

TAN

Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. 19: 1 - 20 (1981)

Aus dem Institut für Meeresforschung Bremerhaven

Blei und Cadmium im Weser-Ästuar und der Deutschen Bucht: Beziehungen zwischen Bakterienpopulationen, Schwermetallen und organischem Kohlenstoff

Tjhing Lok Tan und Detlef Thormann

Abstract: Lead and cadmium in the Weser Estuary and the German Bight: Correlations between bacteria populations, heavy metals and organic carbon. Organic carbon, lead and cadmium contents of 20 sediments were determined and compared with the colony counts of anaerobic heterotrophic, anaerobic nitrogen fixing, chitinoclastic and cellulolytic bacteria. Organic carbon content, which is dependent on the sediment type, was positively correlated with lead and cadmium as well as with colony counts of all 4 physiological groups of bacteria. Even the sediments with the highest concentrations of 251.7 ppm Pb and 3.1 ppm Cd showed no reduction in their colony counts.

From 2 different sediment samples with lead contents of 140 ppm and 21 ppm lead tolerance of the aerobic heterotrophic bacteria was investigated. However, no significant difference in lead tolerance of the 2 heterotrophic populations was found. Water from 6 stations was analysed for dissolved and particulate organic carbon, lead and cadmium. Dissolved lead concentrations were in the range of 0.2-0.5 $\mu\text{g/l}$ and the particulate lead contents were between 0.05 and 4.3 $\mu\text{g/l}$. The concentrations of total lead for the stations off-shore were only one order of magnitude from the concentrations of the near-shore stations. The same phenomenon was observed for dissolved cadmium (0.02 - 0.25 $\mu\text{g/l}$) and

Eingegangen am 20.9.1980

Anschrift der Verfasser: Dr. Tjhing Lok Tan und Dr. Detlef Thormann, Institut für Meeresforschung, Am Handelshafen 12, D-2850 Bremerhaven, Bundesrepublik Deutschland.

Frau V. Becker, Frau C. Reineke und Frau S. Spahić danken wir für die sorgfältige Assistenz und Frau M. Walter für die Durchführung der Korngrößenanalysen.

Die Untersuchungen wurden durch eine Sachbeihilfe der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

particulate cadmium (0.003 - 0.15 $\mu\text{g/l}$) concentrations. Correlations between dissolved (1.6 - 10.8 mg/l) and particulate organic carbon (0.25 - 1.53 mg/l) with dissolved and particulate lead or cadmium were not found.

Einleitung

Mit zunehmender Erkenntnis der teilweise starken Umweltbelastung durch verschiedene Schwermetalle häufen sich auch die Untersuchungen über deren mögliche toxische Auswirkungen auf das Ökosystem. Angesichts der besonderen Bedeutung, die Bakterien bei der Mineralisation organischen Materials und bei der Remobilisierung verschiedener Schwermetalle zukommt, befaßt sich eine Vielzahl von Arbeiten mit dieser Organismengruppe. Dabei wurden für verschiedene Schwermetalle die Grenzkonzentrationen ermittelt, die das Wachstum einzelner Bakterienarten oder ganzer Bakterienpopulationen hemmen, bzw. deren Stoffwechselaktivität herabsetzen. Es stellte sich heraus, daß bei den Bakterien gegenüber Blei und Cadmium ein sehr breites Toleranzspektrum besteht (Thormann 1975, Mills und Colwell 1977, Azam et al. 1977, Thormann und Weyland 1979, Tan 1980). Thormann (1975) ermittelte, daß unter Anwendung bestimmter Kulturbedingungen das Wachstum einzelner Bakterienarten — isoliert aus dem Weser-Ästuar — bereits ab 0,1 ppm Cadmium bzw. Blei gehemmt wird.

Andererseits lagern sich gerade im Sediment der Ästuarrien große Mengen von Giftstoffen verschiedener Herkunft ab (Gauthier 1973). Dieses gilt ebenfalls für die Schwermetalle (u.a. Förstner und Müller 1974, Little-Gadow und Schäfer 1974, Taylor 1974, Pita und Hyne 1975). Auch für den Bereich des Weser-Ästuars (Tan 1976) und der südlichen Nordsee (Gadow und Schäfer 1973, Förstner und Reineck 1974, Dörjes et al. 1976) läßt sich aufgrund der Verteilungsmuster der Schwermetalle in Oberflächensedimenten und Profilkernen eine zunehmende Verschmutzung nachweisen.

In der vorliegenden Arbeit wird daher der Frage nachgegangen, ob durch die vorhandenen Konzentrationen an Blei und Cadmium im Sediment des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht die Bakterien verschiedener physiologischer Gruppen bereits in ihrer Anzahl reduziert werden, oder ob es durch Selektion zu Anpassungserscheinungen kommt; denn neben der Kenntnis der Konzentration eines Schwermetalls in einer Sediment- oder Wasserprobe ist die „biologische Verfügbarkeit“ des Metalls von entscheidender Bedeutung.

Die Bestimmung der partikulären und gelösten Cd- und Pb-Gehalte im Wasser des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht soll darüber Auskunft geben, welchen Schwermetallkonzentrationen die Bakterien in der Wasserphase ausgesetzt sind.

Material und Methoden

Probenentnahme und Standortcharakterisierung

Die Sedimentproben wurden am 3. und 4. Juli 1975 bzw. am 19. Januar 1976 von Bord des Forschungsschiffes „Victor Hensen“ mittels eines Veen-Bodengreifers genommen. Die Positionen der einzelnen Stationen sind in Abb. 1 und 2 dargestellt. Für die mikrobiologischen Un-

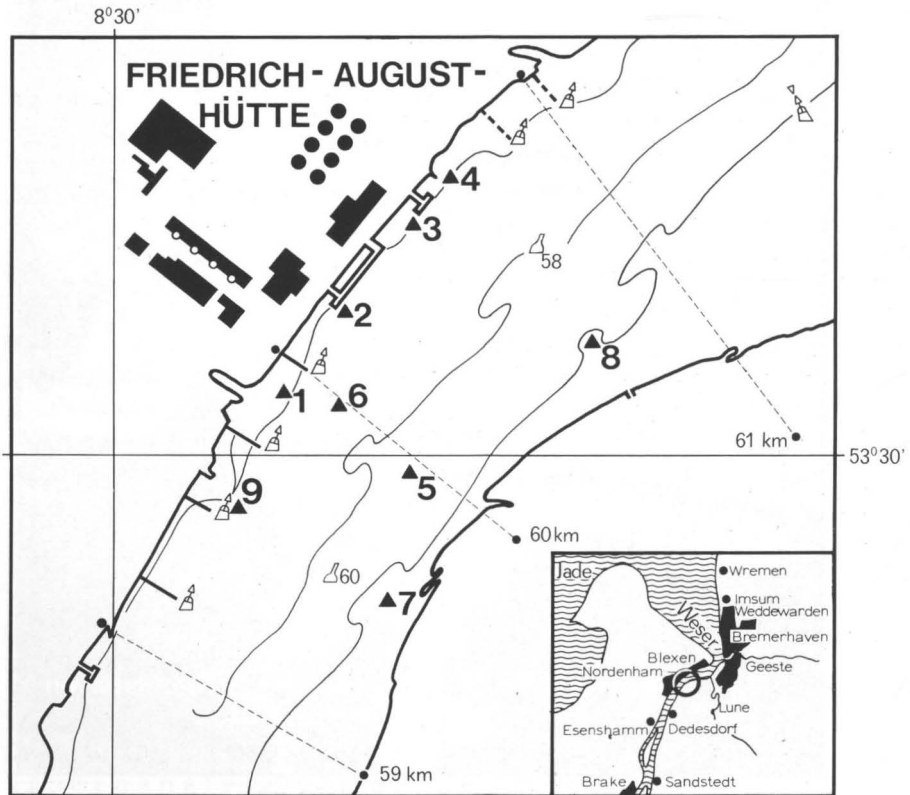


Abb. 1: Positionen der Probestellen zur Entnahme von Sediment- bzw. Wasserproben im Bereich der Friedrich-August-Hütte.

