert im Greifswalder Bodden im transparenten Schwermineralanteil Zirkon.

In Analogie zum nördlichen Peenestrom ist nach den Ergebnissen der Clusteranalyse auch der Mündungsbereich der Oder (Station 18121) einer Übergangszone zu zuordnen. Die Oder verliert bereits unmittelbar nördlich Schwedt ihren Binnen-Fluß-Charakter. Das Flußgefälle reduziert sich von 0,059 ‰ zwischen Schwedt und Nipperwiese auf 0,0099 ‰ zwischen Nipperwiese und Gartz (Anonym 1896). Ab Nipperwiese beginnt die Vermischungszone von seewärtiger Strom-Oder und landwärtigem Rückstau, der wind- und wasserstandsbedingt ganz verschiedene Abflußsituationen bewirkt. Entsprechend der abnehmenden Transportkraft verändert sich nördlich Schwedt die Ausbildung der Sedimente des Strombettes. Die bis dahin vorherrschenden sandigen Sedimente werden seltener und weichen tonigen Schlickablagerungen, die häufig über Torfschichten ruhen. Aufgrund des übereinstimmenden hydrologischen und sedimentologischen Charakters müssen die verzweigten Wasserarme der West- und der Ost-Oder und ihre seenartigen Erweiterungen zwischen Schwedt - Nipperwiese sedimentologisch und geochemisch durch Protasowicki et al. (1997) charakterisiert. Erwartungsgemäß sind in diesem Übergangsbereich zwischen fluviatilen und lagunärem Faziesbereich in stärkerem Maße schlickartige Sedimente nachgewiesen worden, wobei die Gehalte an organischer Substanz in der West-Oder höher als in der Ost-Oder (Regalica) sind. Besonders in der Nähe von Stettin sowie im Odyniec-Kanal und im Warm-Kanal wurden Gehalte von > 20 Masse-% organischer Substanz festgestellt.

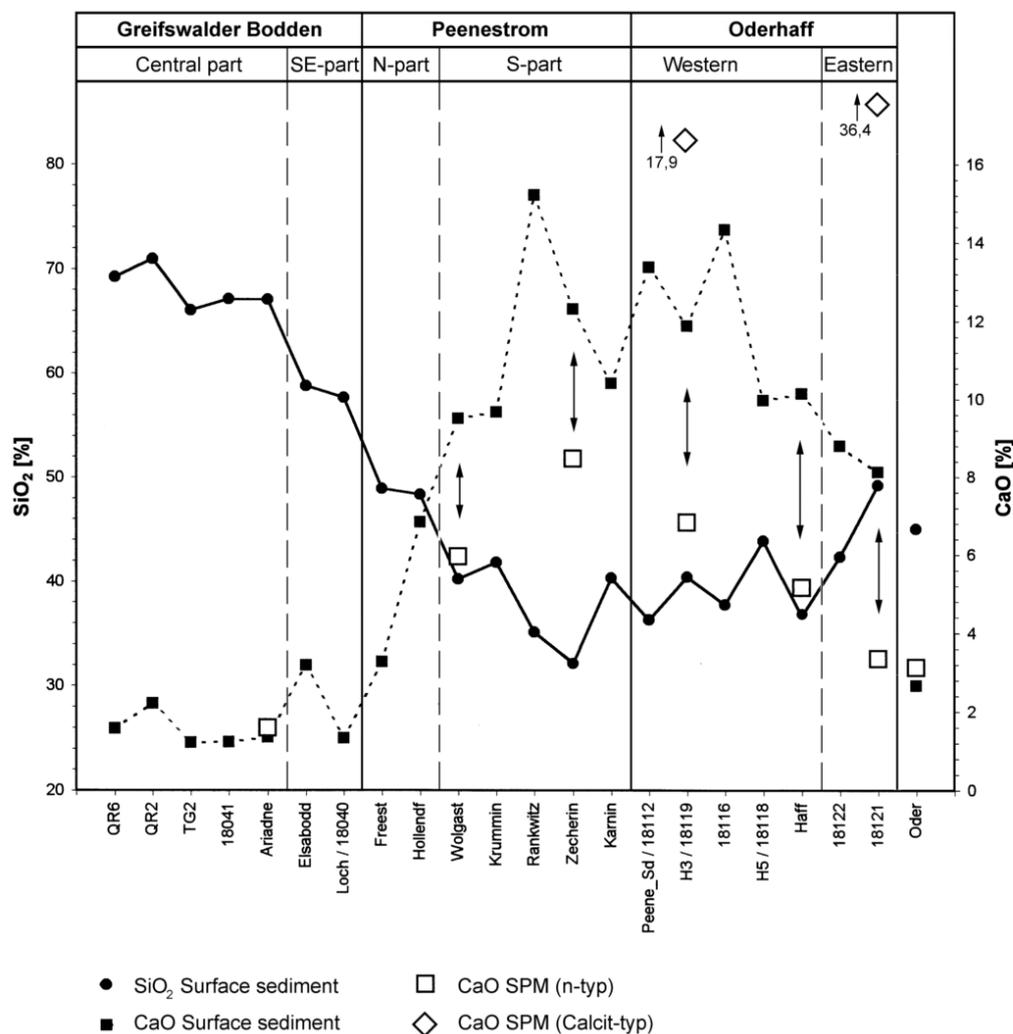


Abb. 4. NW-SE – Profil der SiO₂- und CaO-Werte der Schlufffraktion von Oberflächensedimenten des Oderästuars

Aus der unterschiedlichen Sedimentzusammensetzung der beiden Hauptfaziestypen der Schlicksedimentation resultieren charakteristische Unterschiede in der Gefügebildung. Zur Dokumentation der räumlichen Anordnung der Feststoffpartikel sind Schlickproben am kritischen Punkt gefriergetrocknet worden. Die damit gewonnenen ungestörten Ausschnitte sind elektronenmikroskopisch abgebildet worden. Die Gefügebilder von Proben des Stettiner Haffes (Abb. 7) zeigen Mineralkörner und biogene Partikel > 10 µm, die in erheblichem Umfang von den feinkörnigeren Resten aus getrockneter organischer Substanz oder Ton umhüllt werden. Zum Vergleich sind in der Abb. 8 Schlickproben aus dem Greifswalder Bodden dargestellt worden. Hier dominieren gerundete und gebrochene detritische Mineralpartikel. Kornhüllen und Porenfüllungen aus organischer Substanz oder Ton treten optisch in den Hintergrund. Am Vergleich von Streupräparaten, in denen die natürliche räumliche Anordnung der Komponenten aufgehoben ist, wird sichtbar, daß im lagunären Faziesbereich die biogenen Feststoffpartikel volumenmäßig bestimmend sind (Abb. 9). Biogene Partikel treten in einer nicht überschaubaren Vielfalt sowohl im Sediment als auch im Schwebstoff auf. In dem elektronenmikroskopisch noch gut erschließbaren Größenbereich bis 500 nm dominieren die Algen. Sie sind jedoch immer mit Resten anderer Organismengruppen, insbesondere des Zooplanktons und höherer Pflanzen verbunden.

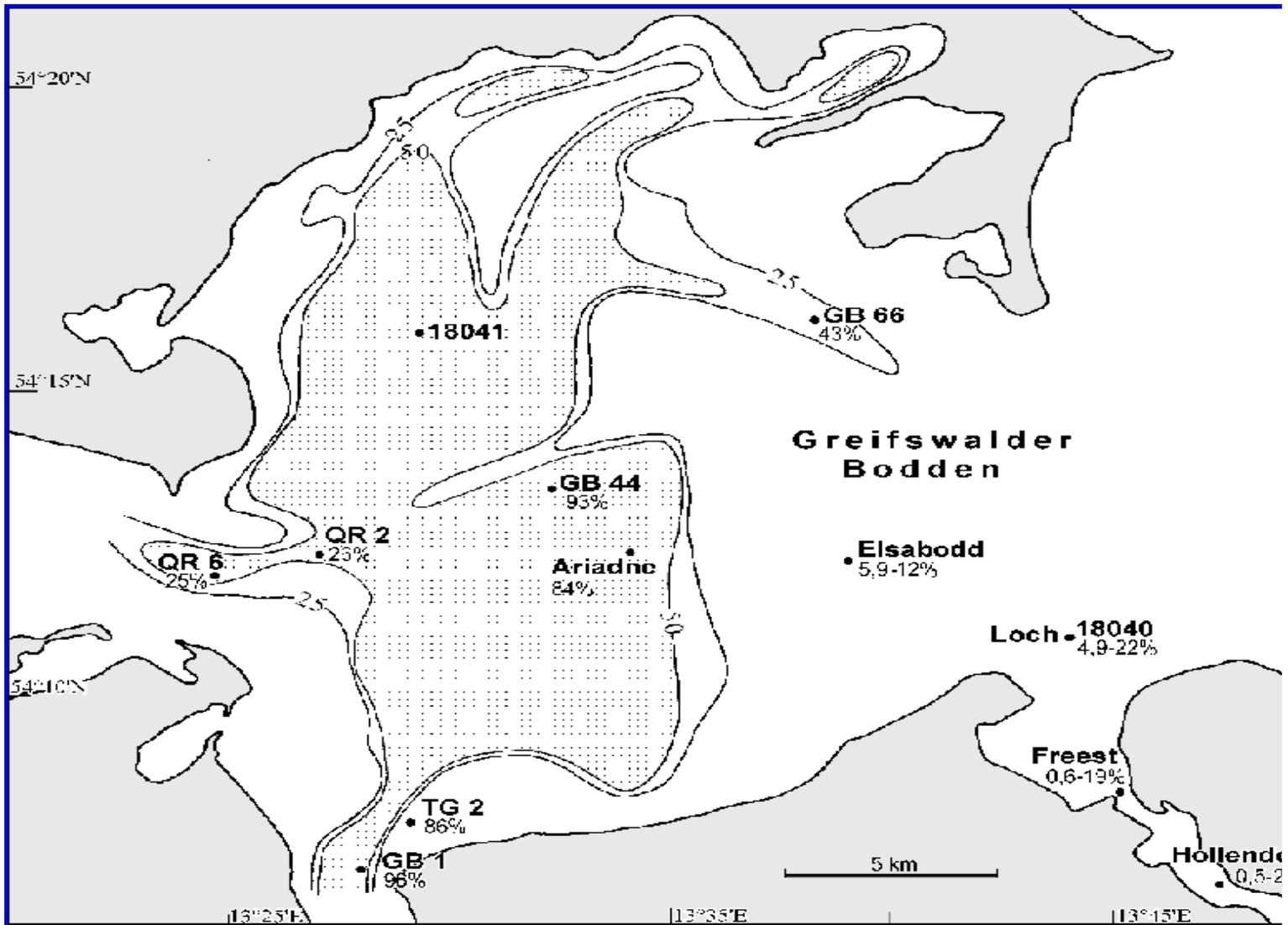


Abb. 5. Verbreitung der Schlicksedimentation im Greifswalder Bodden. Vereinfachte Darstellung nach Untersuchungen von Flemming u.a. 1993. Die 50%–Isolinie kennzeichnet die Verbreitung der Oberflächensedimente mit einem Schluffanteil > 50 %. Der Flächenanteil der Schlickverbreitung beträgt 153 km² bzw. entspricht 30,1 % der Gesamtfläche des Greifswalder Boddens. Prozentangaben für die Stationen: Kornanteil < 63 µm. GB1, GB 44 und GB 66: Sedimentkerne, deren vertikale Schwermetallverteilung von Rösel u.a. (1996) untersucht wurde.

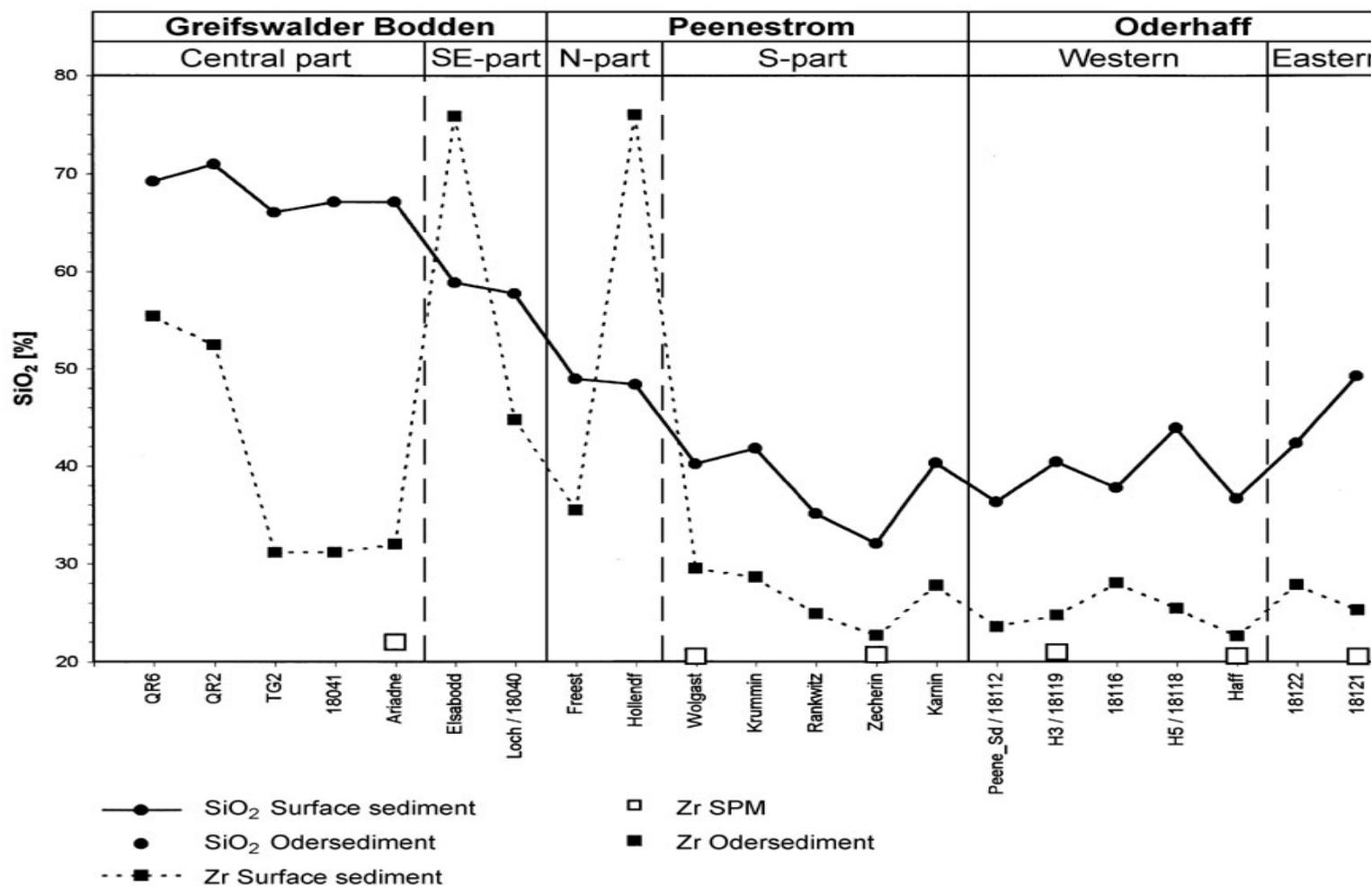
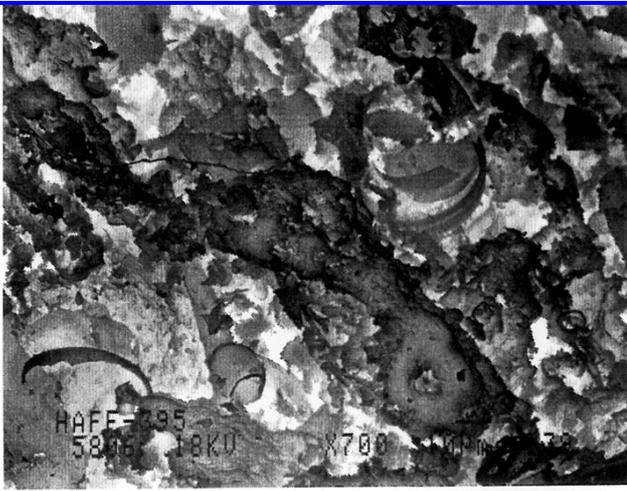


Abb. 6. NW-SE – Profil der SiO₂- und Zr-Werte der Schlufffraktion von Oberflächensedimenten des Oderästuars. Für den Übergangsbereich E-Teil des Greifswalder Boddens/nördlicher Peenestrom ergeben sich aufgrund der strömungs- und wellgangs-exponierten Lage deutlich erhöhte Zirkoniumgehalte. Auch für die Sedimentkerne QR2 und QR6 in einer Randlage zum Strelasund wurden erhöhte Zr-Konzentrationen bestimmt.