tersuchungen wurden von der Sedimentoberfläche Proben entnommen, in sterile 250 ml Weithalsflaschen gefüllt und bis zur Verarbeitung bei -20°C aufbewahrt. Zur Trockengewichtsbestimmung des Sediments wurden jeweils Parallelproben 3 Tage bei 60°C getrocknet. Für die Schwermetallanalysen wurden Teile der obersten Sedimentschicht (1 - 2 cm) in einer 25 ml-Wägedose aus Polypropylen abgefüllt und getrocknet. Für die Korngrößenanalyse wurde Sediment aus 1 - 10 cm Schichttiefe verwendet.

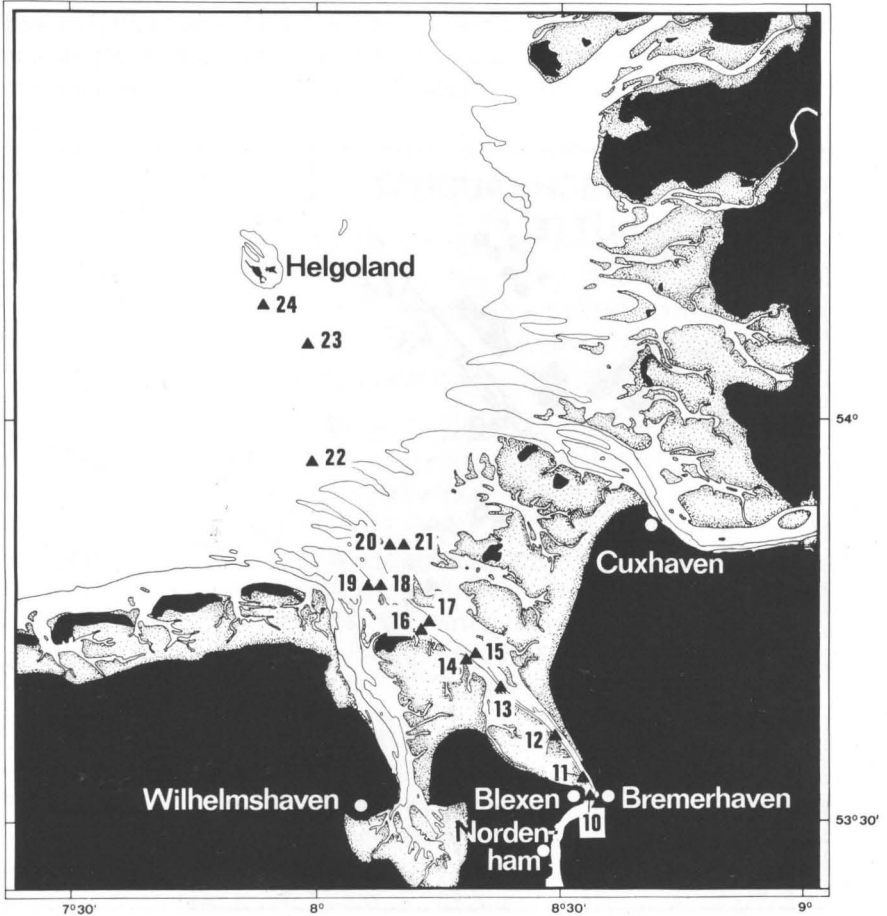


Abb. 2: Positionen der Probestellen zur Entnahme von Sediment- bzw. Wasserproben im Weser-Ästuar und der Deutschen Bucht.

Die Wasserproben wurden am 3. und 4. Juli 1975 (Station 6 in Abb. 1 und Station 11, 12, 16 in Abb. 2) sowie am 28. Juli 1975 (Station 22 und 23; Abb. 2) aus 1 m Tiefe entnommen. Die Probenahme erfolgte von einem Schlauchboot aus in 100-200 m Entfernung vom Forschungsschiff. Pro Station wurden jeweils zwei 5-l-Proben unter genauester Einhaltung von Vorsichtsmaßnahmen gegen eventuelle Schwermetallkontaminationen genommen (siehe Tan 1976). Die Abtrennung der partikulären Substanz mittels Zentrifugation und Membranfiltration bei den Proben mit hohem Sestongehalt und die Abtrennung allein durch Filtration bei den Proben mit geringem Sestongehalt erfolgte nach Tan (1976).

Blei- und Cadmium-Analysen

Die Anreicherung der Schwermetalle Cadmium und Blei aus den filtrierten Wasserproben bei gleichzeitiger Entfernung der Alkali-Erdalkali-Ionen wurde mit Chelex-100 säulenchromatographisch durchgeführt. Die Säureaufschlüsse der Gesamtfraktion des Sediments und der Sestonproben erfolgten in PTFE-Autoklaven. Die Pb- und Cd-Konzentrationen wurden bestimmt durch flammenlose Atom-Absorptions-Spektroskopie (Perkin-Elmer Modell 300 mit HGA 72 und D₂-Untergrundkompensator). Zur ausführlichen Beschreibung der Vorbehandlung und Analyse der Proben siehe Tan (1976).

Organische Kohlenstoff-Analysen

Die Bestimmung des gelösten und partikulär gebundenen organischen Kohlenstoffs im Seewasser erfolgte nach der Methode von Menzel und Vaccaro (1964). Davon abweichend wurden für die Filtration des Seewassers Nucleopore-Filter aus Polycarbonat mit einem Porendurchmesser von 0,4 μm verwendet. Der Rückstand auf dem Filter wurde getrocknet, gewogen und anschließend mit bidestilliertem Wasser abgeschwemmt. Nach erneuter Trocknung erfolgte die Bestimmung des partikulären organischen Kohlenstoffs wie bei den Sedimentproben, die nach der von Ernst (1975) beschriebenen Methode durchgeführt wurde. Zur Messung des Kohlendioxidgehaltes wurde ein Infrarot-Analysator Modell IR 215 (Beckman Instruments) verwendet.

Gewinnung des Porenwassers und Korngrößenanalyse der Sedimentproben

Die Gewinnung des Porenwassers erfolgte durch Zentrifugieren und gleichzeitigem Filtrieren (0,2 μm Sartorius-Membranfilter) der Probe

in einem Spezialzentrifugenbecher bei 5000 U.p.m. für 30 Minuten (Christ-Zentrifuge, Universal Junior II).

Zur Charakterisierung der Sedimente wurde die von Lüneburg (1972) beschriebene Methode angewendet. Außer dem Medianwert (Md) wurden Sortierung (So) und Schiefe (Sk) berechnet (Parameter nach Trask, siehe Füchtbauer und Müller, Seite 47, 1970).

Bestimmung des pH-Wertes, E_H -Wertes und der Salinität

Direkt nach der Entnahme wurde der pH-Wert (Portamess der Fa. Knick) und der E_H -Wert (Beckman Instruments, Modell N) der Proben gemessen. Die Salinität wurde bestimmt als Chlorid nach der Mohrschen Methode, DEV (1960) und umgerechnet auf Salinität nach Dietrich und Kalle (1965).

Bestimmung der Koloniezahlen

Die bei -20°C eingefrorenen Sedimentproben wurden über Nacht bei 4°C aufgetaut und anschließend 30 Minuten bei Zimmertemperatur belassen. Angaben über die Kulturverfahren und verwendeten Nährmedien zur Erfassung der Koloniezahlen anaerob heterotroph, anaerob stickstofffixierender, chitinzersetzender und zellulosezersetzender Bakterien sind der Arbeit von Tan (1980) zu entnehmen.

Für die vergleichende Untersuchung der Blei-Toleranz der aeroben heterotrophen Bakterienflora wurden nach der analytischen Bestimmung der Pb-Gehalte der Sedimente jeweils Teile eines Sediments mit hohem und eines mit sehr geringem Bleigehalt für die mikrobiologische Untersuchung verwendet. Jeweils 10 cm^3 der aufgetauten Sedimente wurden zu 90 ml Verdünnungsmedium gegeben mit der Zusammensetzung: 0,85 % NaCl; 0,15 % Agar (Difco) und 0,05 % Tween 80 (gelöst in destilliertem Wasser). Mehrere Verdünnungsstufen jeder Probe wurden auf einem Nährmedium mit 0,5 g Pepton (Difco); 0,1 g Hefeextrakt (Difco); 0,01 g $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 12 g Agar (Merck) in 1000 ml synthetischem Seewasser (nach Burkholder 1963) mit einer Salinität von 10 ‰ (pH 7,5) ausgespatelt. Die Medien enthielten 21 verschiedene (0-1000 ppm Pb) Bleikonzentrationen (Pb als $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ zugegeben). Bei den hohen Pb-Konzentrationen wurde zusätzlich das Plattengußverfahren angewendet, um mit größerem Probevolumen von 1 ml beimpfen zu können. Zur ausreichenden Absicherung der Auswertung wurde mit 5 Parallelen pro Verdünnungsstufe gearbeitet.

Ergebnisse

Beziehungen zwischen der Anzahl der Sedi-
mentbakterien und dem Gehalt an organi-
schem Kohlenstoff, Blei und Cadmium

Insgesamt wurden 20 Sedimentproben aus dem Weser-Ästuar und der Deutschen Bucht bis zur Insel Helgoland (Abb. 1 und 2) untersucht. Zur Charakterisierung der Sedimente wurden Korngrößenanalysen durchgeführt und einige physikalische und chemische Parameter des Standortes erfaßt (siehe Tabelle 1). Anhand der Salinität des Porenwassers können die Anteile des Meerwassers und des Flußwassers zur Zeit der Probeentnahme gut abgeschätzt werden. Die Salinität umfaßt einen weiten Bereich von 6,88 ‰ (Station 2) bis 35,07 ‰ (Station 23). Die Korngrößenanalyse zeigt die zum Teil sehr unterschiedliche Sedimentbeschaffenheit der einzelnen Proben auf. Eine negative Korrelation besteht zwischen der mittleren Korngröße (Medianwert) und dem organischen Kohlenstoffgehalt (Tabelle 2).

Die Koloniezahlen der verschiedenen physiologischen Bakteriengruppen sowie die Ergebnisse der organischen Kohlenstoff-, Blei- und Cadmiumbestimmungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 1: Charakterisierung der Sedimente aus dem Weser-Ästuar und der Deutschen Bucht.

Station		Wasser- tiefe (m)	Tempe- ratur (°C)	Porenwasser- salinität (‰)	Korngrößenanalyse			Sedimentart
Nr.	Ort				Median Md (mm)	Sortierung So	Schiefen Sk	
2		14	18,5	6,88	0,018	1,886	0,889	Mittelsilt
4	} siehe Abb.1	17,5	18,5	9,16	0,015	1,732	0,853	Feinsilt
5		13	18,9	7,67	0,690	1,354	0,889	Grobsand
6		15,5	19,0	10,99	0,022	1,949	0,785	Mittelsilt
9		15,5	19,5	7,52	0,530	1,667	0,720	Grobsand
10	Tonne 61	12	18,5	10,17	0,480	1,312	0,969	Mittelsand
11	Tonne 57	9	18,9	11,94	0,340	1,307	0,851	Mittelsand
12	Tonne 49	13,5	17,5	18,26	0,175	1,189	0,971	Feinsand
13	Tonne 38	15	17,5	22,40	0,130	1,297	0,957	Feinsand
14	Tonne 29	14,5	16,5	25,79	0,220	1,722	0,853	Feinsand
15	Tonne 30	16,5	17,0	27,39	0,640	1,562	1,001	Grobsand
16	Tonne 21	15	16,0	28,15	0,150	1,225	0,960	Feinsand
17	Tonne 22	15,5	16,0	28,77	0,160	1,275	0,914	Feinsand
18	östl. Tonne 15	23,5	15,1	30,20	0,220	1,306	1,018	Feinsand
19	westl. Tonne 15	19,3	15,0	27,69	0,170	1,150	1,099	Feinsand
20	1 sm östl. Tonne A/12	10,5	15,8	29,59	0,200	1,176	0,999	Feinsand
21	2 sm östl. Tonne A/12							
22	Nordergründe	8,5	16,0	29,54	0,145	1,309	0,899	Feinsand
23	54°06'N; 7°59'E	24,5	12,0	33,21	0,100	1,394	1,008	Feinstsand
24	Tonne Helgoland	37	11,0	35,07	0,023	2,000	0,756	Mittelsilt
		55	12,0	33,15	0,250	2,887	3,000	Mittelsand

Die höchsten Koloniezahlen wurden für die anaerob heterotrophen Bakterien ermittelt (Ausnahme Station 20 und 24), gefolgt von den Stickstofffixierern. Die Chitin- und Zellulosezerersetzer sind im Durchschnitt zahlenmäßig etwa gleich stark vertreten. Ab Station 17 (ausgenommen Station 19) ist der prozentuale Anteil der Chitin- und Zellulosezerersetzer im Vergleich zu den Anaerob-Heterotrophen deutlich höher als bei den küstennaheren Stationen. Die hohen Koloniezahlen der anaerob heterotrophen Bakterien in den Sedimentproben aus dem Bereich der Friedrich-August-Hütte (Station 2, 4, 6 und 9) sind gekoppelt mit niedrigen Redoxpotential-Werten und hohen organischen Kohlenstoffgehalten. Die Bleigehalte in den Sedimentproben sind im Bereich der Friedrich-August-Hütte (Station 2, 4, 6 und 9) im Vergleich zu dem niedrigsten Wert bei Station 15 um das 16 bis 40fache erhöht, und auch die Cadmiumgehalte erreichen das 4 bis 8fache des niedrigsten Wertes (Station 19).