Die für das Oderästuarsystem abgeleiteten Faziesverhältnisse der Schlicksedimentation sind, wie Untersuchungen von (Stodian 1996) gezeigt haben, prinzipiell auf andere Sedimentationsräume der Boddenküste übertragbar. Wie aus den Analysendaten der Tabelle 5 ersichtlich ist, sind die Oberflächensedimente der Westrügensch Bodden mit denen des Greifswalder Boddens im Stoffbestand vergleichbar. Die Schlicksedimentation der inneren Boddenengewässer Rügens - Großer und Kleiner Jasmunder Bodden - entspricht mit einer Anreicherung biogen-organogener Phasen, die sich auch in erhöhten Ca-Konzentrationen widerspiegelt, der lagunären Fazies des Stettiner Haffs. Aufgrund der geringen Zuflüsse der inneren Boddenengewässer Rügens ist jedoch die Schwermetallbelastung im Vergleich zum Oderästuar unwesentlich.



50 µm



50 µm

Abb.7. REM-Aufnahmen von Schlicksedimentgefügen der lagunären Fazies.

Oben: biogene Strukturen und gelförmige Oberflächen (Station: Tonne Haff)
Unten: biogene Strukturen, Partikel und detritische Minerale von organischer Substanz eingehüllt (Station: Tonne H3)

Abb. 7. REM–Aufnahmen von Schlicksedimentgefügen der lagunären Fazies.

Oben: biogene Strukturen und gelförmige Oberflächen (Station: Tonne Haff).

Unten: biogene Strukturen, Partikel und detritische Minerale von organischer Substanz eingehüllt (Station: Tonne H3)

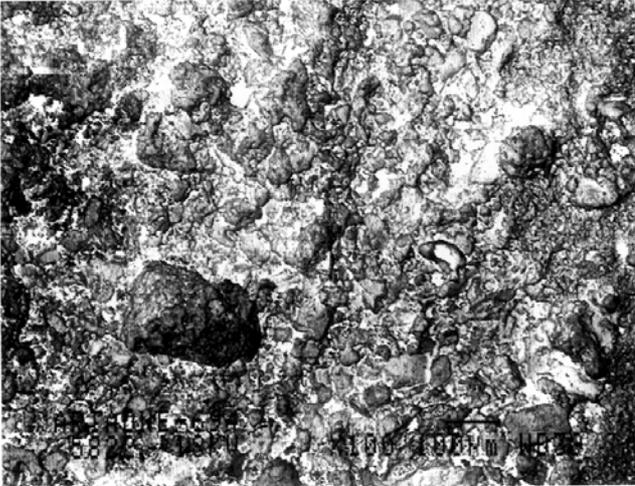
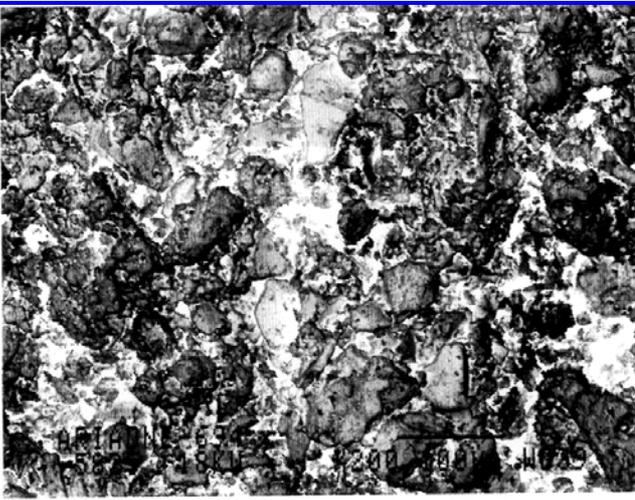


Abb.8. REM-Aufnahmen von Schlicksedimentgefügen der brackisch-marinen Fazies des Greifswalder Boddens. Organische Substanz und biogene Strukturen treten gegenüber detritischen Mineralkörnern in den Hintergrund (Station Ariadne).

Abb. 8. REM-Aufnahmen von Schlicksedimentgefügen der brackisch-marinen Fazies des Greifswalder Boddens.

Organische Substanz und biogene Strukturen treten gegenüber detritischen Mineralkörnern in den Hintergrund (Station Ariadne).

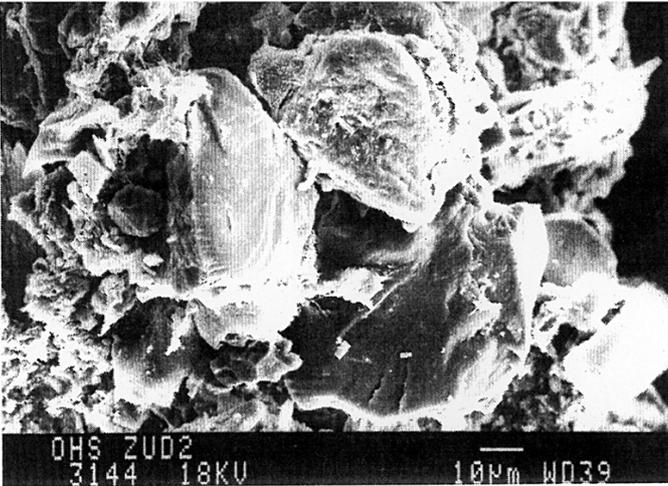
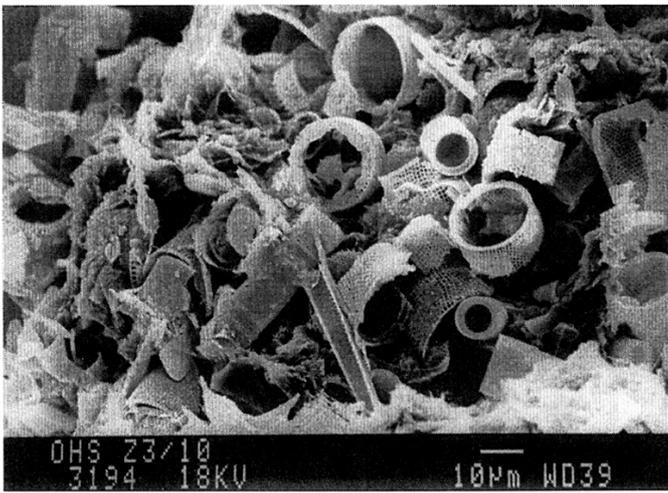


Abb.9. REM-Aufnahmen von Streupräparaten der Komponenten der Schlicksedimentation der lagunären und brackisch-marinen Fazies des Oderästuars.

Oben: Dominanz biogener Partikel in Schlicksedimenten der lagunären Fazies (Station: Tonne Z3 im Achterwasser).

Unten: Dominanz geogenen Detritus in Schlicksedimenten der brackisch-marinen Fazies des Greifswalder Boddens (Station: Zudar).

Abb. 9. REM-Aufnahmen von Streupräparaten der Komponenten der Schlicksedimentation der lagunären und brackisch-marinen Fazies des Oderästuars.

Oben: Dominanz biogener Partikel in Schlicksedimenten der lagunären Fazies

(Station: Tonne Z3 im Achterwasser).

Unten: Dominanz geogenen Detritus in Schlicksedimenten der brackisch-marinen

Fazies des Greifswalder Boddens (Station. Zudar).

4. Geochemische und phasenanalytische Charakterisierung der suspendierten partikulären Substanz

Der Schwebstofftransport im Untersuchungsgebiet ist durch die zyklische Aufeinanderfolge der Stadien Sedimentation – fröhdiagenetische Mobilisierung bzw. Fixierung – Resuspension - biogene Schwebstoffneubildung charakterisiert. Diese Prozeßabfolge führt insgesamt zu einer Anreicherung organogen-biogener Phasen in der suspendierten partikulären Substanz im Vergleich zur oberflächennahen Sedimentation bzw. zu einer entsprechenden Abreicherung detritisch-silikatischer Phasen (Tab. 6). In den Schwebstoffen des Greifswalder Boddens ist die organische Substanz gegenüber der Schlufffraktion der Schlicksedimentation um den Faktor 2,4 bzw. in denen des

Stettiner Haffs um das 1,4-fache angereichert. Auch Opal zeigt eine deutliche Anreicherungstendenz in der Schwebstoffphase. Insbesondere geogene Elemente, wie z. B. Zirkonium, die in Schwermineralen angereichert sind, weisen sehr geringe Konzentrationen in Schwebstoffen auf (Tab. 7).

Die nur geringe Wassertiefe der untersuchten Gewässer führt über eine welleninduzierte Resuspension zu einer Wechselwirkung zwischen Schwebstoffen und Oberflächensedimenten, die sich in engen stofflichen Beziehungen widerspiegelt (Tab. 6 und 7). Im Ergebnis von extremen Wetterereignissen hat sich in den Oberflächensedimenten eine Durchmischungszone ausgebildet (siehe Abschnitt 5). Wie die Darstellung der Ca-Verteilung veranschaulicht (Abb. 4) steht die Ca- bzw. Calcit-reiche Schlicksedimentation des lagunären Faziesbereiches mit relativ Ca- bzw. Calcit-reichen Schwebstoffen in Wechselwirkung, während die Ca- bzw. Calcit-armen Schlicksedimente der brackisch-marinen Fazies des Greifswalder Boddens mit Ca-armen Schwebstoffen korrespondieren.

Tabelle 6. Phasenbestand der suspendierten partikulären Substanz (SPM) der Oder, des Stettiner Haffs und des Greifswalder Boddens. Angaben in Masse-%

	Greifswalder Bodden Sediment < 63 µm	Greifswalder Bodden SPM	Stettiner Haff Sediment < 63 µm	Stettiner Haff SPM	Oder SPM
Quarz	43	13	22	6	11
Kalifeldspat	8	6	4	3	4
Plagioklas	5	5	3	1	2
Kaolinit	3	5	6	4	8
3-Schichtsilikate	8	14	6	5	8
Chlorit	1	2	3	2	5
Calcit	2	7	15	8	3
Dolomit	1	1	2	1	1
Pyrit	1		5		
Org. Substanz	12	32	24	36	33
Opal	4	9	6	22	18
Fe-Mn- Oxidhydrate	2	2	2	2	5
SPM mg/l		10		28	17

Tabelle 7. Haupt und Spurenelementzusammensetzung der Schwebstoffe des Oderästuars. Konzentrationsangaben für Hauptelemente

	Greifswalder Bodden		Südlicher Peenestrom		Stettiner Haff			Oder
	Sediment < 63 µm	SPM	Sediment < 63 µm	SPM	Sediment < 63 µm	SPM n-Typ	SPM CaCO ₃ - Typ	Sediment < 63 µm

	n = 41	n = 5	n = 12	n = 10	n = 53	n = 9	n = 2	n = 8
SiO2	68.5	39.7	37.1	32.6	40.7	37.8	15.1	45
TiO2	0.68	0.402	0.38	0.238	0.41	0.252	0.055	0.589
Al2O3	8.2	7.71	5.9	4.55	6.96	4.62	1.1	9.85
Fe2O3	3.90	4.96	5.48	4.47	6.54	4.35	0.954	7.09
MnO	0.06	0.391	0.29	0.398	0.34	0.475	0.714	0.583
MgO	1.19	1.82	0.91	1.07	1.06	0.94	0.476	0.873
CaO	1.46	1.49	12	7.47	11	6.54	27.2	2.66
Na2O	1.15	2.69	0.45	1.06	0.5	0.62	0.15	0.49
K2O	2.3	2	1.24	0.858	1.29	0.99	0.18	1.51
P2O5	0.24	0.842	0.6	1.13	0.47	1.17	1.17	1.83
S	1.05	0.65	2.11	1.14	2.01	0.758	0.473	0.53
TC		13.2		19.7		18.6	22	
TOC		12		18.2		17.6	16.8	
TIC		1.19		1.52		0.99	5.25	
LOI 550oC		31.6	27.7	40.6	23.9	36.3	32	17.8
N		1.85		3.2		2.63	2.93	
Ba	416	337	329	342	464	461	376	1220
Cd	1.5	1.5	1.8	2.1	4.8	4	1	
Co	8	12	10	8	17	12	3	33
Cr	71	60	67	51	96	63	40	200
Cu	24	59	49	48	75	73	36	208
Hg	0.2		0.6		1.1			
Ni	22	57	42	32	58	44	19	76
Pb	45	115	87	162	110	134	85	217
Sr	123	142	234	250	212	195	268	164
V	65	55	54	37	60	34	25	63
Zn	164	769	495	576	855	1060	711	1590
Zr	640	66	201	21	335	20	< 10	256
mg/l		7				23	39	

Die enge substantielle Verwandtschaft zwischen Oberflächensedimenten und Schwebstoffen wird auch durch die phasenanalytischen Untersuchungen gestützt. Die verwandtschaftlichen Beziehungen werden in der [Abb. 10](#) für den lagunären und brackisch-marinen Bereich demonstriert. Obwohl die spezifisch leichten Phasen (organische Substanz, Opal) im Schwebstoff und die schwereren (Quarz, Feldspäte, Karbonate) im Sediment angereichert werden, läßt sich ein äquivalentes Konzentrationsverhalten zwischen Schwebstoff und Sediment erkennen. In der [Abb. 11](#) sind die Konzentrationen der Schwebstoffbestandteile in einem Einheitsvolumen Wasser für die betrachteten Gebiete dargestellt worden. In Analogie zu den Tonmineralverhältnissen der Oberflächensedimente ist in den Schwebstoffen des Greifswalder Boddens im Vergleich zu denen des Stettiner Haffs eine relative Anreicherung von Dreischichtsilikaten (vereinfacht unter Muskovit zusammengefaßt) gegenüber Kaolinit-Chlorit festzustellen. In Schwebstoffen des Greifswalder Boddens treten verstärkt quellfähige Tonminerale auf, die als Montmorillonit-Muskovit-Wechselagerungen identifiziert wurden.

Die reduktive frühdiagenetische Freisetzung von Mangan und Phosphor führt im Zusammenhang mit

Resuspensionsvorgängen zu einer ausgeprägten Anreicherung der genannten Elemente in der suspendierten partikulären Substanz. Mangan wird oxidativ in Form von Mn(IV)-Oxidhydraten fixiert, während für die freigesetzten Phosphat-Anionen eine adsorptive Bindung an Eisen(III)-Oxidhydraten anzunehmen ist.

Die biogene Schwebstoffneubildung in dem nährstoffreichen Milieu des Stettiner Haffs führt im Vergleich zum Hauptelementchemismus der Oderschwebstoffe und der suspendierten partikulären Substanz des GreifswalderBoddens zu geringeren Ti-, Al- und Fe- (geringerer Anteil silikatischer Phasen) und höheren Ca-Konzentrationen (höherer Calcitanteil) in den Schwebstoffen des lagunären Faziesbereiches. Durch den Verdünnungseffekt, der mit der Schwebstoffneubildung verbunden ist, weisen die Schwebstoffe des Stettiner Haffs im Vergleich mit denen der Oder deutlich geringere Schwermetallgehalte auf. Im Zusammenhang mit sommerlichen Hochdruckwetterlagen können biogen kontrollierte anorganische Calcitfällungen auftreten. Die Ausbildung dieses calcitreichen Schwebstofftyps resultiert wahrscheinlich aus einer extremen Phytoplanktonaktivität in den Sommermonaten, wobei es bei fehlender Resuspension unter windstillen Bedingungen durch Absenkung des CO₂-Partialdruckes in der Wassersäule zu einer Verschiebung des pH in den basischen Bereich mit Werten von 9–10 kommt.