Zur Feststellung der Beziehungen zwischen den Koloniezahlen der verschiedenen physiologischen Bakteriengruppen und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, Cadmium und Blei in den Sedimentproben wurden die Korrelationskoeffizienten für die verschiedenen Variablen

Tab. 2: Gehalt an organischem Kohlenstoff, Blei und Cadmium, sowie Koloniezahlen physiologischer Bakteriengruppen in Sedimenten des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht.

Station Nr.	pH	E _h (mV)	Org.C (%)	Pb (ppm)	Cd (ppm)	Koloniezahl pro g Trockensediment			
						Anaerob- Heterotrophe	Stickstoff- fixierer	Chitin- zerersetzer	Zellulose- zerersetzer
2	6,9	+ 70	2,56	192,3	2,9	1 337 666	373 449	69 626	40 791
4	6,9	+ 22	4,04	251,7	3,1	3 423 889	576 729	73 390	170 633
5	7,4	+ 466	0,04	9,9	0,4	242 354	55 239	5 780	3 036
6	7,3	+ 88	2,75	152,6	3,1	10 982 510	2 456 276	86 420	59 156
9	7,5	+ 117	1,43	100,8	1,6	2 714 454	266 157	32 902	24 089
10	7,4	+ 437	0,03	9,3	1,4	321 700	77 785	5 849	244
11	7,3	+ 460	0,32	15,0	0,9	6 475	6 273	190	334
12	7,4	+ 467	0,69	45,0	0,9	93 886	18 195	6 878	5 277
13	7,2	+ 485	0,13	12,5	0,6	6 772	3 251	264	149
14	7,4	+ 102	0,26	35,0	0,8	13 389	3 425	1 483	2 833
15	7,7	+ 485	0,06	6,2	0,6	18 392	2 069	400	464
16	7,3	+ 396	0,03	13,1	0,9	197 428	14 336	1 802	1 004
17	7,7	+ 438	0,05	11,0	0,7	24 336	12 227	4 629	4 205
18	7,3	+ 468	0,03	15,0	0,5	32 096	14 308	10 015	6 922
19	7,6	+ 438	0,04	16,2	0,4	13 625	1 168	167	124
20	7,5	+ 474	0,02	13,7	0,7	1 017	1 220	193	142
21	7,2	+ 102	0,04	12,5	0,7	7 388	3 477	2 890	4 259
22	7,5	+ 56	0,41	35,0	0,9	33 553	26 801	4 849	4 460
23	7,3	+ 69	1,87	56,0	0,8	76 059	27 812	17 028	12 317
24	7,6	+ 458	0,48	25,0	0,7	6 699	20 734	5 941	5 104

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten r ($n = 20$; $P \leq 0,001$) der Beziehungen zwischen dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, Blei und Cadmium, sowie den Koloniezahlen verschiedener physiologischer Bakteriengruppen in Sedimenten des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht. $a_p \leq 0,01$; $b_p \leq 0,05$

	Org.C	Pb	Cd	Anaerob-Heterotrophe	Stickstoff-fixierer	Chitin-zersetzer	Zellulose-zersetzer
Org.C	1,000						
Pb	0,967	1,000					
Cd	0,896	0,934	1,000				
Anaerob-Heterotrophe	0,657 ^a	0,624 ^a	0,755	1,000			
Stickstoff-fixierer	0,617 ^a	0,580 ^b	0,731	0,988	1,000		
Chitin-zersetzer	0,925	0,939	0,959	0,816	0,794	1,000	
Zellulose-zersetzer	0,882	0,894	0,792	0,538 ^b	0,481 ^b	0,792	1,000

berechnet (Tabelle 3). Der org. C-Gehalt ist nicht nur positiv korreliert mit den Koloniezahlen der verschiedenen physiologischen Bakteriengruppen, sondern auch mit dem Blei- und Cadmiumgehalt. Folglich sind bei hohen Schwermetallkonzentrationen auch hohe Koloniezahlen zu finden. Die daraus resultierende „Nonsense-Korrelation“ wird sehr wahrscheinlich allein durch hohe organische Kohlenstoffgehalte verursacht.

Die lineare Beziehung zwischen dem Gehalt an organischem Kohlenstoff und dem Blei- und Cadmiumgehalt bzw. den Koloniezahlen anaerob-heterotropher Bakterien wird in Abb. 3 A-C dargestellt.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, daß die Anzahl der Bakterien im Sediment in erster Linie von dem Gehalt an organischem Kohlenstoff und somit auch vom Sedimenttyp abhängig ist. Durch die Bindung von Schwermetallen an organische Bestandteile besteht gleichzeitig eine sehr enge Beziehung zwischen dem Blei- bzw. Cadmiumgehalt und der organischen Kohlenstoff-Konzentration. Trotzdem kann bis zu einer Pb-Konzentration von 251 ppm und einem gleichzeitigen Cd-Gehalt von 3,1 ppm keine signifikante Abnahme der Koloniezahlen verschiedener physiologischer Bakteriengruppen im Sediment festgestellt werden.

Beziehung zwischen der Blei-Toleranz von Sedimentbakterien und dem Blei-Gehalt des Sediments

Obgleich die Anzahl der Bakterien im Sediment durch erhöhte Cd- bzw. Pb-Konzentrationen nicht wesentlich beeinflußt wird, könnten

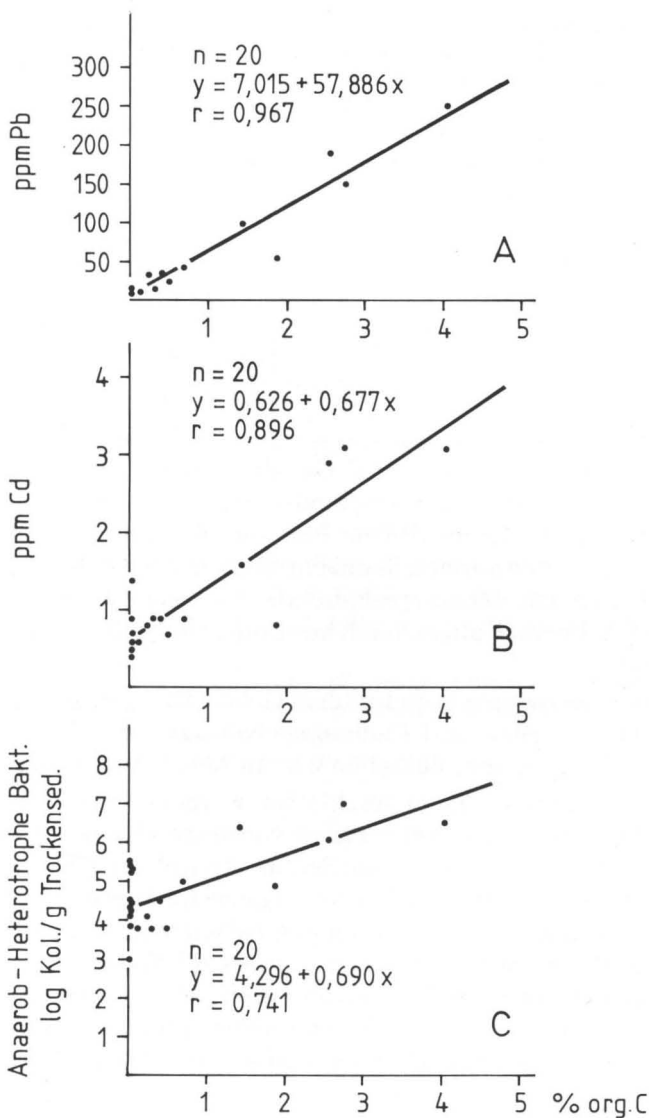


Abb. 3: Regressionsgeraden für die Beziehungen zwischen
 A. dem Blei- und dem org. C-Gehalt
 B. dem Cadmium- und dem org. C-Gehalt
 C. der Koloniezahl der anaerob-heterotrophen Bakterien und dem org. C-Gehalt
 in Sedimenten des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht.

hohe Schwermetallgehalte jedoch zu einer veränderten Zusammensetzung der Bakterienpopulation führen, mit einem hohen Anteil an schwermetalltoleranten Formen. Am Beispiel des Bleis wurde daher untersucht, inwieweit sich die aeroben heterotrophen Bakterien aus zwei unterschiedlich stark mit Blei belasteten Sedimenten in ihrer Blei-Toleranz unterscheiden.

Für 8 Sedimentproben des Weser-Ästuars wurden Blei-Konzentrationen zwischen 20 und 190 mg Pb/kg Trockengewicht (ppm) ermittelt (Tabelle 4). Die Proben vom Westufer der Weser (Station 1-4, Abb. 1) enthalten im Durchschnitt höhere Pb-Konzentrationen, jedoch auch in der Fahrwassermitte (Station 6) und bei einer Ostuferprobe (Station 8) konnten relativ hohe Pb-Gehalte im Sediment nachgewiesen werden.

Tab. 4: Blei-Konzentrationen von Sedimentproben des Weser-Ästuars (Probennahme: 19. 1. 1976)

Station	Wassertiefe (m)	Temperatur des Sediments (°C)	pH-Wert	Pb-Konzentration (mg/kg Trockengewicht = ppm)
1	9	6,3	7,38	74
2	7	6,4	7,52	104
3	7	6,5	6,96	190
4	8	6,4	7,20	100
5	8	6,4	7,38	21
6	12	5,9	7,21	111
7	6	6,6	7,43	20
8	6	6,3	7,30	160

Die Sedimente der Stationen 3 und 5 wurden zur mikrobiologischen Untersuchung herangezogen, da sie sich durch sehr verschiedene hohe Bleigehalte unterscheiden, bei gleichzeitiger weitgehender Übereinstimmung des Sedimenttyps (Mittelsilt).

Für die jeweils gut gemischten Sedimentproben, die zur Bestimmung der Koloniezahlen verwendet wurden, erfolgte eine erneute Blei-Bestimmung. Dabei wurde für das Sediment der Station 5 wie zuvor 21 ppm Pb gemessen, für das Sediment der Station 3 jedoch nur 140 ppm Pb. Umgerechnet auf das Feuchtgewicht des Sediments ergeben sich 76 ppm Pb für Station 3 und 13 ppm Pb für Station 5.

Bei der Bestimmung der Koloniezahl der aeroben heterotrophen Sedi-
mentbakterien konnten mindestens jeweils 5 Parallele von 2 Verdün-
nungsstufen für jede Pb-Konzentration des Nährmediums zur Auswer-
tung herangezogen werden. Lediglich die Kolonien auf den Platten
mit 400-1000 ppm Pb konnten nicht ausgezählt werden, weil die starke
Trübung des Agars durch ausgefallene Bleisalze, die Menge der bei der
Beimpfung mit übertragenen Sedimentpartikel und vor allem das kräf-
tige Wachstum der mit überimpften Pilzkeime (selbst bei 1000 ppm Pb)
ein eindeutiges Erkennen und Auszählen von Bakterienkolonien im
Agar (Plattengußverfahren) unmöglich machten. Da bei diesen sehr
hohen Bleikonzentrationen jedoch nur ganz geringe Koloniezahlen zu
erwarten gewesen wären, wird das Ergebnis insgesamt nicht beeinträch-
tigt.

Wie aus Tabelle 5 hervorgeht, nimmt die in beiden Proben nahezu iden-
tische Ausgangskoloniezahl mit erhöhter Pb-Konzentration des Me-
diums etwa gleichartig ab, wobei die meisten Bakterien durch eine Kon-

Tab. 5: Koloniezahlen der aeroben heterotrophen Bakterien aus Sedimenten mit
21 ppm Pb (Station 5) und 140 ppm Pb (Station 3) in Abhängigkeit vom
Bleigehalt des Nährmediums
Bebrütung: 18° C; 40 Tage

Pb-Konz. des Nähr- mediums (ppm)	Sediment Station 5		Sediment Station 3	
	Kolonie- zahl / ml x 10 ⁶	in % der Kolonie- zahl bei 0 ppm Pb	Kolonie- zahl / ml x 10 ⁶	in % der Kolonie- zahl bei 0 ppm Pb
0	35	100	30	100
0,001	35	100	31	103
0,01	35	100	30	100
0,1	33	94	29	97
0,5	29	83	30	100
2	28	80	25	83
5	28	80	25	83
10	28	80	25	83
20	26	74	20	67
50	1	3	1	3
100	0,1	0,3	0,05	0,2
150	0,03	0,08	0,015	0,05
200	0,001	0,003	0,001	0,003
300	0,0003	0,001	0,0004	0,001

zentration zwischen 20 und 50 ppm Pb im Wachstum gehemmt werden. Bei beiden Proben treten ab 50 ppm Pb gehäuft bräunlich pigmentierte Kolonien auf.

Eine erhöhte Blei-Toleranz der aeroben heterotrophen Bakterienpopulation aus der Sedimentprobe mit relativ hoher Bleikonzentration kann unter den gewählten Versuchsbedingungen nicht festgestellt werden.

Gehalt an gelöstem und partikulärem Blei, Cadmium und organischem Kohlenstoff im Wasser des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht

Da häufig eine Wechselwirkung zwischen dem Schwermetallgehalt des Sediments und dem darüber liegenden Wasserkörper besteht, wurden von einigen Stationen gleichzeitig die Pb- und Cd-Gehalte im Wasser bestimmt. Die differenzierte Bestimmung der gelösten und partikulären Anteile der Schwermetalle ermöglicht außerdem eine bessere Beurteilung einer möglichen toxischen Wirkung auf die Bakterien.