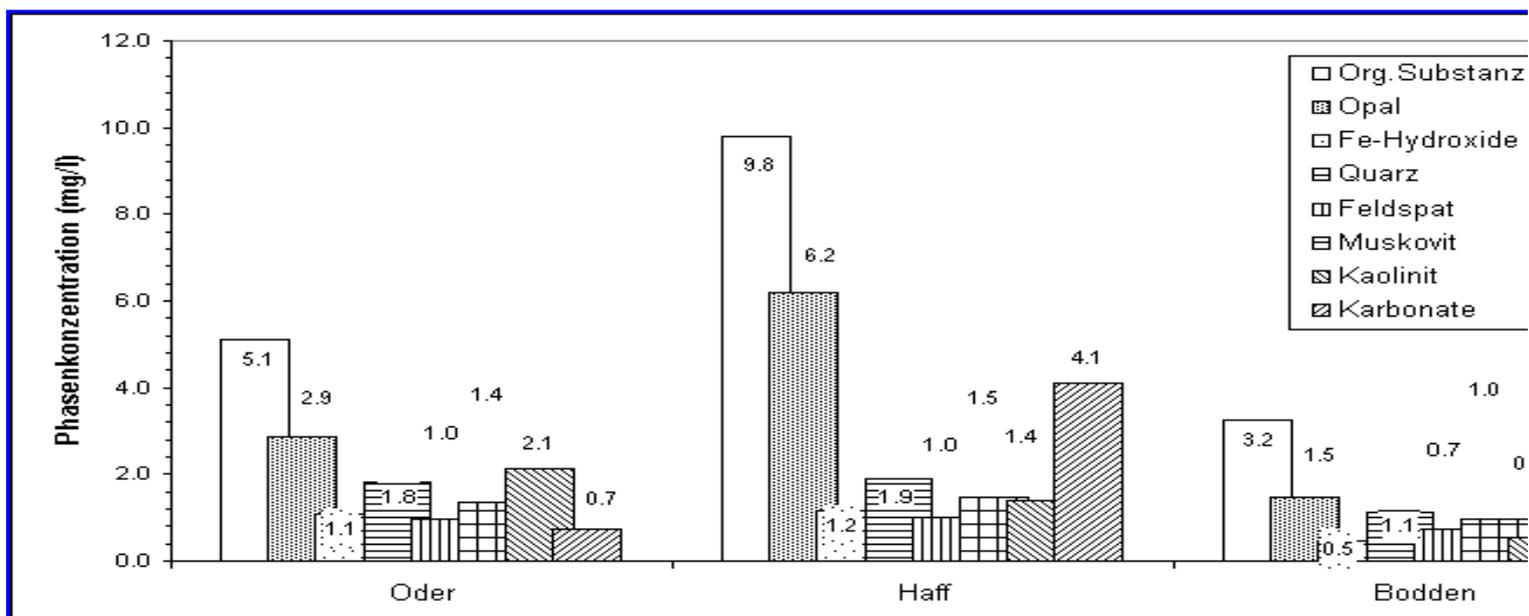


Abb. 10. Vergleich von Phasengehalten von Schwebstoffen und der Fraktion < 63 µm von Oberflächensedimenten im lagunären und im brakisch-marinen Faziesbereich

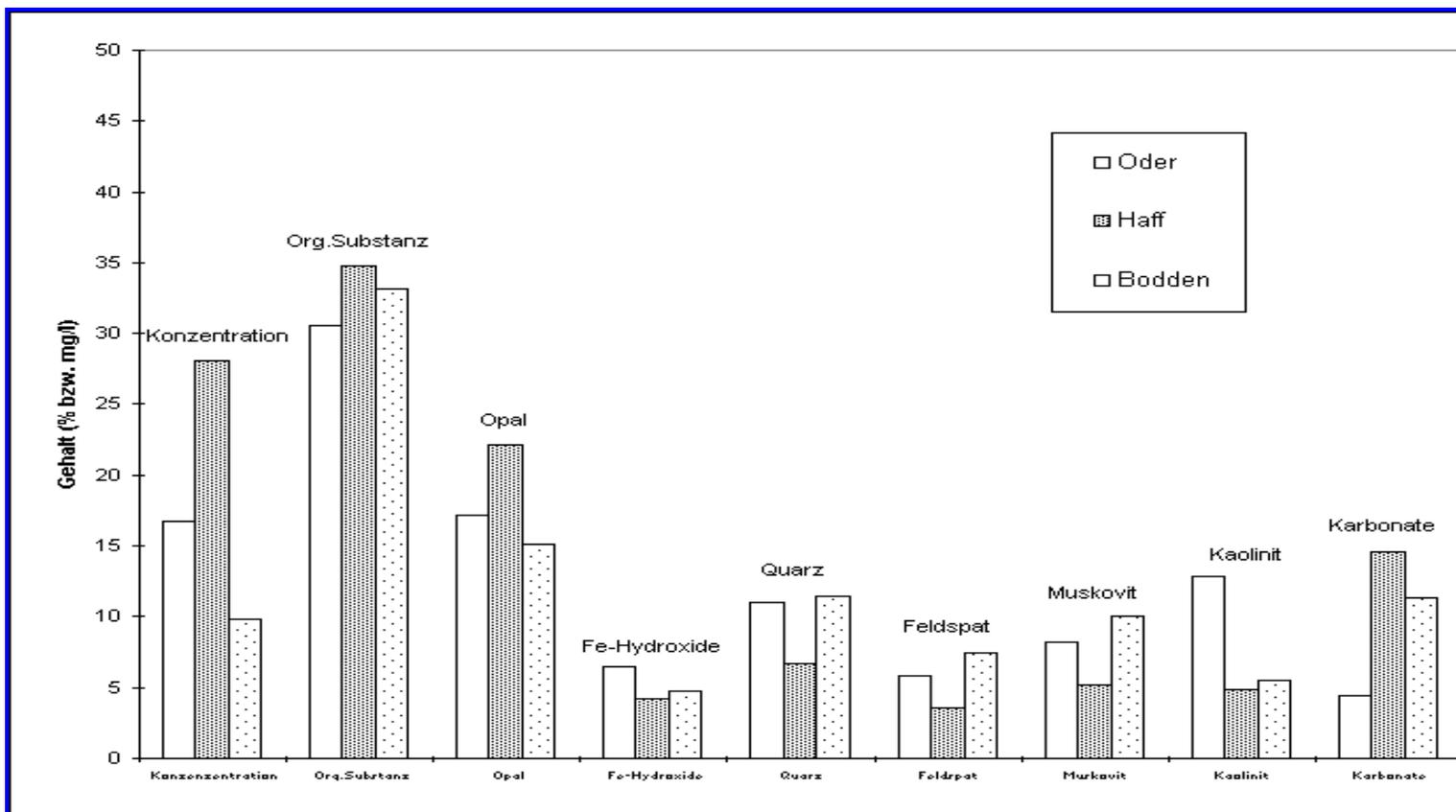


Abb. 11. Vergleich der Phasenkonzentrationen von Schwebstoffen pro Einheitsvolumen für verschiedene Faziesbereiche

Der anorganische Fällungscharakter des Karbonatanteils wird durch REM-Aufnahmen von idiomorphen Calcit-Aggregaten mit Kieselalgen skeletten als Kristallisationskeimen belegt (pers. Mitt. Leipe 1995). In der "Background"-normierten Darstellung der Verteilung der 3d-Elemente (Abb. 12 und 13) ist der Calcittyp im Vergleich zum Normaltyp der Schwebstoffe durch geringe Spurenelementgehalte (z.B. Fe, Co und Ni) charakterisiert. Im Gegensatz dazu zeigen Mangan und Zink, die aufgrund ihrer Ionengröße diadoch in das Calcitgitter eingebaut werden können, auch im CaCO_3 -Schwebstofftyp eine Anreicherungstendenz. Der Mn^{2+} -Einbau in das Calcitgitter weist auf ein sauerstoffarmes Milieu unter stagnierenden windstillen Bedingungen hin. Der Vergleich der Verteilungskurven der 3d-Elemente für den lagunären und brackisch-marinen Faziestyp veranschaulicht einerseits die unterschiedliche Spurenelementcharakteristik der Faziesbereiche und zeigt andererseits die enge stoffliche Verwandtschaft zwischen Schwebstoffen und Oberflächensedimenten der ausgehaltenen Bereiche.

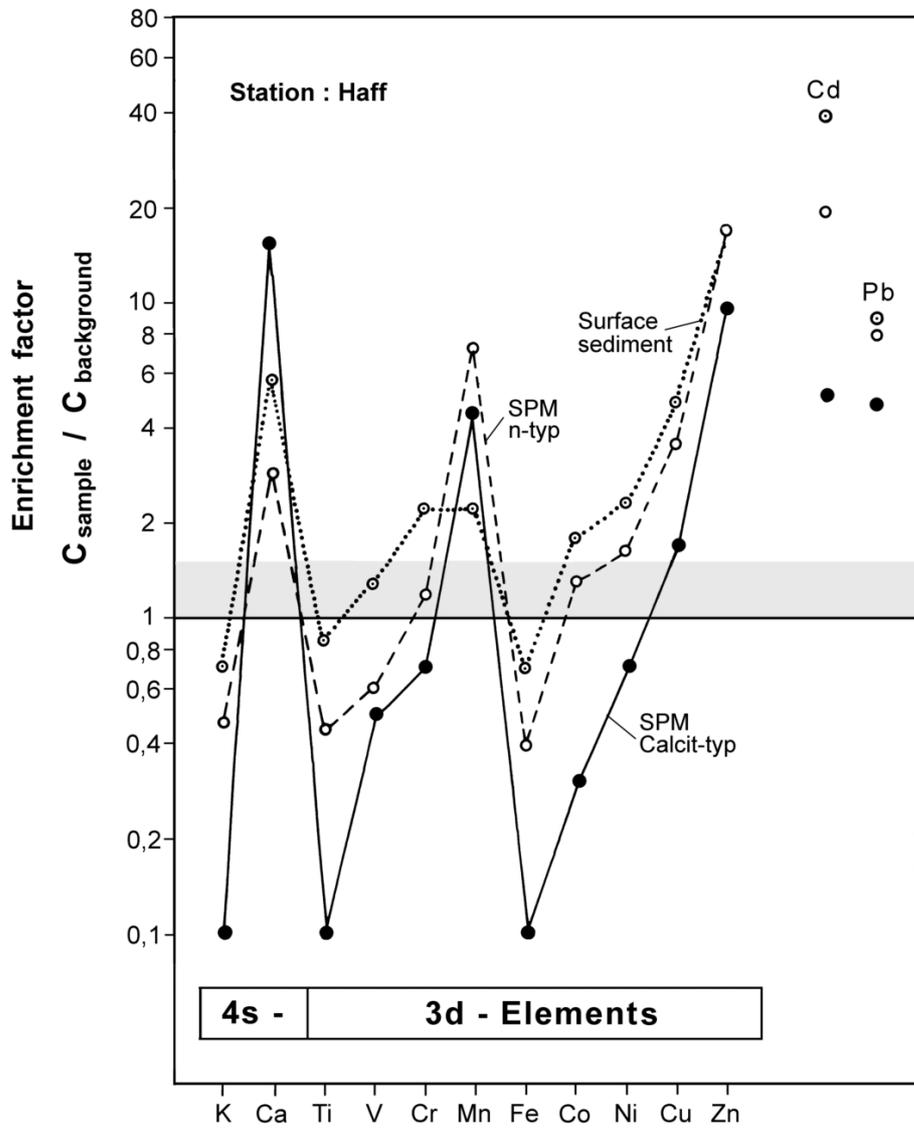


Abb. 12. "Background"-normierte Verteilung der 3d-Elemente in Schwebstoffen des Stettiner Haffs (Station: Tonne Haff). Die Darstellung veranschaulicht die extreme Mn-Anreicherung in der suspendierten partikulären Substanz im Vergleich zu den Oberflächensedimenten. Von den Schwermetallen zeigen vor allem die Elemente mit kovalenter (sulfidischer) Bindungstendenz, die am Ende der 3d-Reihe stehen, eine Anreicherungstendenz.

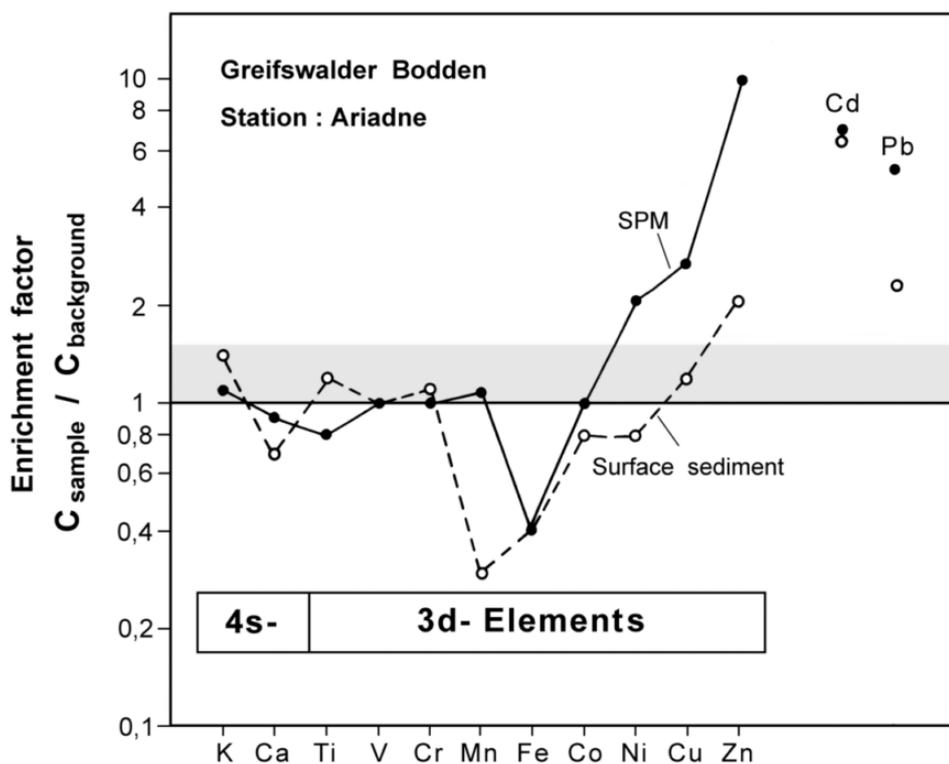


Abb. 13. "Background"-normierte Verteilung der 3d-Elemente in Schwebstoffen des Greifswalder Boddens (Station: Ariadne). In der Verteilung der 4s- und 3d-Elemente, die sich deutlich von der des Stettiner Haffs unterscheidet, wird die stoffliche Korrespondenz zwischen Schwebstoffen und Oberflächensedimenten sichtbar.

Der schwebstoffgebundene Schwermetalltransport steht in einer engen Beziehung zum Gefüge der suspendierten partikulären Substanz, die in nährstoffreichen Gewässern durch eine Flockenstruktur charakterisiert wird. In den Schwebstoffflocken sind feste Partikel durch gerüstartige gelförmige anorganische und organische Substanzen verbunden. Die Existenz der gelförmigen Feststoffüberzüge ist untrennbar mit mikrobiellem Leben verbunden. Eine oft beschriebene Erscheinungsform von Gel-Phasen sind extrazelluläre polymere Substanzen (Flemming 1991), oder exopolymere Substanzen (Koops & Karbe 1994), die überwiegend als exopolymere Polysaccharide ausgebildet sind (Blum et al. 1982, Chenu & Jaunet 1992) und zusammengefaßt als EPS bezeichnet werden. Ihre herausragende Eigenschaft ist das Sorptionsvermögen gegenüber anderen Partikeln oder gegenüber gelösten Wasserinhaltsstoffen und Schadstoffen. Die EPS-Adsorption gilt als der grundlegende Mechanismus der Flockenbildung (Gregory 1978, Eisma 1993). Die mikroskopischen Untersuchungen frischer Schwebstoffe vermitteln den Eindruck, daß die dichten Mineralkörner sowie die festen organischen Partikel in unterschiedlichem Maße das Substrat und die Bewuchsgrundlage für eine intensive Besiedlung mit einer sehr vielfältigen belebten Materie bilden. Damit stellen sich die Schwebstoffflocken als biozönotische Strukturen dar (Kausch 1996). Die organischen Strukturen sind mit ihrem hohen Auftrieb in der Lage spezifisch schwere, detritische Körner zu transportieren.

Mit der Methode der Cryopräparation ist es gelungen, die räumliche Anordnung und gegenseitige Fixierung der Flockenbestandteile rasterelektronenmikroskopisch sichtbar zu machen. Bedingt durch den Sublimationsvorgang werden die natürlicherweise voluminösen und undifferenzierten bakteriellen oder oxidhydratischen Schleime auf ihre Hauptverbindungsstränge reduziert. Sie erscheinen nach der durch die Sublimation bedingten Entwässerung als gerüst- oder netzbildende Fäden, deren Ausgangspunkte als Haftpunkte auf den festen Partikeln liegen und die damit die räumliche Koordination der Schwebstoffbestandteile aufzeigen. Es können EPS-Strukturen unterschieden werden, die in genetischem Zusammenhang zu Bakterien, zu pilzähnlichen Gebilden oder zu Kieselalgen stehen. Typisch sind jedoch lockere, hauptsächlich bakterielle Netzbildungen mit einem hohen Anteil detritischer mineralischer und biogener Partikel. Damit wird es möglich zwischen eingebundenen, fixierten Schwebstoffbestandteilen und Einzelkörnern zu unterscheiden.

Im Stettiner Haff und im südlichen Peenestrom besitzen die Schwebstoffe eine ausgeprägte Flockenstruktur mit intensiver, dichter Vernetzung der meist biogenen Partikel über bakterielle, sklerotinitische oder diatomitische schleimartige EPS (Abb. 14 und 15). Im Unterschied zum fluviatilen Faziesbereich, in dem Teilnetze unterschiedlicher Netzdichte und große detritische Partikel (> 40 µm) das Gefüge bestimmen (Abb. 16), herrschen im lagunären Faziesbereich ungestörte, voluminöse und dichte Flockenverbände und biogene Partikel vor. Die Unterschiede der Bereiche hinsichtlich der Phasenzusammensetzung äußern sich entsprechend in der

Gefügeausbildung. Im Greifswalder Bodden ist die Vernetzung der Schwebstoffbestandteile zu Flocken weniger dicht als im lagunären Faziesbereich ([Abb. 17](#)). Die netzbildenden Komponenten sind überwiegend bakterielle EPS und Diatomeen.

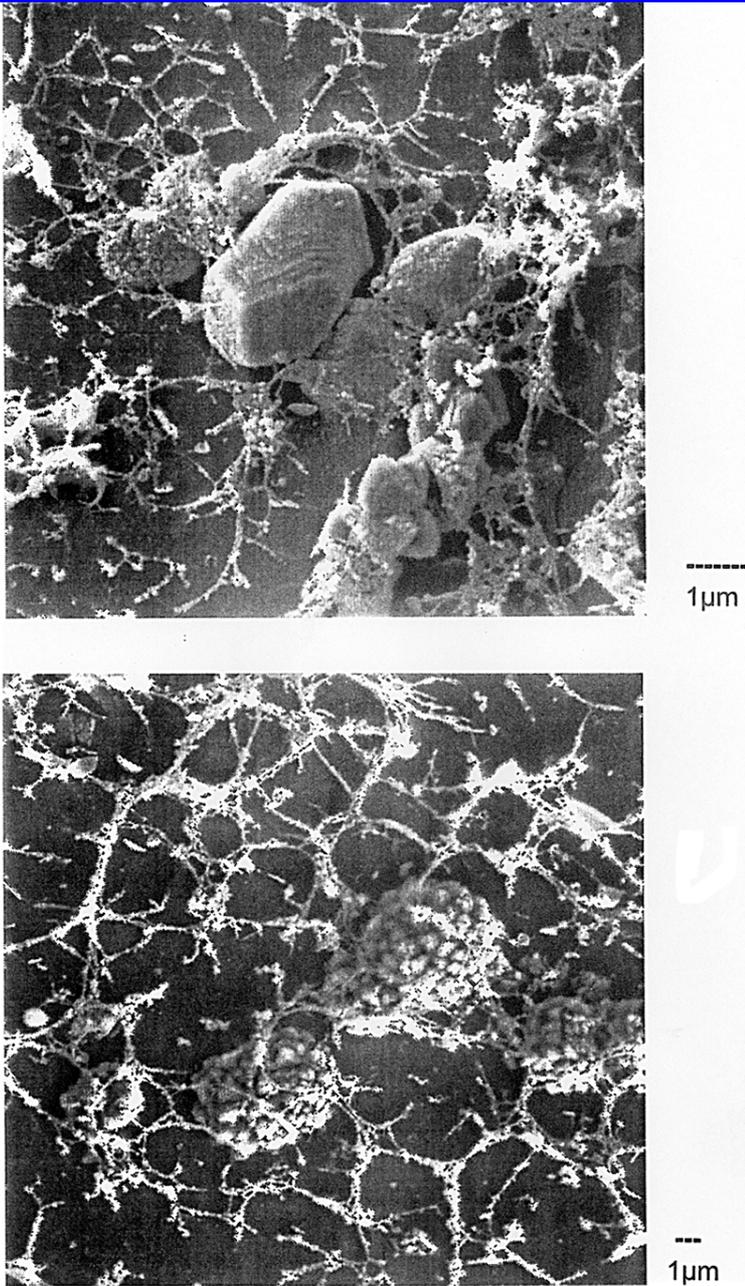


Abb. 14. Cryo-REM-Aufnahmen von Schwebstoffflocken des Stettiner Haffs (Station: Tonne H3).

Oben: Calcit als Muschelbruchstück und feinkörnige Neubildung
Unten: Pyritframboide

Abb. 14. Cryo-REM-Aufnahmen von Schwebstoffflocken des Stettiner Haffs

(Station: Tonne H3).

Oben: Calcit als Muschelbruchstück und feinkörnige Neubildung.

Unten: Pyritframboide

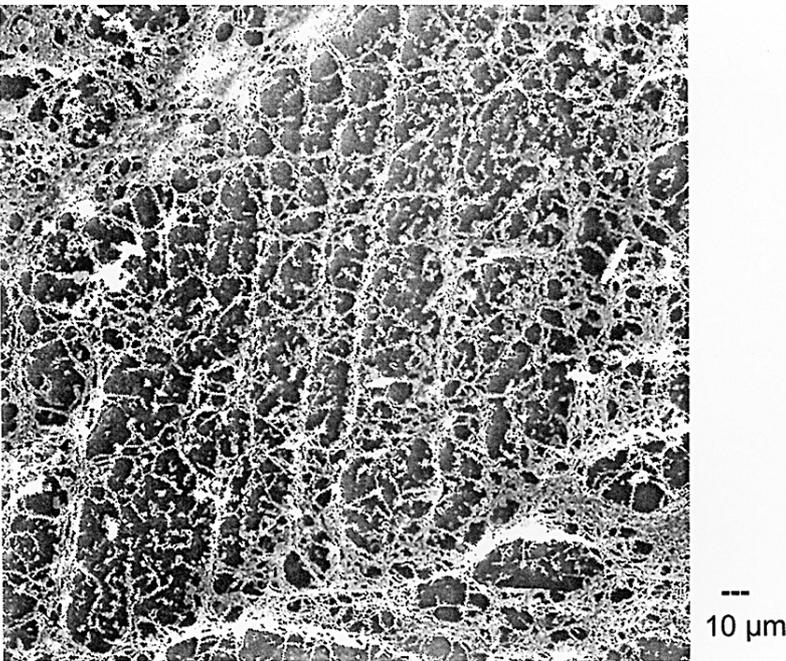
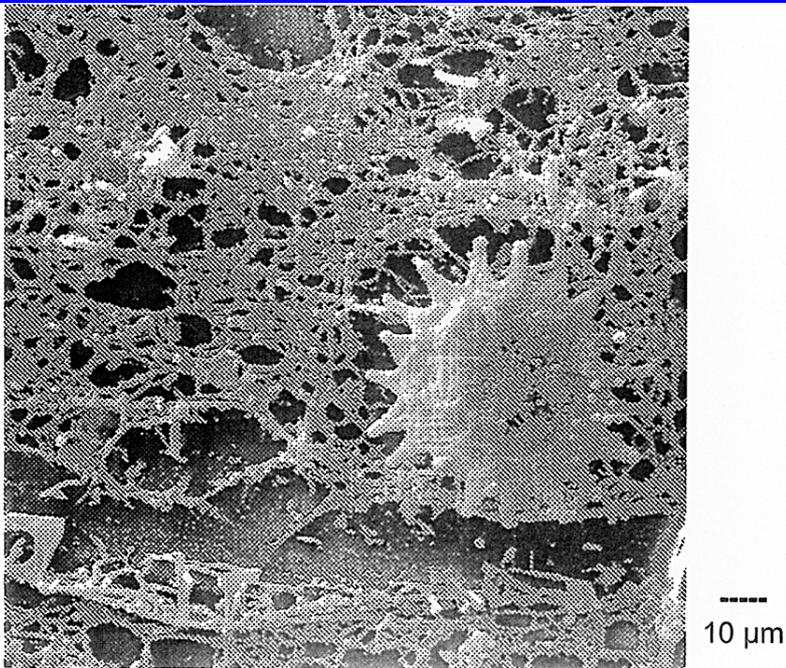


Abb.15. Cryo-REM-Aufnahmen von Schwebstoffflocken des Peenestroms (Station: Zecherin)

Oben: dichte Partikelvernetzung durch bakterielle EPS mit fixierter Grünalge
Unten: grob- und feinmaschige Netzausbildung durch bakterielle EPS

Abb. 15. Cryo-REM-Aufnahmen von Schwebstoffflocken des Peenestroms.

(Station: Zecherin).

Oben: dichte Partikelvernetzung durch bakterielle EPS mit fixierter Grünalge.

Unten: Grob- und feinmaschige Netzausbildung durch bakterielle EPS.

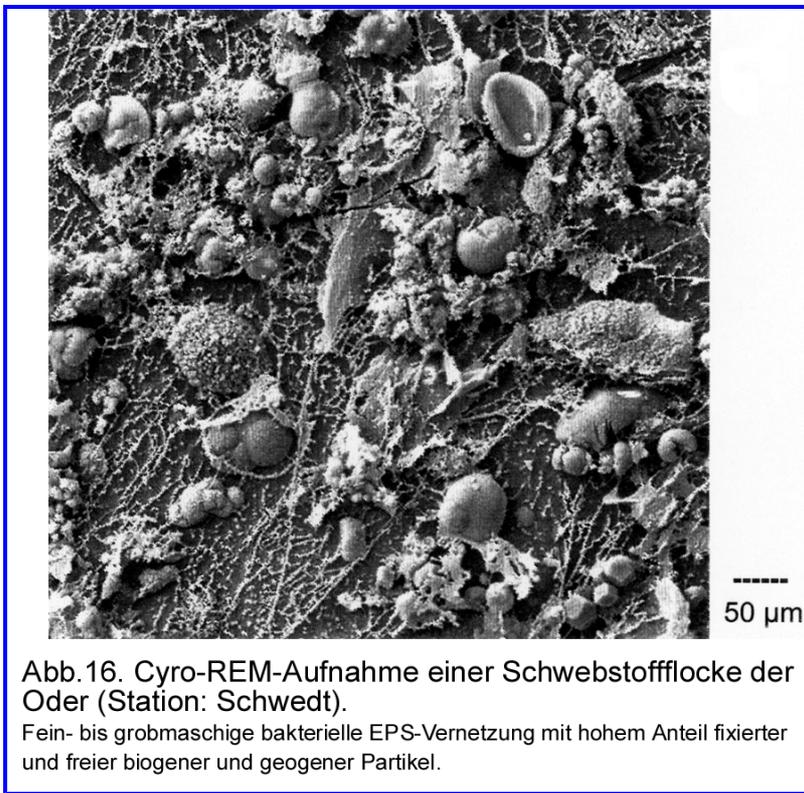


Abb. 16. Cryo-REM-Aufnahme einer Schwebstoffflocke der Oder (Station: Schwedt).
Fein- bis grobmaschige bakterielle EPS-Vernetzung mit hohem Anteil fixierter und freier biogener und geogener Partikel.

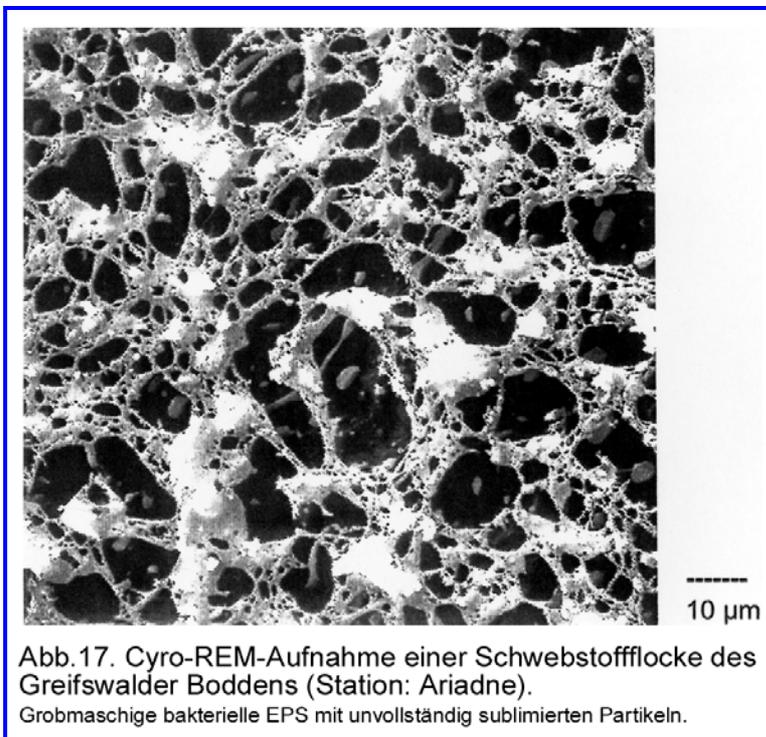


Abb. 17. Cryo-REM-Aufnahme einer Schwebstoffflocke des Greifswalder Boddens.
(Station: Ariadne).Grobmaschige bakterielle EPS mit unvollständig sublimierten Partikeln.

5. Schwermetallakkumulation

In den Schlicksedimenten der Beckenbereiche des Stettiner Haffs und des Greifswalder Boddens ist ein Schwermetallanreicherungshorizont ausgebildet, der die seit Beginn des Industriezeitalters in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts erfolgte Kontamination aquatischer Systeme Mitteleuropas widerspiegelt. Der obere, durchschnittlich etwa 13 cm mächtige Bereich dieses Anreicherungshorizontes weist durch die homogene Verteilung der meisten sedimentologischen und stofflichen Parameter den Charakter einer Durchmischungszone auf. Durch Maxima in der Zirkonium-Verteilung an der Basis dieses Durchmischungshorizontes wird eine Schwermineralanreicherung angezeigt, die mit einer Abnahme des Schluffanteils bzw. einer Kornvergrößerung sowie mit einem Anstieg der Trockenraumdichte der Sedimente korrespondiert (Abb. 18).