Die Blei-, Cadmium- und organische Kohlenstoffgehalte, sowie einige physikalische und chemische Parameter sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Die angegebenen Werte für den Gehalt an organischem Kohlenstoff, Blei und Cadmium sind Mittelwerte zweier Wasserproben.

Der gelöste Bleigehalt der Wasserproben bleibt trotz zunehmender Entfernung zur Küste und dem damit verbundenen höheren Anteil des Meerwassers (zu kontrollieren durch den Salzgehalt der Proben) etwa gleich hoch (0,2 - 0,5 $\mu\text{g/l}$). Allerdings sind die Konzentrationen an partikulärem Blei in den küstenferneren Proben wesentlich geringer, so daß der Gesamtbleigehalt ebenfalls mit wachsender Entfernung zur Küste abnimmt.

Bei den Proben mit einem hohen Seston Gehalt von 50 - 68 mg Trockengewicht pro Liter (Station 6, 11 und 12) entspricht der partikuläre Bleianteil etwa der zehnfachen Konzentration des gelösten Bleis. Bei niedrigem Seston Gehalt (Station 16, 22 und 23) ist das Verhältnis umgekehrt, d. h. der partikuläre Anteil ist geringer als der gelöste.

Der Bleigehalt der Seston-Trockenmasse ist ebenfalls in küstennahen Gebieten deutlich höher als im freien Meerwasser. Bei Station 22 liegen die Werte unterhalb der Nachweisgrenze.

Tab. 6: Konzentrationen an gelöstem und partikulärem organischen Kohlenstoff, Blei und Cadmium im Wasser des Weser-Ästuars und der Deutschen Bucht: Probennahme Juli 1975 (Stationsnummern wie in Abb. 1 und 2 dargestellt).

Station		Gezeit	Salz- gehalt (‰)	pH- Wert	Eh- Wert (mV)	Seston- gehalt ⁴⁾ (mg TG pro l)	Organischer Kohlenstoffgehalt			Blei - Konzent r.			Cadmium - Konzent r.				
Nr.	Ort						gelöst (mg/l)	partikulär (mg C/g Seston-TG) (mg/l)		gelöst (µg/l)	partikulär (mg Pb/kg Seston-TG) (µg/l)		gesamt (µg/l)	gelöst (µg/l)	partikulär (mg Cd/kg Seston-TG) (µg/l)		gesamt (µg/l)
6	UW-km ¹⁾ 60 Fahrwas- sermitte	THW ²⁾	8,74	7,60	+478	62	4,3	17,8	1,10	0,3	50	3,1	3,4	0,25	1,3	0,08	0,33
11	UW-km 69 Tonne 57	Flut	6,26	7,65	+490	50	6,9	30,6	1,53	0,5	85	4,3	4,8	0,16	2,9	0,15	0,31
12	UW-km 75,5 Tonne 49	Flut	14,56	7,80	+484	68	3,9	18,0	1,22	0,3	42	2,9	3,2	0,24	1,2	0,08	0,30
16	UW-km 99 Tonne 21	THW	27,71	7,94	+480	2,6	10,8	113,9	0,30	0,2	18	0,05	0,25	0,12	1,5	0,003	0,12
22	UW-km 130 Norder- gründe	TNW ³⁾	31,96	7,80	+460	3,8	1,9	67,5	0,26	0,4	<10	<0,04	0,4	0,02	0,7	0,003	0,02
23	54°06'N 7°59'E	Flut	30,58	7,85	+334	2,6	1,6	98,0	0,25	0,3	20	0,05	0,35	0,02	1,4	0,003	0,02

1) UW-km = Unterweser-Kilometer

2) THW = Tidehochwasser

3) TNW = Tideniedrigwasser

4) TG = Trockengewicht

Die gelösten Cadmiumkonzentrationen nehmen zwischen 0,25 $\mu\text{g/l}$ bei Station 6 und 0,02 $\mu\text{g/l}$ bei Station 23 ab. Die Gehalte an partikulärem Cadmium erreichen nur bei der Station 11 den Wert der gelösten Konzentrationen, sonst liegen sie meist deutlich darunter. Die Cadmiumgehalte der Sestontrockensubstanz betragen zwischen 0,7 und 2,9 ppm, wobei kein Zusammenhang mit der Küstenentfernung zu erkennen ist. Der Gesamtgehalt an Cadmium verringert sich mit zunehmendem Salzgehalt der Proben und größerer Entfernung zur Küste bis zu einer Zehnerpotenz.

Vergleichend kann festgestellt werden, daß Blei wesentlich stärker an Partikel größer als 0,4 μm adsorbiert wird als Cadmium, daß Blei gegenüber Cadmium insgesamt etwa in zehnfacher Konzentration vorliegt, und daß lediglich die Konzentration des gelösten Bleis und die Cadmium-Konzentrationen der Sestontrockensubstanz mit zunehmender Entfernung zur Küste nicht abnehmen.

Der Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoff beträgt 1,6 bis 10,8 mg/l. Die organische C-Konzentration des Sestons ist bei den landferneren Proben mit niedrigem Sestongehalt deutlich höher als bei den Proben mit hohen Flußwasseranteilen. Ein fester Zusammenhang zwischen dem organischen Kohlenstoffgehalt und der Pb- bzw. Cd-Konzentration besteht in der Wasserphase nicht.

Diskussion

Bei der Bestimmung der Schwermetallgehalte im Sediment beziehen sich die eigenen Untersuchungen auf die Gesamtfraktion, um die regionalen Sedimentverhältnisse zu berücksichtigen. Häufig wird jedoch der Schwermetallgehalt der Tonfraktion (Fraktion $< 2 \mu\text{m}$) ermittelt, um eine Vergleichbarkeit mit dem „Tongestein-Standard“ zu erzielen (Müller und Förstner 1974). Diese unterschiedlichen Bestimmungsmethoden erschweren die Gegenüberstellung von Werten, da die Tonfraktion allgemein höhere Konzentrationen an Schwermetallen aufweisen.

Die untersuchten Sedimente aus dem Weser-Ästuar und der Deutschen Bucht enthalten, mit Ausnahme von Proben vor der Friedrich-August-Hütte, niedrige Konzentrationen an Blei und Cadmium. Selbst die Sedimente im Bereich der Bleihütte (bis 252 ppm Pb und 3,1 ppm Cd) sind im Vergleich zu den Schwermetallkonzentrationen der Gesamtfraktion im Rhein-Ästuar von 533 ppm Pb und 14 ppm Cd (Salomons

und Mook 1977) nicht so stark kontaminiert. Jedoch ergaben frühere Untersuchungen vor der Friedrich-August-Hütte Pb-Konzentrationen von 34-497 ppm (Tan 1976). Die unterschiedlichen Gehalte könnten verursacht werden durch eine abnehmende Belastung aber auch durch Sedimentumschichtungen infolge von Sturmfluten oder Pflugebagerei bzw. durch eine inhomogene Verteilung des Bleis im Sediment (siehe Tan 1980).