Die mehr oder weniger deutliche Ausprägung der Zr-Maxima in allen untersuchten Sedimentkernen aus den Beckenbereichen der Schlicksedimentation des Stettiner Haffs und des Greifswalder Boddens (Abb. 19) spricht dafür, daß die Schwermineralanreicherung im Liegenden der Durchmischungszone mit Kornsortierungseffekten im Zusammenhang steht, die durch Sturmereignisse ausgelöst werden. Im Einzelnen kann die Mächtigkeit des Durchmischungshorizontes aufgrund von Bioturbation sowie durch anthropogene Einwirkung wie z. B. Schifffahrt und Fischerei beträchtlich variieren.

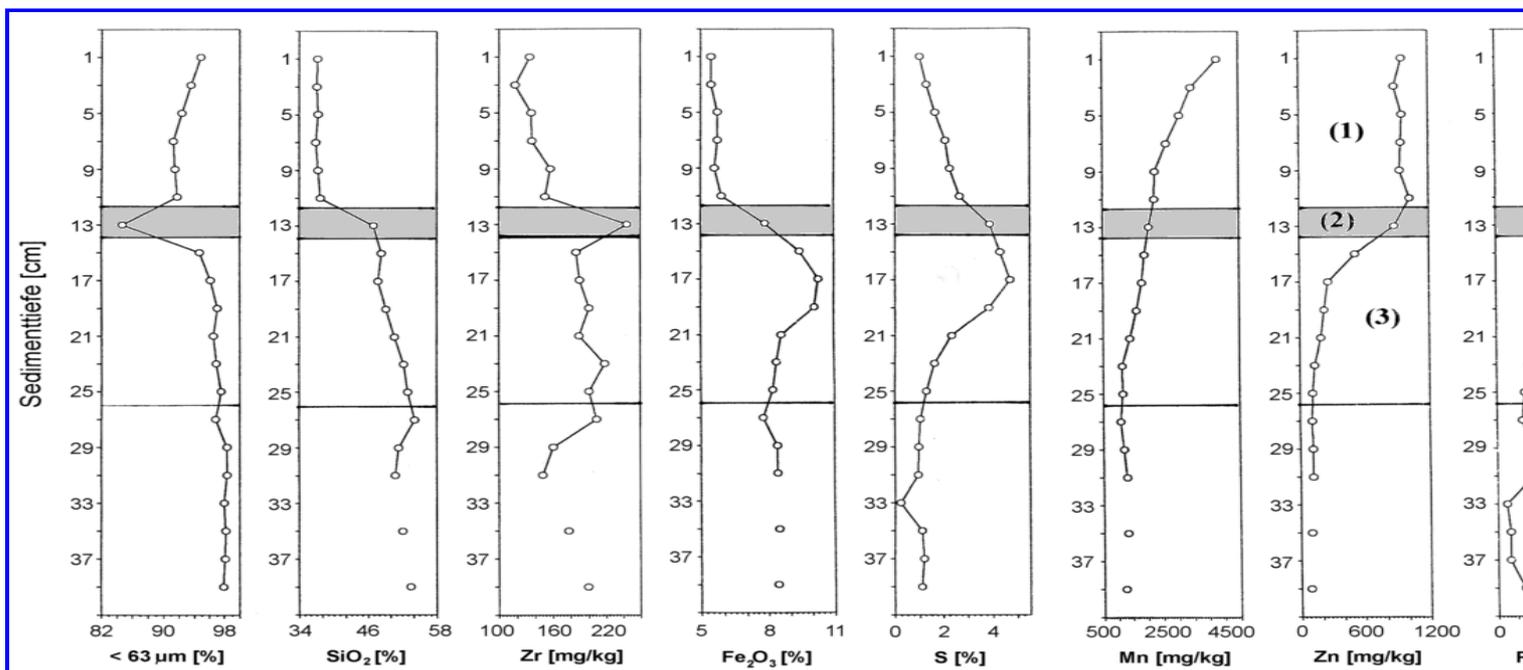


Abb. 18. Verteilung von Haupt- und Spurenelementen im Sedimentkern 18119-3.

Schwermetallanreicherungshorizont : (1) Durchmischungszone; (2) Schwermineral-Anreicherungszone an der Basis der Durchmischungszone; (3) Untere Zone des Schwermetallanreicherungshorizontes, die eine normale tiefenabhängige Veränderung der Schwermetallgehalte mit einer asymptotischen Annäherung an die geochemischen Hintergrundkonzentrationen aufweist.

Anlage: E-W Profil vertikale Zr-Verteilung

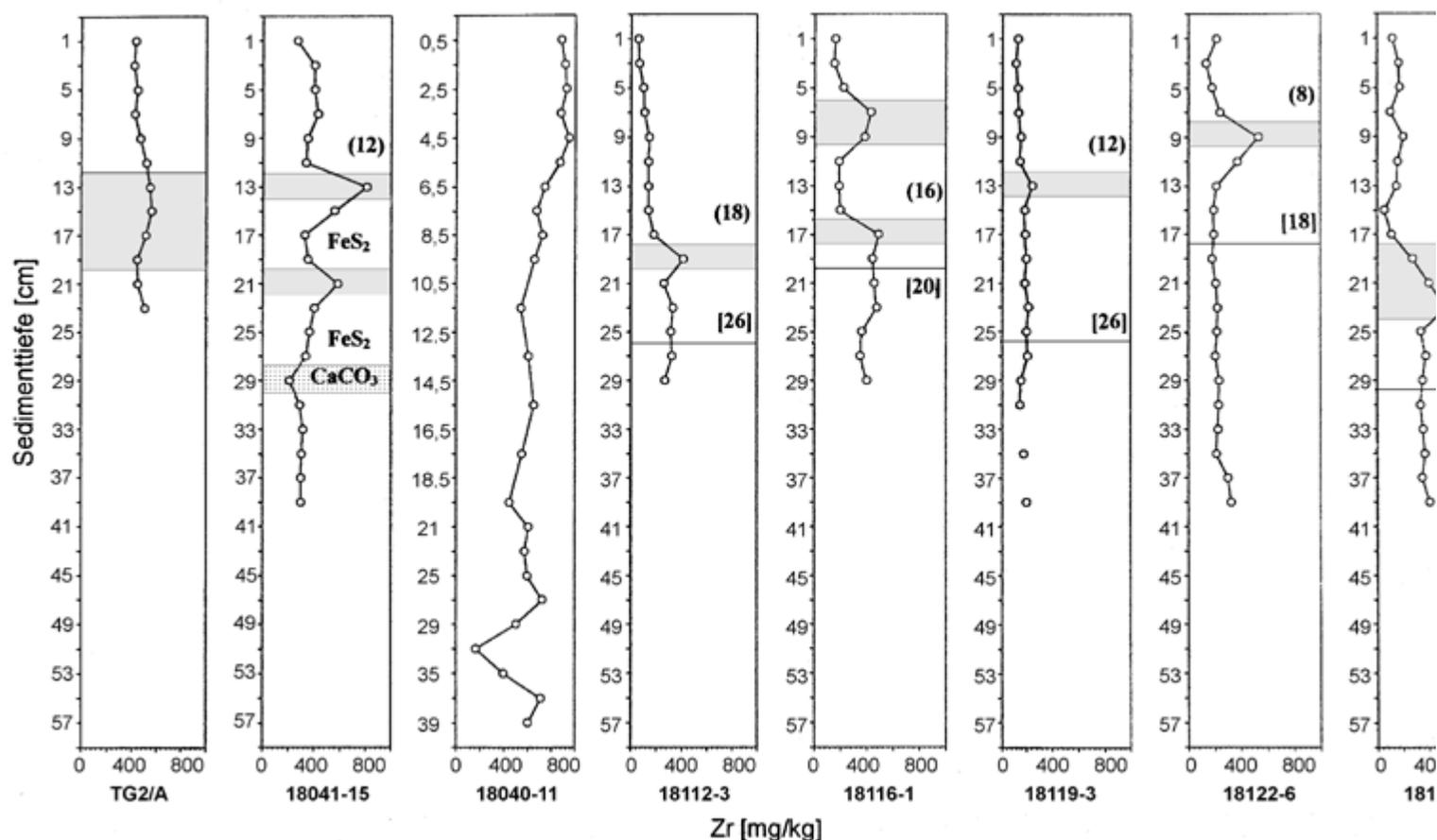


Abb. 19. NW-SE – Profil der Zirkoniumverteilung in subrezentem Sedimenten des Oderästuars.

(xx): Mächtigkeit der Durchmischungszone in cm; [xx]: Gesamtmächtigkeit des Schwermetallanreicherungshorizontes in cm; Farbige gekennzeichnete Zone: Schwermineralanreicherungszone. Der Sedimentkern 18040-11 charakterisiert den strömungs-exponierten Übergangsbereich Greifswalder Bodden/nördlicher Peenestrom, der insgesamt in dem betrachteten Teufenbereich eine Zr-Anreicherung aufweist.

Durch den fehlenden Makrophytenbewuchs, den hohen Schluffanteil und die geringe Trockenraumdicke weisen die Sedimente der Durchmischungszone eine hohe Mobilität auf. Die zeitliche Instabilität der Stoffverteilung drückt sich auch in der Tatsache aus, daß Karbonatlagen an der Basis des Durchmischungshorizontes, die im Rahmen des EU-Projektes "Oder Discharge Environmental Response" (ODER) nachgewiesen wurden (Leipe, pers. Mitt.), durch Untersuchungen im vorliegenden Projekt nicht reproduziert werden konnten. In der Instabilität der Sedimentoberfläche gegenüber Resuspensionsvorgängen drückt sich eine Veränderung des Sedimentationsmilieus durch die zunehmende Eutrophierung der Gewässer in dem betrachteten Zeitraum von 100 Jahren aus.

Nach Untersuchungen von Brand & Shimmiel (1995) ist auch die ^{210}Pb -Aktivität in der Durchmischungszone der Schlicksedimente des Oderästuars weitgehend homogen verteilt, so daß sich auf dieser Grundlage die historische Entwicklung der Schwermetallbelastung nicht rekonstruieren läßt. Es resultieren "scheinbare" lineare Sedimentationsraten von 1 bis 1,5 mm/a bzw. Massenakkumulationsraten von $30 \text{ mg/cm}^2/\text{a}$ für das Stettiner Haff. Hinweise auf Umlagerungsprozesse ergeben auch aus Cs-134- und Cs-137-Untersuchungen aus dem Greifswalder Bodden (Weiss 1990). Das Isotop Cs-134, das vor dem Reaktorunfall in den Schlicksedimenten nicht nachweisbar war, konnte im Juli 1986 bereits in einer Sedimenttiefe von 3 cm und im Juli 1988 in einer Tief von 8 cm bestimmt werden.

Im Vergleich zum Untergrund sind die Oberflächensedimente durch höhere Ca-, P-, TOC- und TIC-Konzentrationen bzw. höhere Anteile biogen-organogener Phasen (z.B. Calcit, Opal und organische Substanz), sowie durch niedrigere

Anteile silikatischer Phasen charakterisiert (Abb. 18). Für einige Elemente, wie z.B. Eisen, Mangan, Schwefel und Phosphor, resultiert eine deutliche Beeinflussung der Elementverteilung durch frühdiagenetische Prozesse. Eisen und Schwefel weisen unterhalb der Basis der Durchmischungszone in einem permanent anaeroben Milieu ein Maximum auf, das auf einer frühdiagenetischen Sulfidbildung beruht. Die weitgehende Korrespondenz der Konzentrationsprofile von Eisen und Schwefel spricht für eine vorwiegend sulfidische Bindung des Eisens. Unterhalb der Eisensulfid-Anreicherungszone gehen die Sulfatkonzentrationen im Porenwasser gegen Null, während die Eisengehalte in der Lösungsphase deutlich ansteigen (Abb. 20). Damit erweist sich die Sulfatkonzentration in den Haffgewässern mit einer geringen Salinität als begrenzender Faktor für den anaeroben Abbau der organischen Substanz sowie der bakteriellen Sulfatreduktion aus.

Unter anaeroben Bedingungen weisen Schwermetalle mit einer sulfidischen Bindungstendenz, wie z.B. Pb, Cd und Hg, (siehe Abschnitt 6.) nur eine geringe Mobilität auf, die sich in der stabilen homogenen Verteilung in der Durchmischungszone ausdrückt. Im Unterschied zu den genannten Elemente zeigt Mangan aufgrund seiner frühdiagenetischen Mobilität auch im Durchmischungshorizont eine teufenabhängige, oberflächennahe Anreicherung auf. Mangan wird frühdiagenetisch unter reduktiven Bedingungen als Mn^{2+} mobilisiert und

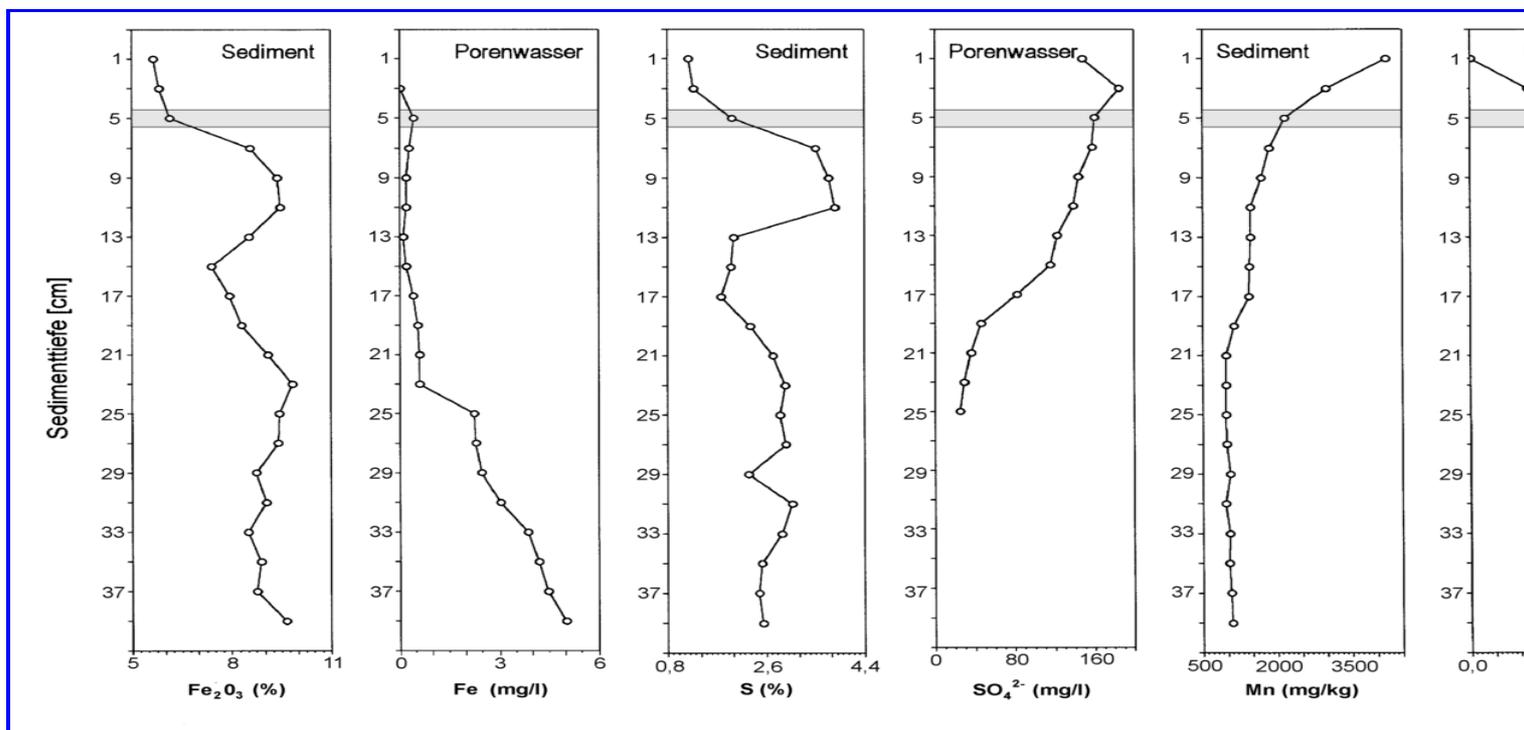


Abb. 20. Sediment- und Porenwasserprofile von Haupt- und Spurenkomponenten des Sedimentkernes 18118-3. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Basis der Durchmischungszone.

oxidativ als Mangan(IV)-Oxidhydrat ausgefällt. Die Mangangehalte der Porenwässer sind daher ein empfindlicher Indikator für den Redoxzustand der Oberflächensedimente. In Abb. 20 weist die Verringerung

der Mn-Gehalte des Porenwassers im oberen ca. 4 bis 4 cm mächtigen Teufenbereich, die mit einer Mn-Anreicherung im Sediment korrespondiert, auf die Ausbildung oxischer bis suboxischer Milieubedingungen in diesem Bereich hin. Nach den Ergebnissen von Porenwasseranalysen anderer Sedimentkerne liegt die Redoxgrenze vielfach an der Grenzfläche Bodenwasser/Sedimentoberfläche. Die frühdiagenetische Mobilität von Phosphor ist mit der des Mangans vergleichbar. Phosphor wird beim Abbau der organischen Substanz freigesetzt und oxidierenden Bedingungen adsorptiv an Eisen(III)-Oxidhydraten gebunden. In den untersuchten Sedimentkernen ist die Phosphorverteilung generell durch eine teufenabhängige oberflächennahe Anreicherung charakterisiert.

In den Oberflächensedimenten des Oderästuars ist mit zunehmender Entfernung von der Odermündung eine Verringerung der Schwermetallbelastung zu verzeichnen, die sich auch in den Schwermetallprofilen der untersuchten Sedimentkerne widerspiegelt (Abb. 21 und 22). Zur Kennzeichnung der Anreicherungstendenz der Schwermetalle

sind die Gehalte "Background"-normiert ausgewertet worden Die Ableitung der Untergrundwerte erfolgte aus den Mittelwerten der Schlufffraktion des Teufenintervalls 30 bis 40 cm von 11 Sedimentkernen aus dem Stettiner Haff und Greifswalder Bodden (Tab. 8). Mit den ermittelten geogenen Untergrundwerten ist im Vergleich zu den globalen Tonschieferdurchschnittswerten nach Turekian & Wedepohl (1961) eine differenziertere Charakterisierung der regionalen Anreicherungstendenz der Schwermetalle möglich. Insbesondere die Werte für Kupfer und Nickel liegen deutlich unter den globalen Durchschnittswerten. In dieser Hinsicht entsprechen die bestimmten Untergrundwerte den im Rahmen des Bund/Länder-Meßprogrammes für feinkörnige Sedimente (< 20 µm) der Nordsee aufgestellten prä-

Tabelle 8. "Background"-Konzentrationen für Schlicksedimente (Fraktion < 63 µm)

	Shale and Clays (Global)	Sediments Recent Freshwater	Sediments Lacustrine	Sediments North Sea < 20 µm	Sediments Rhine	Sediments Elbe River < 63 µm	Sediments Eckernf. Bucht < 20 µm	Sediments Oderrinne < 63 µm	Sediments Stettiner Haff < 63 µm	Sediments Oder Estuary < 63 µm
	(1)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(7)	GOAP
Cd	0,2		0,62	0,3	0,3	0,3 – 0,5	0,4			0,2
Co	19	13	12		16					10
Cr	83	60	84	80	47					59
Cu	45	31	25,8	20	51	20 – 30	25	15	27	21
Hg	0,2		0,098	0,2	0,2	0,2 – 0,4				0,15
Mn	600		760							1220
Ni	68	32	33,7	30	46					28
Pb	20		29,2	25	30	25 – 30	25	20	35	18
Zn	95		59,8	100	115	90 – 110	105	50	100	76
Al										43.100

(1) Turekian & Wedepohl (1961); Handbook of Geochemistry (Wedepohl 1969, 1980) – (2) Entwurf der Länderarbeitsgemeinschaft (LAWA), Düsseldorf, 25. April 1996: entsprechen den im Rahmen des Bund/Länder-Meßprogrammes für feinkörnige Sedimente (< 20 µm) der Nordsee aufgestellten präindustriellen Hintergrundwerten (BLMP 1984). – (3) Förstner (1978) – (4) Förstner & Müller (1974) – (5) Calmano & Förstner (1996) – (6) Irion (1984) – (7) Neumann et al. (1996);

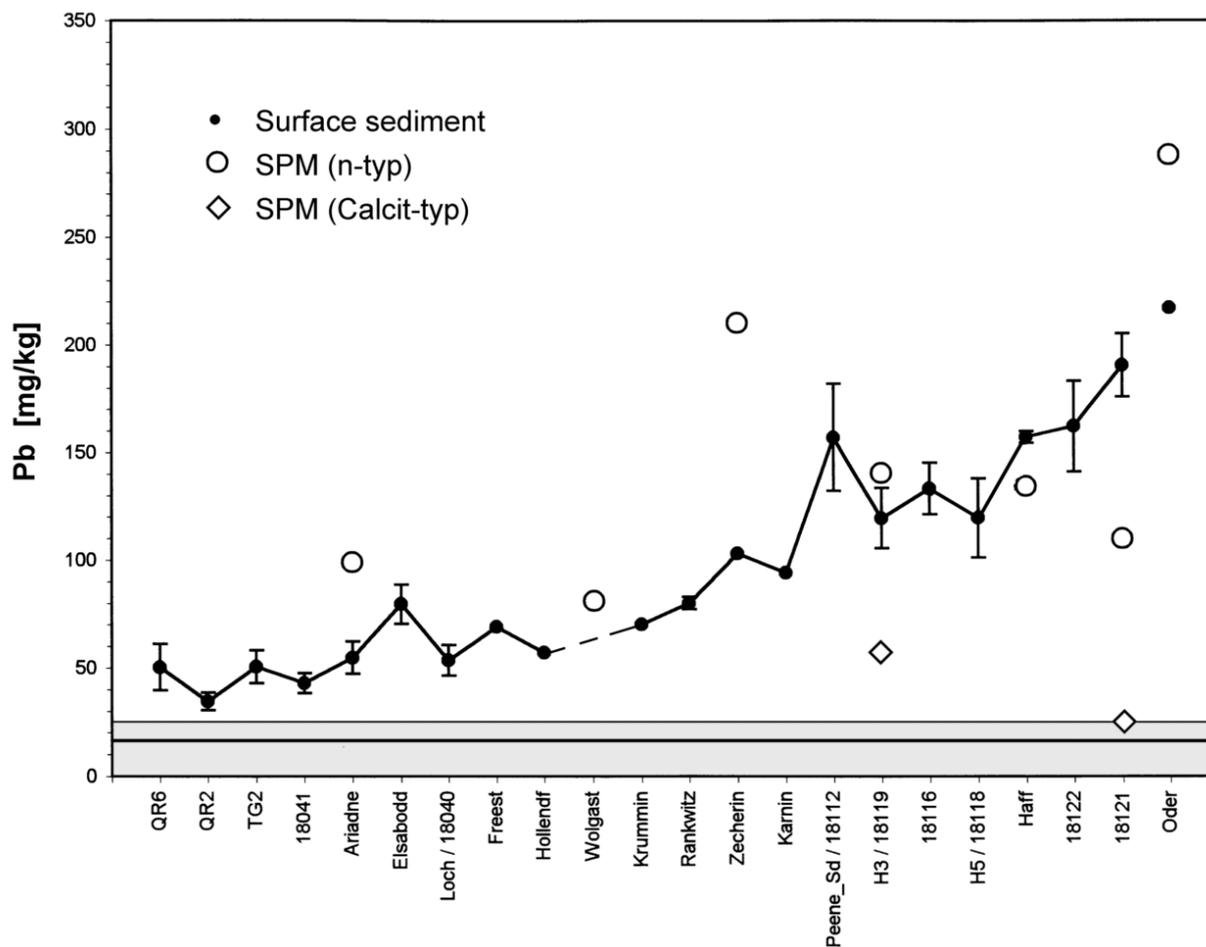


Abb. 21: NW-SE-Profil der Pb-Verteilung in subrecenten Sedimenten des Oderästuars

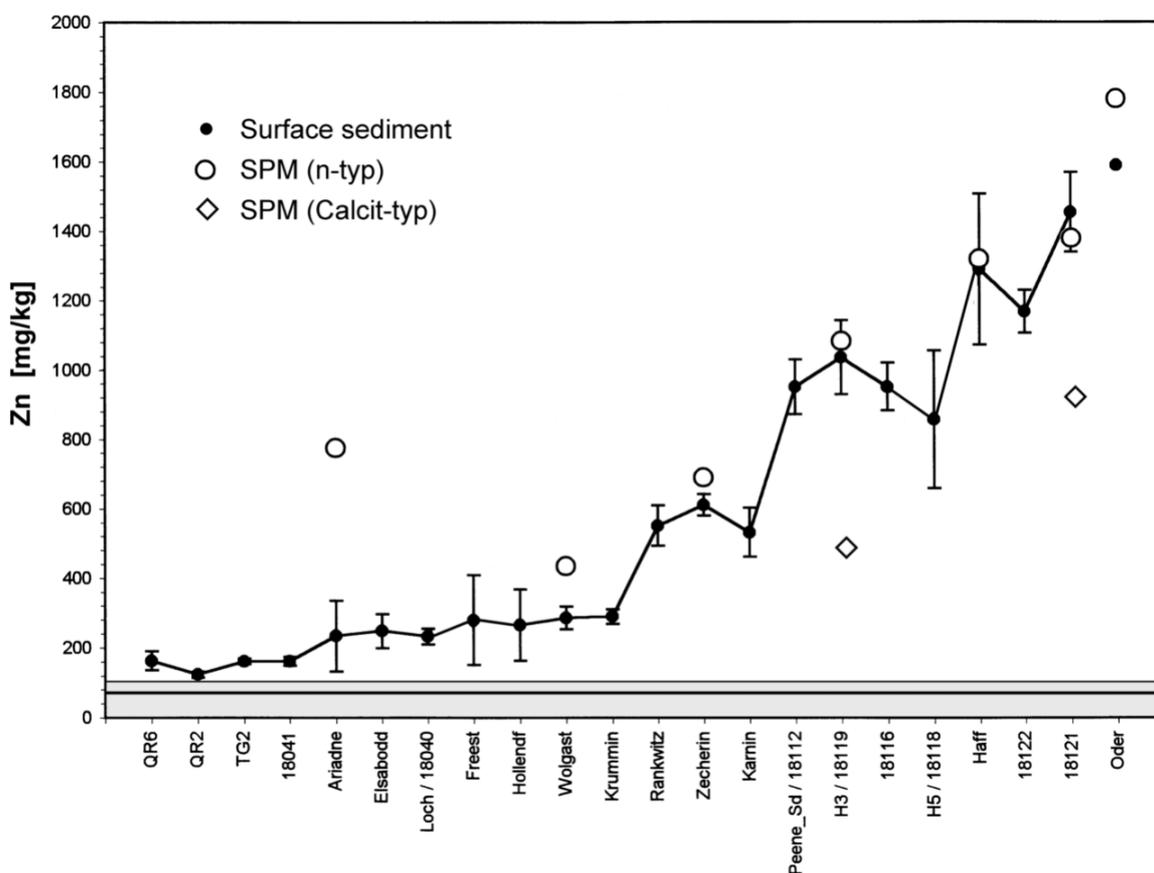


Abb. 22: NW-SE-Profil der Zn-Verteilung in subrecenten Sedimenten des Oderästuars

industriellen Hintergrundwerten. Auf der Grundlage der ermittelten Backgroundwerte wurde die in Tab. 9 zusammengestellten Anreicherungsfaktoren berechnet. Auf eine Al-Normierung der Daten wurde verzichtet, da durch die Verwendung der Kornfraktion < 63 µm Korngrößeneinflüsse auf die Schwermetallgehalte weitgehend unterdrückt werden konnten (siehe Abschnitt 3, S. 4). Nach steigender Anreicherungstendenz geordnet, ergibt sich die Reihenfolge: Co < Ni, Cr < Cu < Hg < Pb < Zn < Cd.

Tabelle 9. Anreicherungsfaktoren von Schwermetalle in der Schlufffraktion von Oberflächensedimenten des Oderästuars

	Greifswalder Bodden Zentralteil	Greifswalder Bodden NE-Teil	Nördlicher Peenestrom	Südlicher Peenestrom	Stettiner HaffW-Teil	Stettiner HaffE-Teil	Stettiner Haff (1)	Oder
Cd	7,5	9,0	9,5	9,0	24	39		
Zn	2,6	3,3	3,7	6,5	14	17	15	21
Pb	3,1	3,3	3,3	4,8	7,5	10	5,7	12
Hg	1,3	2,0	2,0	4,0	5,9	8,7		
Cu	1,4	2,0	2,0	2,3	3,4	5,3	4,5	9,9
Cr	1,3	1,3	1,2	1,1	1,5	2,1		3,4
Ni	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	2,1	2,1	2,7
Co	1,0	0,7	1,0	1,0	1,7	1,7	2,0	3,3

(1) Neumann et al. (1996)

8. Zusammenfassung

Die Schwermetallakkumulation im Oderästuar ist an die Schlicksedimentation der Becken gebunden. Nach den phasenanalytischen Untersuchungsergebnissen sowie nach der Haupt- und Spurenelementcharakteristik können die rezenten Schlicke hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und ihres Gefüges zwei Hauptfaziestypen zugeordnet werden:

Lagunäre Schlickfazies des Stettiner Haffs und des südlichen Peenestroms, die durch eine Dominanz biogen-organogener bzw. authigener Phasen (z.B. Calcit, Opal und Organische Substanz) charakterisiert ist. Detritische silikatische Mineralphasen sind nur mit < 50 % am Stoffbestand der Schlufffraktion beteiligt. Das im Vergleich zu den Schlicksedimenten des Greifswalder Boddens höhere Kaolinit/Dreischichttonmineral-Verhältnis der lagunären Fazies weist auf einen fluviatilen Eintrag aus der Oder hin.

Brackisch-marine Schlickfazies des Greifswalder Boddens, die sich aus der Erosion von pleistozänem Endmoränenmaterial ableitet und einen dominierenden Anteil silikatischer Phasen (Quarz, Feldspäte und Tonminerale) aufweist. Im Unterschied zum Gefüge der lagunären Schlicke, das durch biogen-organogenen Anteile wie Kalkschalen, Opalskelette von Diatomeen und Reste organischer Substanz mit eingebetteten gerundeten und splittrigen Mineralkörner bestimmt wird, liegt in den Oberflächensedimenten des Greifswalder Boddens eine relativ dichte Packung von abgerundeten, splittrig gebrochenen und hypidiomorphen Mineralkörnern vor.

Die für das Oderästuar abgeleiteten Faziesverhältnisse sind prinzipiell auf andere Sedimentationsräume der Boddenküste übertragbar.

Der Schwebstofftransport im Untersuchungsgebiet ist durch die zyklische Aufeinanderfolge der Stadien Sedimentation – frühdiagenetische Transformation – Resuspension - biogene Schwebstoffneubildung charakterisiert. Diese Prozeßabfolge führt insgesamt zu einer Anreicherung organogen-biogener Phasen in der suspendierten partikulären Substanz im Vergleich zur oberflächennahen Sedimenten bzw. zu einer entsprechenden Abreicherung detritisch-silikatischer Phasen. Die enge substantielle Verwandtschaft zwischen Schwebstoffen und Schlicksedimenten resultiert aus windinduzierter Resuspension. In Analogie zu den Tonmineralverhältnissen der Oberflächensedimente ist in den Schwebstoffen des Greifswalder Boddens im Vergleich zu denen des Stettiner Haffs eine relative Anreicherung von Dreischichtsilikaten (vereinfacht unter Muskovit zusammengefaßt) gegenüber Kaolinit-Chlorit festzustellen. In Schwebstoffen des Greifswalder Boddens treten verstärkt quellfähige Tonminerale auf, die als Montmorillonit-Muskovit-Wechselagerungen identifiziert wurden. Die Ca- bzw. Calcit-reiche Schlicksedimente des lagunären Faziesbereiches stehen mit relativ Ca- bzw. Calcit-reichen Schwebstoffen in Wechselwirkung, während die Ca- bzw. Calcit-armen Schlicksedimente der brackisch-marinen Fazies des Greifswalder Boddens mit Ca-armen Schwebstoffen korrespondieren. Mit der biogenen Schwebstoffneubildung in dem nährstoffreichen Milieu des Stettiner Haffs ist ein Verdünnungseffekt verbunden, so daß in den Schwebstoffen des Stettiner Haffs im Vergleich mit denen der Oder deutlich geringere Schwermetallgehalte auftreten.