Für die Tonfraktion wurden in vergleichbaren Gebieten folgende Konzentrationen in den Sedimenten bestimmt: In der Weser bei Bremen 340 ppm Pb und 13 ppm Cd (Förstner und Müller 1974), in der Elbe bei Hamburg 315 ppm Pb und 19,4 ppm Cd (Lichtfuß und Brümmer 1977), in der Jadebucht durchschnittlich 100 ppm Pb und 22 ppm Cd und für die innere Deutsche Bucht Mittelwerte von 152 ppm Pb und 15 ppm Cd (Little-Gadow und Schäfer 1974).

In der vorliegenden Arbeit wurde nachgewiesen, daß sowohl die Bakterienzahl als auch der Schwermetallgehalt abhängig ist von dem Gehalt an organischem Kohlenstoff im Sediment. Ferner besteht eine Beziehung zwischen der org. C-Konzentration und dem Sedimenttyp. Somit findet die von ZoBell (1946) festgestellte Abhängigkeit der Bakterienzahl von der Korngrößenverteilung ihre Bestätigung. Für die Sedimentfraktion kleiner als $2\ \mu\text{m}$ bzw. $20\ \mu\text{m}$ konnten Lichtfuß und Brümmer (1977) in Sedimenten der Elbe ebenfalls eine positive Korrelation zwischen organischem Kohlenstoff- und Schwermetallgehalt nachweisen.

Um festzustellen, ob durch die in situ-Konzentrationen an Blei und Cadmium partielle Schädigungen der Bakterienpopulation auftreten, wurden verschiedene Bakteriengruppen ausgewählt, die sich in ihren physiologischen Leistungen deutlich unterscheiden. Es konnte jedoch bei keiner der geprüften Bakteriengruppen eine Verringerung der Koloniezahl auch bei den höchsten Pb- und Cd-Konzentrationen nachgewiesen werden. Zu analogen Ergebnissen führten Untersuchungen unter anderem mit den gleichen physiologischen Bakteriengruppen in künstlich mit Blei angereicherten Sedimenten (bis 195 ppm) von kontinuierlichen Fließkulturen im Vergleich zu Kontrollkulturen ohne Bleizugabe (Tan 1980).

Da bei den Bakterien ein breites Toleranzspektrum gegenüber verschiedenen Schwermetallen besteht, könnte es selbst innerhalb bestimmter physiologischer Gruppen zur stärkeren Vermehrung von resi-

stenten Formen kommen. In statischen Kulturen (Thormann 1975) reagierten die Brackwasserbakterien auf hohe Bleikonzentrationen mit vermehrtem Vorkommen von Pb-resistenten Bakterien. Um so überraschender ist die Tatsache, daß die Blei-Toleranz der aerob heterotrophen Bakterienpopulation aus einer Sedimentprobe mit relativ hohem Bleigehalt sich im Vergleich zu einer Population aus einem Sediment mit geringem Pb-Gehalt nicht unterscheidet. Selbst wenn der Bleigehalt des getrockneten, stark mit Blei belasteten Sediments mit 140 ppm Pb umgerechnet wird auf den entsprechenden Wert für das Feuchtgewicht, erhält man noch eine Pb-Konzentration von 76 ppm, die, in der gleichen Menge dem zur Prüfung der Pb-Toleranz verwendeten Nährboden zugegeben, eine Verminderung der Koloniezahl um über 97 % verursachte. Offensichtlich liegt das Blei im Nährboden und im Sediment in sehr unterschiedlich biologisch wirksamer Form vor.

Es ist allerdings auch nicht auszuschließen, daß durch eine sehr inhomogene Verteilung des Schwermetalls im Sediment die Bakterienpopulation insgesamt nicht nachweisbar verändert wird. Auch für die Sedimentbakterien aus mit Blei kontaminierten Fließkulturen konnte eine erhöhte Bleiresistenz nicht eindeutig nachgewiesen werden (Tan 1980).

Da die Bindungsart der einzelnen Schwermetalle im Sediment sehr unterschiedlich und abhängig ist von der Sedimentbeschaffenheit (Hallberg 1974; Lu und Chen 1977; Patchineelam und Förstner 1977), können die Ergebnisse nicht für alle Sedimente und Schwermetalle verallgemeinert werden. So fanden Nelson und Colwell (1975) eine positive Korrelation zwischen dem Quecksilbergehalt in Sedimenten der Chesapeake Bay und der Zahl der Hg-resistenten Bakterien. In der New Yorker Bucht wies Koditschek (1976) ebenfalls eine Beziehung zwischen dem Verschmutzungsgrad der Sedimente und der Zahl der Hg-resistenten Bakterien nach. Im limnischen Bereich konnte eine Beziehung zwischen dem Cd-Gehalt von stark belasteten Wasserproben und der Anzahl der Cd-resistenten Bakterien festgestellt werden (Houba und Remacle 1980).

Die quantitative Bestimmung von Schwermetallen im Brack- und Meerwasser mittels Atomabsorption ist insbesondere beim Blei nicht unproblematisch. Dabei werden vor allem bei der Bestimmung des gelösten Anteils häufig zu hohe Konzentrationen gemessen, die auf Kontaminationen bereits bei der Probenahme oder Probenaufbereitung zurückzuführen sind (Patterson 1974). Bei den durchgeführten

Untersuchungen wurde sehr gründlich auf die Vermeidung von Kontaminationen geachtet. Die ermittelten Werte für die Pb- und Cd-Gehalte entsprechen größenordnungsmäßig den Werten von Nürnberg et al. (1976), die mit inversvoltammetrischer differentieller Pulse-Polarographie in der Weser bei Brake bestimmt worden sind. Weitere Blei- und Cadmiumbestimmungen der Wasserphase sind für das Untersuchungsgebiet nicht bekannt.

Bei den als gelöst bezeichneten Konzentrationen muß bedacht werden, daß in den filtrierten Proben die Schwermetalle sicherlich nicht vollständig in Form freier Ionen vorliegen. Die hohe Bindungsaffinität der in den Wasserproben enthaltenen organischen und anorganischen Substanzen führt besonders bei Blei aber auch beim Cadmium zur Bildung von Komplexverbindungen, die von Membranfiltern mit $0,40\mu\text{m}$ Porendurchmesser nicht zurückgehalten werden (Gibbs 1973, Gardiner 1974, Ramamoorthy und Kushner 1975).

Die Gehalte an partikulärem Blei und Cadmium in den Wasserproben mit hohem Sestongehalt erreichen, bezogen auf die Sestontrockenmasse, zum Teil solch hohe Konzentrationen, wie sie auch in den Sedimenten der gleichen Stationen gemessen wurden. Da die Bakterien sich häufig an Partikel anheften, sind diese Mikroorganismen wesentlich höheren Schwermetallgehalten ausgesetzt als nach der auf die gesamte Wasserprobe bezogenen Konzentration allgemein anzunehmen ist. Ob die hohen Pb- und Cd-Konzentrationen des Sestons bereits ausreichen, um auf einige bestimmte Bakterien toxisch zu wirken, hängt — wie auch bei Sedimentproben — in erster Linie von der Art ihrer Bindung ab.