Der schwebstoffgebundene Schwermetalltransport steht in einer engen Beziehung zum Gefüge der suspendierten partikulären Substanz, die in nährstoffreichen Gewässern durch eine Flockenstruktur charakterisiert wird. In den Schwebstoffflocken sind Partikel durch gerüstartige, dichte bakterielle, sklerotinitische oder diatomitische extrazelluläre Substanzen verbunden. Die organischen Strukturen sind mit ihrem hohen Auftrieb in der Lage spezifisch schwere, detritische Mineralkörner zu transportieren.

In den Schlicksedimenten der Beckenbereiche des Stettiner Haffs und des Greifswalder Boddens ist ein Schwermetallanreicherungshorizont ausgebildet, der die seit Beginn des Industriezeitalters in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts erfolgte Kontamination aquatischer Systeme Mitteleuropas widerspiegelt. Der obere, durchschnittlich etwa 13 cm mächtige Bereich dieses Anreicherungshorizontes weist durch die homogene Verteilung der meisten sedimentologischen und stofflichen Parameter den Charakter einer Durchmischungszone auf. Durch Maxima in der Zirkonium-Verteilung an der Basis dieses Durchmischungshorizontes wird eine Schwermineralanreicherung angezeigt, die mit einer Abnahme des Schluffanteils bzw. einer Kornvergrößerung sowie mit einem Anstieg der Trockenraumdichte der Sedimente korrespondiert. Die mehr oder weniger deutliche Ausprägung der Zr-Maxima in allen untersuchten Sedimentkernen aus den Beckenbereichen der Schlicksedimentation des Stettiner Haffs und des Greifswalder Boddens spricht dafür, daß die Schwermineralanreicherung im Liegenden der Durchmischungszone mit Kornsortierungseffekten im Zusammenhang steht, die durch Sturmereignisse ausgelöst werden. Durch den fehlenden Makrophytenbewuchs, den hohen Schluffanteil und die geringe Trockenraumdichte weisen die Sedimente der Durchmischungszone eine hohe Mobilität auf. In der Instabilität der Sedimentoberfläche gegenüber Resuspensionsvorgängen drückt sich eine Veränderung des Sedimentationsmilieus durch die zunehmende Eutrophierung der Gewässer in dem betrachteten Zeitraum von 100 Jahren aus.

Für einige Elemente, wie z.B. Eisen, Mangan, Schwefel und Phosphor, resultiert eine deutliche Beeinflussung der Elementverteilung durch frühdiagenetische Prozesse. Eisen und Schwefel weisen unterhalb der Basis der Durchmischungszone in einem permanent anaeroben Milieu ein Maximum auf, das auf einer frühdiagenetischen Sulfidbildung beruht. Die weitgehende Korrespondenz der Konzentrationsprofile von Eisen und Schwefel spricht für eine vorwiegend sulfidische Bindung des Eisens. Unterhalb der Eisensulfid-Anreicherungszone gehen die Sulfatkonzentrationen im Porenwasser gegen Null, während die Eisengehalte in der Lösungsphase deutlich ansteigen. Damit erweist sich die Sulfatkonzentration in den Haffgewässern mit einer geringen Salinität als begrenzender Faktor für den anaeroben Abbau der organischen Substanz sowie der bakteriellen Sulfatreduktion aus.

In den Oberflächensedimenten des Oderästuars ist mit zunehmender Entfernung von der Odermündung eine Verringerung der Schwermetallbelastung zu verzeichnen. Zur Kennzeichnung der Anreicherungstendenz der Schwermetalle sind die Gehalte "Background"-normiert ausgewertet worden. Die Ableitung der Untergrundwerte erfolgte aus den Mittelwerten der Schlufffraktion des Teufenintervalls 30 bis 40 cm von 11 Sedimentkernen aus dem Stettiner Haff und Greifswalder Boddens (Tab. 8). Mit den ermittelten geogenen Untergrundwerten ist im Vergleich zu den globalen Tonschieferdurchschnittswerten nach Turekian & Wedepohl (1961) eine differenziertere Charakterisierung der regionalen Anreicherungstendenz der Schwermetalle möglich. Nach steigender Anreicherungstendenz geordnet, ergibt sich die Reihenfolge: **Co < Ni, Cr < Cu < Hg < Pb < Zn < Cd.**

Zur Bewertung der Aufnahmekapazität des Stettiner Haffs für den Schwermetalleintrag aus der Oder wurde das Metallinventar der Anreicherungszone ermittelt. Da die Schwermetallakkumulation im Oderhaff vorrangig an die suspendierte partikuläre Substanz gebunden ist, wurden Akkumulationszeiten für den Schwermetallanreicherungs-horizont unter Zugrundelegung der für die Station Schwedt abgeschätzten partikulären Oderfracht berechnet. Für den Durchmischungshorizont ergeben sich "mittlere Auffüllzeiten" für die Schwermetalle von 16 Jahren. Eine Ausnahme bildet das Quecksilber mit einer scheinbaren Akkumulationszeit von 7 Jahren. Für das Quecksilber spielen möglicherweise diffuse atmosphärische Austräge in Form von Hg⁰ sowie Dimethyl-Hg eine Rolle, die aus Transformationsprozessen im biochemischen Kreislauf resultieren. Aus den Massenbilanzen leitet sich für das Oderästuar nur eine begrenzte Aufnahmekapazität für den Schwermetalleintrag aus der Oder ab. Die Hauptmenge der bisher in das Oderhaff transportierten Schadstoffe muß bereits aus dem System in die Ostsee ausgetragen worden sein.

9. Literatur

Anonym (1896): Der Oderstrom, sein Stromgebiet und seine wichtigsten Nebenflüsse.- Dietrich Reimer-Geographische Verlagsbuchhandlung, Berlin, Band I-III

Bluhm, T.L.; Deslandes, Y.; Marchessault, R.H.; Perez, S. & M. Rinaudo (1982): Solid state and solution conformation of scleroglucan.- Carbohydrate Res. **100**: 117-130.

Brand, T. & Shimmield, G. (1995): Project ODER-Interim Report.- EC ENVIRONMENT PROGRAMME PL-910398. Bruxelles, 1-68

Calmano & Förstner, U. (Eds.) (1996): Sediments and toxic substances: environmental effects and ecotoxicity.- Berlin; Heidelberg; New York: Springer

Chenu, C. & A.M. Jaunet (1992): Cryoscanning Electron Microscopy of Microbial Extracellular Polysaccharides and their Association with Minerals.- Scanning **14**: 360-364.

Cyberska, B.; Lauer, Z. & Trzosinska, A. (Eds.) (1993): Environmental conditions in the polish zone of the southern Baltic Sea during 1992.- Internal report Institute of meteorology and water Management Univ. Gdynia.

Cyberska, B.; Lauer, Z. & Trzosinska, A. (eds.) (1994): Environmental conditions in the polish zone of the southern Baltic Sea during 1993.- Internal report Institute of meteorology and water Management Univ. Gdynia.

Damm, E. (1992): Frühdiagenetische Verteilung von Schwermetallen in Schlicksedimenten der westlichen Ostsee.- Dissertation Univ. Bremen

Eidam, J.; Puff, T.; Lehmann, J. & Fietz, J. (1996): Geochemische Charakterisierung von rezenten Sedimenten im Oder-Ästuar. - Zbl. Geol. Paläont., Teil I, H. 1 / 2, Stuttgart: 63 - 72.

Eisma, D. (1993): Suspended Matter in the Aquatic Environment. - Springer-Verlag Berlin, 315 S.

Fietz, J. (1996): Die Schwebstoffe des Odermündungsgebietes.- Diss. Univ. Greifswald, 139 S., 5 Anl.

Flemming, H.C. (1991): Biofilme und Wassertechnologie. Teil I: Entstehung, Aufbau, Zusammensetzung und Eigenschaften von Biofilmen.- Gas Wasser Fach **132**: 197-207.

Flemming, B. W.; Niedermeyer, R. O.; Scholle, T. & Schiller, H. (1993): Sedimentverteilung. In: Niedermeyer, R. O. (Hrsg.): Holozäne Sedimentationsgeschichte und rezente Sedimentdynamik im Bereich der südlichen Arkonasee und benachbarter Boddengewässer.- Forschungsbericht Ernst-Moritz-Arndt-Univ. Greifswald

Flemming, B. W. & Bartholomä, A. (1994): Verteilung und Herkunft der Sedimente im Greifswalder Bodden.- Greifswalder Geowiss. Beitr. Reihe A **2**: 50

- Förstner & Müller (1974): Schwermetalle in Flüssen und Seen als Ausdruck der Umweltverschmutzung.– Springer, Berlin–Heidelberg–New York. 225 S.
- Förstner, U. (1978): Metallanreicherungen in rezenten See-Sedimenten – geochemischer background und zivilisatorische Einflüsse. In: Mitt. Nationalkomitee der B. R. Deutschland für das Internationale Hydrologische Programm der UNESCO, Vol. 2, Koblenz.
- Gingele, F. X. & Leipe, T. (1997): Clay mineral assemblages in the western Baltic Sea: recent distribution and relation to sedimentary units.– Mar. Geol. **140**: 97-115
- Gregory, J. (1978): Effect of polymers on colloid stability.- in: IVES, K.J.: The scientific basis of flocculation.- Siithoff and Nordhoff, Alphen aan de Rijn, The Netherlands, 89-99.
- Heininger P.; Claus, E.; Pelzer, J. & Tippmann, P. (1997): Schadstoffe in Sedimenten und Schwebstoffen der Elbe und Oder.– Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin
- HELCOM (1993): Second Baltic Sea Pollution Load Compilation.– Balt. Sea Environ. Proc. No. 45. p. 161
- Heybowicz, E. & Rybinsky, J. (1988): Discharge of metals by Vistula and Odra Rivers in 1987.– IAWPCR Conf. Warsaw
- Irion, G. (1984): Schwermetallbelastung in Oberflächensedimenten der westlichen Ostsee.– Naturwiss. **71**: 536-538
- Janke, W. & Kliewe, H. (1990): Genese und Sedimentfolge einiger ausgewählter Boddenn.– Wiss. Z. Ernst–Moritz–Arndt–Univ. Greifswald, Math.-nat.wiss. Reihe, **39**: 7-11
- Kausch, H. (1996): Schwebstoffe und ihre Bedeutung für die Ökologie der Ästuarie.- Proc. 7. Magdeburger Gewässerschutzseminar Budweis 1996, 25-30.
- Kersten, M. & Förstner, U. (1986): Chemical fractionation of heavy metals in anoxic estuarine and coastal sediments.– Wat. Sci. Techn., **18**: 121-130
- Kirchner, H.-E. (1994): Zur Mineralogie und Geochemie von Sedimenten der Oder.- Diplomarbeit Univ. Greifswald, 58 S.
- Koops, H.-P. & L. Karbe (1994): Bakterielle Stoffumsetzungen in der Tide-Elbe.- In: Tätigkeitsbericht des SFB 327, Universität Hamburg, 285-328.
- Lampe, R. & Meyer, H. (1995): Sedimentqualität und hydrographische Bedingungen- ein Vergleich verschiedener Boddengewässer.– BODDEN, **2**:7-26
- Leipe, T.; Brüggemann, 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): Schwermetallverbreitung in holozänen Ostseesedimenten. - Geowissenschaften, **13**: 470 – 478
- Lehmann, j. & Eidam, J.(1994): Bericht Teilthemen "Sedimentologisch-geochemisch-mineralogische Zustandserfassung der Schwebstoffe und Sedimente" und Schwermetallverteilung und -mobilität im Grenzbereich Wasser- /Sedimentkörper" im GOAP-Projekt.- Universität Greifswald, Fachrichtung Geowissenschaften, 100 S.
- Lehmann, J.; Fietz, J.; Eidam, J. & Puff, Th. (1996): Veränderungen der Spurenelementgehalte von Schwebstoffen im Mündungsbereich der Oder.- Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H. 1/2, Stuttgart: 218 – 228.
- Neumann, T.; Leipe, T.; Brand, T. & Shimmield, G. (1996): Accumulation of Heavy Metals in the Oder Estuary and its Off-shore Basins. – Chem. Erde, **56**: 207 – 222; Jena.

- Osadczyk, A.; Lampe, R.; Meyer, H. & Sobieraj, D. (1996): Characteristics of recent sediments from Szczecin Bay.– *Rozpr. Hydrotechn.* **60**: 119-128
- Perillo, G. M. E. (Hrsg.) (1995): *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*.– Elsevier. Amsterdam. 471 S.
- Pohl, C.; Hennings, U. Peterson, I. & Siegel, H. (1996): Trace metal transport and modification between the Oder– and Peene–Rivers and the southern Pommerian Bight.– Poster 2. TRUMP–Statusseminar. Warnemünde
- Protasowicky, M.; Nieciewicky, E.; Ciereszko, W. & Schalitz, G.(1997): The heavy metals and chlororganic substances content in the bottom sediments western and eastern part of the Odra river between Widuchowa and Szczecin.– *Zesz. Nauk. AR Szczec.*, **180**: 63-69
- Puff, Th; Lehmann, J.; Eidam, J. & Fietz, J. (1997): Sedimente und Schwebstoffe der Oder: mineralogische und geochemische Eigenschaften.– *Greifswalder Geowiss. Beitr.* **5**: 167-178, 6 Abb. 5 Taf.
- Rapin, F.; Tessier, A.; Campbell, P. G. C. & Carigan, R. (1986): Potential Artifacts in the Determination of Metal Partitioning in Sediments by a Sequential Extraction Procedure.– *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **20**: 836–840
- Rösel, J., Irion, G. & Niedermeyer, R.-O. (1996): Die jungholozänen Sedimente des Greifswalder Boddens (südliche Ostsee) unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetallgehalte. – *Senckenbergiana maritima*, **27**: (1/2); Frankfurt a. M.
- Salomons, W. & Förstner, U. (1980): Trace metal analysis on polluted sediments, I. Evaluation of environmental impact.– *Environ. Technol. Lett.* **1**: 506-517
- Stodian, I. (1996): *Geochemische Untersuchungen zur Schwermetallverteilung in den Sedimenten der Bodden Rügens*. – Diplomarbeit Universität Greifswald.
- Tessier, A.; Campbell, P. G. C. & Bisson, M. (1979): Sequential extraction procedure for speciation of particulate trace metals.– *Anal. Chem.*, **51**: 844-851
- Turekian, K. & Wedepohl, K. H.(1961): Distribution of the elements in some major units of the earth's crust.– *Bull. Geol. Soc. Am.* **72**: 175-192
- Wallmann, K. (1992): Die Löslichkeit und die Bindungsformen von Spurenmetallen in anaeroben Sedimenten.– *Vom Wasser*, **78**: 1-20
- Wallmann, K.; Kersten, M.; Gruber, J. & Förstner, U. (1993): Artifacts in the determination of trace metal binding forms in anoxic sediments by sequential extraction.– *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, **51**: 187-200
- Wallschläger, D. & Wilken, R. D. (1996): Bewertung des diffusen Austrags von Quecksilber aus kontaminierten Auen in die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Proc. 7. Magdeburger Gewässerschutzseminar Budweis. S. 47-51
- Wedepohl, K. H. (Ed.) (1969, 1980): *Handbook of Geochemistry*.– Springer. Berlin–Heidelberg–New York
- Wehner, K. (1990): Oberflächennahe quartäre Sedimente im Greifswalder Bodden.– *Wiss. Z. Ernst–Moritz–Arndt–Univ. Greifswald. Math.–nat.wiss. Reihe.*, **39**: 12-14
- Weiss, D. (1990): Verteilung und Migration künstlicher Radionuklide in rezenten Sedimenten des Greifswalder Boddens.– *Wiss. Z. Ernst–Moritz–Arndt–Univ. Greifswald, Math.–nat.wiss. Reihe*, **39**: 15-16

Anlage 1.3. Übersicht über die phasenanalytisch untersuchten Proben

(SM = Schwebstoffe, Sed = Sedimente)

Teilgebiet	Lokalität	Probenart	Termin	Teilgebiet	Lokalität	Probenart	Termin
Oder	Ratzdorf	SM	3/1990	Achterwasser	Tonne Z 3	SM	5/1994
	Eisenhüttenstadt	SM	10/1989		Tonne Z 3	SM	3/1995
	Lebus	SM	10/1989		Tonne Z 3	Sedt	5/1994
	Hohenwutzen	SM	10/1989		Tonne Z 3	Sed	3/1995
	Hohenwutzen	SM	3/1990		Tonne Z 3	Sed	3/1995
	Schwedt	SM	10/1989		Tonne Z 3	Sed	5/1994
	Schwedt	SM	1/1992	Peenestrom	Wolgast	SM	3/1994
	Schwedt	SM	7/1992		Wolgast	SM	5/1994
	Schwedt	SM	12/1992		Wolgast	SM	6/1994
	Schwedt	SM	3/1994		Wolgast	SM	11/1994
	Schwedt	SM	5/1994		Wolgast	SM	2/1995
	Schwedt	SM	6/1994	Greifswalder Bodden	Tonne Ariadne	SM/Sed	5/1994
	Schwedt	SM	9/1994		Tonne Ariadne	SM/Sed	6/1994
	Schwedt	SM	11/1994		Tonne Ariadne	SM/Sed	11/1994
	Schwedt	SM	1/1995		Tonne Ariadne	SM	2/1995
Stettiner Haff	Trzebiez	SM	6/1994	Peene	Anklam	SM	3/1994
	Trzebiez	SM	4/1995		Anklam	SM	5/1994
	Tonne Haff	SM	6/1994		Anklam	SM	11/1994
	Tonne Haff	SM	3/1995		Zecheriner Br.	SM	5/1994
	Tonne Haff	SM	5/1995		Zecheriner Br.	SM	6/1994
	Tonne H 4	SM	5/1994		Zecheriner Br.	SM	11/1994
	Tonne H 4	SM	3/1995		Zecheriner Br.	SM	2/1995
	Tonne H 4	SM	4/1995		Zecheriner Br.	SM	4/1995
	Tonne Haff	Sed	3/1995-1		Anklam	SM	2/1995
	Tonne Haff	Sed	3/1995-2	Ücker	Ückermünde	SM	3/1994
	Tonne H 4	Sed	3/1995-1		Ückermünde	SM	5/1994
	Tonne H 4	Sed	3/1995-2		Ückermünde	SM	1/1995

	Tonne H 1	Sed	6/1994	Ryck	Greifswald	SM	2/1994
	Tonne H 5	Sed	6/1994		Greifswald	SM	3/1994
Peene- strom	Zecheriner- Br.	SM	3/1994		Greifswald	SM	4/1994

Anlage 2.2: Analysenwerte der Fraktion < 63 µm von Oberflächensedimenten des Stettiner Haffs.

Konzentrationsangaben der Hauptelemente in Prozent, der Spurenelemente in mg/kg.

	Haff			H5			H3			Peene_Sd			
	03.03.95	05.04.95	14.09.95	25.06.94	05.04.95	14.09.95	25.06.94	03.03.95	05.04.95	14.09.95	25.06.94	06.04.95	14.09.95
SiO2	35,64	34,09	40,21	51,68	40,60	34,41	38,66	38,44	49,78	50,95	37,87	38,36	36,78
TiO2	0,405	0,393	0,420	0,486	0,400	0,343	0,379	0,383	0,488	0,495	0,367	0,400	0,390
Al2O3	7,30	7,06	7,83	7,97	6,71	5,97	6,34	6,34	8,50	8,67	5,82	6,27	6,55
Fe2O3	6,98	6,68	6,99	7,58	6,29	5,60	5,91	5,52	8,05	8,18	5,52	6,47	6,56
MnO	n.b.	0,348	0,346	0,233	0,448	0,249	0,306	0,287	0,303	0,335	0,292	n.b.	0,437
MgO	1,20	1,13	1,11	1,18	1,02	0,916	1,07	1,03	1,16	1,26	1,01	1,00	1,05
CaO	8,95	11,6	9,90	6,02	11,8	15,7	14,3	13,6	4,20	5,37	14,7	12,3	14,0
Na2O	0,45	0,54	0,39	0,71	0,55	0,31	0,46	0,59	0,66	0,59	0,37	0,43	0,43
K2O	1,22	1,23	1,26	1,60	1,30	1,06	1,16	1,28	1,63	1,60	1,01	1,19	1,16
P2O5	1,03	0,507	0,343	0,243	0,664	0,341	0,297	0,367	0,206	0,228	0,310	0,635	0,552
S	1,28	1,75	n.b.	2,50	1,42	n.b.	2,35	1,89	3,61	n.b.	2,52	2,07	n.b.
GV550	29,4	31,9	25,3	19,1	21,9	25,5	21,6	21,8	20,3	21,0	22,5	23,2	24,4

Ba	578	495	560	374	496	376	415	428	410	420	411	469	457
Cd	4,8	10,4	n.b.	1,9	3,2	n.b.	4,1	5,3	3,7	n.b.	4,1	2,9	n.b.
Co	17	16	22	11	13	19	13	13	27	36	13	13	19
Cr	123	113	146	74	87	88	81	89	82	85	89	83	95
Cu	89	90	123	43	58	78	67	66	62	69	68	62	75
Hg	1,2	1,2	2,3	0,4	0,8	1,1	0,8	1,0	1,1	1,3	0,8	0,8	1,1
Mn	n.b.	2700	2680	1760	3470	1930	2310	2220	2350	2590	2190	n.b.	3390
Ni	57	54	78	38	39	61	47	41	35	52	47	42	54
Pb	159	155	n.b.	70	102	n.b.	127	119	150	n.b.	136	116	n.b.
Sr	243	231	194	162	261	262	264	267	135	141	273	252	251
V	66	65	83	56	75	59	47	62	103	77	43	70	60
Zn	1130	1180	1560	389	856	1050	1010	1010	1240	1410	962	953	1070
Zr	50	111	98	265	136	109	162	168	207	196	167	155	144
<63µm [%]	94,7	83,4	98,0	n.b.	n.b.	58,1	n.b.	90,6	92,1	96,5	n.b.	80,7	91,8
63-2000µm [%]	5,3	16,6	2,0	n.b.	n.b.	41,9	n.b.	9,4	7,9	3,5	n.b.	19,3	8,2

	Karnin			Zecherin		Rankwitz			Achterws			Krummin		
	24.06.94	05.04.95	14.09.95	05.04.95	14.09.95	24.06.94	05.04.95	15.09.95	30.05.94	01.03.95	20.09.95	24.06.94)	06.04.95	15.09.95
SiO2	47,09	36,64	37,25	30,26	33,95	35,32	34,74	35,34	41,29	37,48	34,11	37,83	50,26	37,34
TiO2	0,520	0,362	0,414	0,339	0,339	0,334	0,338	0,348	0,347	0,343	0,297	0,398	0,384	0,430
Al2O3	7,51	5,65	6,37	5,27	5,52	5,60	5,63	5,53	5,72	5,59	4,98	6,10	6,25	6,05
Fe2O3	6,23	6,00	6,19	6,10	6,09	5,56	5,31	5,54	5,80	5,30	4,90	4,63	3,77	3,81
MnO	0,325	n.b.	0,426	0,287	0,483	0,337	0,322	0,198	0,109	0,147	0,172	0,112	0,105	0,125
MgO	1,05	0,857	1,04	0,733	0,891	0,90	0,955	0,940	0,90	0,867	0,970	0,929	0,857	0,926
CaO	8,52	10,3	12,4	11,8	12,8	14,5	15,2	15,9	9,56	11,7	15,4	11,5	6,31	11,2
Na2O	0,44	0,42	0,39	0,35	0,39	0,45	0,49	0,60	0,41	0,49	0,42	0,45	0,64	0,48
K2O	1,55	1,15	1,21	1,02	1,11	1,09	1,16	1,12	1,12	1,22	0,99	2,74	1,89	1,26
P2O5	0,602	0,869	0,564	0,647	0,793	0,652	0,560	0,285	0,226	0,288	0,313	0,542	0,409	0,439
S	n.b.	2,10	n.b.	2,55	n.b.	1,99	2,29	n.b.	n.b.	3,39	n.b.	1,64	n.b.	n.b.
GV 550	20,5	30,6	27,5	n.b.	29,8	26,3	26,7	25,3	26,7	26,4	27,9	28,5	n.b.	n.b.

Ba	414	437	390	232	387	324	340	308	224	234	223	266	296	241
Cd	n.b.	2,1	n.b.	2,1	n.b.	2,0	2,1	n.b.	n.b.	1,4	n.b.	1,0	n.b.	n.b.
Co	10	11	15	13	7	9	9	10	6	8	8	10	7	6
Cr	77	74	76	69	66	59	60	69	48	60	52	69	54	60
Cu	40	49	49	60	51	46	49	55	24	38	43	42	40	41
Hg	0,3	0,6	0,8	0,7	0,9	0,4	1,2	0,7	0,2	0,5	0,6	0,4	0,3	0,4
Mn	2440	n.b.	3300	2220	3740	2520	2490	1530	829	1140	1330	838	811	967
Ni	17	40	44	45	44	36	36	43	31	32	41	35	38	40
Pb	n.b.	94,1	n.b.	103	n.b.	82	77,6	n.b.	n.b.	63,0	n.b.	70	n.b.	n.b.
Sr	182	227	232	214	254	270	269	258	185	231	269	239	171	237
V	49	52	65	55	51	25	49	57	39	54	46	53	56	55
Zn	444	580	571	633	588	497	535	620	215	326	364	279	315	273
Zr	470	76	230	87	91	122	163	200	204	238	186	321	196	347
<63µm [%]	n.b.	21,4	6,7	1,5	95,6	n.b.	89,7	93,4	n.b.	61,8	86,1	0,8	1,7	1,0
63-2000µm [%]	n.b.	78,6	93,3	98,5	4,4	n.b.	10,3	6,6	n.b.	38,2	13,9	99,2	98,3	99,0

	Wolgast		Hollendf			Freest			Loch		
	24.06.94	15.09.95	23.06.941)	06.04.95	15.09.95	23.06.941)	27.03.95	15.09.95	22.06.94	27.03.95	21.09.95
SiO2	38,48	41,97	48,76	43,73	52,60	45,83	48,90	52,11	54,66	60,46	66,09
TiO2	0,413	0,348	0,464	0,430	0,683	0,528	0,538	0,543	0,642	0,688	0,802
Al2O3	5,85	6,45	7,01	7,15	7,24	7,71	7,56	6,52	8,50	8,04	7,40
Fe2O3	5,24	4,93	5,02	4,01	5,33	5,41	5,50	4,12	5,55	4,23	4,35
MnO	0,148	0,239	0,096	0,174	0,126	0,141	0,131	0,061	0,158	0,072	0,073
MgO	1,28	0,963	1,16	1,28	1,19	1,47	1,43	0,836	1,50	1,23	1,21
CaO	12,5	6,53	4,71	12,6	3,24	3,99	2,66	3,15	1,59	1,50	1,64
Na2O	0,55	0,69	0,67	0,60	0,67	0,68	0,78	0,58	0,67	0,91	0,91
K2O	1,33	1,68	1,59	1,83	1,79	1,67	1,72	1,54	1,57	1,05	2,08
P2O5	0,513	0,626	0,543	0,324	0,397	0,555	0,479	0,417	0,535	0,397	0,293
S	n.b.	n.b.	1,17	n.b.	n.b.	n.b.	2,37	n.b.	1,02	1,00	n.b.
GV 550	26,5	n.b.	28,0	n.b.	25,4	31,4	29,1	n.b.	14,8	17,6	13,4

Ba	253	256	278	227	261	265	272	248	328	349	354
Cd	n.b.	n.b.	2,1	n.b.	n.b.	n.b.	1,9	n.b.	2,0	1,5	n.b.
Co	7	10	8	8	9	13	11	5	9	8	13
Cr	59	67	64	55	85	74	76	64	84	84	82
Cu	40	52	40	33	41	52	50	51	35	36	30
Hg	0,3	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
Mn	1100	1850	725	1350	978	1070	1020	473	1190	557	567
Ni	28	37	32	28	38	43	38	35	31	28	31
Pb	n.b.	n.b.	57	n.b.	n.b.	n.b.	69	n.b.	n.b.	54	n.b.
Sr	252	176	137	311	460	138	116	109	127	119	225
V	59	71	47	66	73	61	73	62	72	71	64
Zn	262	309	384	164	247	268	345	248	288	245	211
Zr	369	264	398	206	5000	449	422	677	534	773	1220
<63µm [%]	n.b.	0,7	n.b.	0,5	2,6	1,0	18,9	0,6	n.b.	4,9	21,6
63-2000µm [%]	n.b.	99,3	n.b.	99,5	97,4	99,0	81,1	99,4	n.b.	95,1	78,4

	Elsabodd			Ariadne				TG 2	
	22.06.94	27.03.95	21.09.95	02.06.94	22.06.94	27.03.95	21.09.95	22.06.94	27.03.95
SiO2	53,92	55,76	66,74	70,40	65,45	64,60	67,97	63,40	68,68
TiO2	0,726	0,922	1,21	0,595	0,636	0,661	0,597	0,603	0,597
Al2O3	8,70	9,71	7,80	8,46	8,77	9,24	8,31	8,67	8,64
Fe2O3	5,26	5,77	4,32	4,15	4,55	4,95	4,05	4,25	3,51
MnO	0,054	0,070	0,102	0,054	0,091	0,117	0,048	0,068	0,044
MgO	1,46	1,42	1,21	1,14	1,37	1,36	1,19	1,47	1,09
CaO	5,47	2,23	1,84	1,34	1,24	1,41	1,42	1,24	1,18
Na2O	0,84	0,86	0,93	1,06	1,15	1,07	1,13	1,16	1,11
K2O	2,15	2,35	2,18	2,39	2,31	2,45	2,40	2,39	2,44
P2O5	0,244	0,284	0,299	0,151	0,255	0,375	0,191	0,358	0,228
S	1,75	2,07	n.b.	1,55	0,84	0,960	n.b.	1,13	0,823
GV 550	16,6	18,4	12,6	12,7	13,9	15,8	11,5	15,7	11,9

Ba	319	360	354	375	363	379	530	397	492
Cd	1,7	2,0	n.b.	1,2	1,3	1,5	n.b.	1,3	1,0
Co	11	15	19	8	9	10	8	9	8
Cr	89	106	122	59	68	70	69,8	68	64
Cu	40	46	27	23	30	28	28	27	24
Hg	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
Mn	413	540	788	410	686	904	374	517	342
Ni	35	42	30	21	28	28	26	27	23
Pb	73	86	n.b.	56	62	46	n.b.	56	45
Sr	241	147	127	112	111	122	122	114	116
V	61	103	78	58	57	73	67	42	59
Zn	241	303	198	157	188	178	412	167	155
Zr	921	1898	2770	374	399	394	432	351	391
<63µm [%]	n.b.	5,9	12,2	n.b.	n.b.	80,5	87,5	n.b.	86,0
63-2000µm [%]	n.b.	94,1	87,8	n.b.	n.b.	19,5	12,5	n.b.	14,0