Die ermittelten gelösten Cd- und Pb-Konzentrationen sollten nach dem heutigen Kenntnisstand keinen Einfluß auf das Wachstum der Bakterien ausüben.

Literaturverzeichnis

- Azam, F., Vaccaro, R. F., Gillespie, P. A., Moussalli, E. I. und Hodson, R. E. (1977): Controlled ecosystem pollution experiment: Effect of mercury on enclosed water columns. II. Marine bacterioplankton. *Mar. Sci. Comm.* **3**: 313 - 329.
- Burkholder, P. R. (1963): Some nutritional relationships among microbes of sea sediments and waters. In: C. H. Oppenheimer (ed.): *Symposium on Marine Microbiology*. Charles C. Thomas, Publisher, Springfield, Illinois, p. 133 - 150.

- Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (DEV) (1960): D1-Bestimmung des Chlorid-Ions, p. 4 - 5. Verlag Chemie Weinheim/Bergstraße.
- Dietrich, G. und Kalle, K. (1965): Allgemeine Meereskunde. Berlin-Nikolassee: Gebrüder Borntraeger 492 pp.
- Dörjes, J., Little-Gadow, S. und Schäfer, A. (1976): Zur Schwermetallverteilung in litoralen Sedimenten der ostfriesischen Küste. *Senckenbergiana marit.* **8**: 91 - 102.
- Ernst, W. (1975): Eine neue Verbrennungs-IR-Methode zur Mikrobestimmung von organischem Kohlenstoff in marinen Sedimenten. *Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh.* **15**: 269 - 281.
- Förstner, U. und Müller, G. (1974): Schwermetalle in Flüssen und Seen als Ausdruck der Umweltverschmutzung. Berlin: Springer-Verlag 225 pp.
- und Reineck, H. E. (1974): Die Anreicherung von Spurenelementen in den rezenten Sedimenten eines Profilkerns aus der Deutschen Bucht. *Senckenbergiana marit.* **6**: 175 - 184.
- Füchtbauer, H. und Müller, G. (1970): Sediment-Petrologie Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 726 pp.
- Gadow, S. und Schäfer, A. (1973): Die Sedimente der Deutschen Bucht: Korngrößen, Tonminerale und Schwermetalle. *Senckenbergiana marit.* **5**: 165 - 178.
- Gardiner, J. (1974): The chemistry of cadmium in natural water- II. The adsorption of cadmium on river muds and naturally occurring solids. *Wat. Res.* **8**: 157 - 164.
- Gauthier, M. J. (1973): Milieu d'estuaire et pollutions. *Rev. Intern. oceanogr. Méd.* **30**: 89 - 113.
- Gibbs, R. J. (1973): Mechanisms of trace metal transport in rivers. *Science* **180**: 71 - 73.
- Hallberg, R. O. (1974): Metal distribution along a profile of an inter-tidal area. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* **2**: 153 - 170.
- Houba, C. und Remacle, J. (1980): Composition of the saprophytic bacterial communities in freshwater systems contaminated by heavy metals. *Microbial Ecol.* **6**: 55 - 69.
- Koditschek, L. (1976): Antimicrobial resistant bacteria in the New York Bight. In: M. G. Gross (ed.): Middle Atlantic Continental Shelf and the New York Bight. *Amer. Soc. Limnol. Oceanogr. Spec. Symp.* **2**: 383 - 393.
- Lichtfuß, R. und Brümmer, G. (1977): Schwermetallbelastung von Elbe-Sedimenten. *Naturwissenschaften* **64**: 122 - 125.
- Little-Gadow, S. und Schäfer, A. (1974): Schwermetalle in den Sedimenten der Jade. Bestandsaufnahme und Vergleich mit der inneren Deutschen Bucht. *Senckenbergiana marit.* **6**: 161 - 174.
- Lu, C. S. und Chen, K. Y. (1977): Migration of trace metals in interfaces of seawater and polluted surficial sediments. *Environ. Sci. Technol.* **11**: 174 - 182.

- Lüneburg, H. (1972): Zum Sedimentcharakter rezenter Tone und Silte in Fjorden der schwedischen Skagerakküste (Bohnslän). Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. **14**: 45 - 79.
- Menzel, D. W. und Vaccaro, R. F. (1964): The measurement of dissolved organic and particulate carbon in seawater. *Limnol. Oceanogr.* **9**: 138 - 142.
- Mills, A. L. und Colwell, R. R. (1977): Microbiological effects of metal ions in Chesapeake Bay water and sediments. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **18**: 99 - 103.
- Nelson, J. D. Jr. und Colwell, R. R. (1975): The ecology of mercury-resistant bacteria in Chesapeake Bay. *Microbial. Ecol* **1**: 191 - 218.
- Nürnberg, H. W., Valenta, P., Mart, L., Raspor, B. und Sipos, L. (1976): Applications of polarography and voltammetry to marine and aquatic chemistry. II. The polarographic approach to the determination and speciation of toxic trace metals in the marine environment. *Z. analyt. Chem.* **282**: 357 - 367.
- Patchineelam, S. R. und Förstner, U. (1977): Bindungsformen von Schwermetallen in marinen Sedimenten. — Untersuchungen an einem Sedimentkern aus der Deutschen Bucht. *Senckenbergiana marit.* **9**: 75 - 104.
- Patterson, C. C. (1974): Lead in seawater. *Science* **183**: 553 - 554.
- Pita, F. W. und Hyne, N. J. (1975): The depositional environment of zinc, lead, and cadmium in reservoir sediments. *Wat. Res.* **9**: 701 - 706.
- Ramamoorthy, S. und Kushner, D. J. (1975): Heavy metal binding components of river water. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **32**: 1755 - 1766.
- Salomons, W. und Mook, W.G. (1977): Trace metal concentrations in estuarine sediments: Mobilization, mixing or precipitation. *Neth. J. Sea. Res.* **11**: 119 - 129.
- Tan, T. L. (1976): Bestimmung von Blei und Cadmium in Meerwasser und marinen Sedimenten. Erfahrungen mit Chelex-100, dem PTFE-Autoklav und der flammenlosen Atomabsorption. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. **16**: 11 - 30.
- (1980): Effect of long-term lead exposure on the seawater and sediment bacteria from heterogeneous continuous flow cultures. *Microbial Ecol.* **5**: 295 - 311.
- Taylor, D. (1974): Natural distribution of trace metals in sediments from a coastal environment, Tor Bay, England. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* **2**: 417 - 424.
- Thormann, D. (1975): Über die Wirkung von Cadmium und Blei auf die natürliche heterotrophe Bakterienflora im Brackwasser des Weser-Ästuars. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. **15**: 237 - 267.
- und Weyland, H. (1979): Beziehungen zwischen verschiedenen Brackwasser- und Meeresbakterien und der wachstumshemmenden Wirkung von Cadmium und Blei. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. **17**: 163 - 188.
- ZoBell, C. E. (1946): Marine microbiology. A monograph on hydrobacteriology, Waltham, Mass., 240 pp.