

Diskussionsbeiträge

Der chemische Sediment-Qualitätsindex

– Vorschlag zu einer vorläufigen Bewertung der Schwermetalle*

Hubert Hellmann

Dr. H. Hellmann, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Postfach 3 09, D-56003 Koblenz

Zusammenfassung. Vorbild für alle Bewertungsschemata zur Güte von Oberflächengewässern ist das biologische Saprobiensystem. Man hat versucht, für ausgewählte chemische Parameter, die laut Definition die „chemische“ Güte repräsentieren, eine analoge Klassifikation aufzustellen. Des Weiteren haben die Umweltverträglichkeitsuntersuchungen dringenden Bedarf an der Bewertung speziell der Schwermetalle (und organischen Spurenstoffe), die sich als äußerst schwierig darzustellende Thematik erweist. Neben einem vorläufigen Vorschlag zum chemischen Sediment-Qualitätsindex werden die Bemühungen anderer Arbeitskreise um eine Problemlösung zum gleichen, aber auch zu verwandten Themen referiert. Ein allgemein anerkanntes und fundiertes Bewertungsschema ist z.Zt. nicht in Sicht.

1 Einleitung

Die Aufgabe eines Gewässeranalytikers kann sich heute nicht mehr darauf beschränken, das Probengut fachgerecht zu analysieren und die Ergebnisse zahlenmäßig vorzulegen; vielmehr muß er sich um die **Bedeutung** der Zahlen bemühen, sie einordnen und nach Möglichkeit auch bewerten.

Ein Beispiel: Was bedeutet das Vorkommen von 3 mg/kg Cadmium in einem Flußsediment? Für sich betrachtet ist der Aussagewert annähernd gleich Null. Zieht man (unter Ausklammerung der Korngrößenproblematik [1]) den Hintergrundwert des unbelasteten Sediments, am besten in Form des Tongesteinstandards von 0,3 mg/kg [2] heran, so gewinnt man die erste relevante Aussage, daß dieses Sediment in seinem Cadmiumgehalt durch offensichtlich anthropogene Einflüsse um das Zehnfache aufkonzentriert wurde. Daß die Hintergrund-Vorbelastung je nach Schwermetall und Geologie des Einzugsgebietes mehr oder weniger vom Standard abweichen kann [3], ändert nichts an der grundsätzlichen Brauchbarkeit einer solchen Einordnung.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, auf dem Tonstandard allein ein erstes Bewertungssystem aufzustellen, indem man mit dem Vielfachen eine Skala bildet s.u.a. [4]. Dieses willkürliche Verfahren führt spätestens dann zum Widerspruch, wenn mit den derart „skalierten“ Zahlen das Probengut mehrstufig von gut bis sehr schlecht bzw. von unschädlich bis sehr schädlich bewertet wird.

* Dieser Beitrag stellt ausschließlich die persönliche Meinung des Verfassers dar.

2 Bewertungsansätze

2.1 Ökotoxikologische Bewertung

Es scheint naheliegend, die Schwermetall-Belastung von Sedimenten direkt an ihrem Schadstoff-Potential im aquatischen Milieu zu bemessen, d.h. auf der Basis einer ökotoxikologischen Bewertungsskala. Neben den mehr von der Hydrochemie her kommenden Vorschlägen [4–7] (vor dem Hintergrund von Bagger- und Sedimentumlagerungen) wird eine solche auf internationaler Ebene gefordert. So in den „Richtlinien der Oslo-Kommission für die Handhabung von Baggergut für eine ökologisch verträgliche Unterbringung im Küstenbereich“ [8]. Es zeigt sich jedoch, daß man ohne die „Hilfestellung“ von Definitionen nicht weiterkommt. Nicht zufällig erscheinen in den Umweltverträglichkeitsuntersuchungen (UVU) die bisher fehlenden Begriffe (zunächst als Schutzgüter) wie „natürliches Sediment“, „aquatische Lebensgemeinschaft“ oder spezieller „Fisch- und Weichtierzucht“, „Standortbiozönose“. Man erwartet von biologischen Analyseverfahren, daß sie Auskunft geben über die möglichen Auswirkungen der Sedimentkontamination auf den Ebenen:

- der akuten Toxizität,
- der chronischen Toxizität (im Langzeittest)
- der Bioakkumulation (insbesondere in Organismen, die der menschlichen Ernährung dienen) [9].

Örtlich gegliedert wären das Wirkungen *in situ* (beim Umlagern/Resuspendieren sowie an der neuen Lagerstätte). Dabei ist wiederum die Definition von Schutzziele (Qualitätszielen) und Zielkriterien erforderlich (→ Kap. 5).

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand [9] gibt es aber z.Z. noch keine allgemein anerkannten sedimentbiologischen Tests und Regelungen, allenfalls standardisierte Tests mit wäbrigem Eluat oder Porenwasser (s. auch [10, S. 117]).

Insbesondere die eingangs gestellte Frage nach der Bewertung spezieller Schwermetalle (oder organischer Spurenstoffe) kann mit diesen Tests nicht beantwortet werden.

2.2 Der Bodengrenzwert

Im Falle der aquatischen Sedimente (weniger der Wasserphase) ist zumindest in naher Zukunft kaum damit zu rechnen, daß weiterentwickelte biochemische Verfahren Einzel-

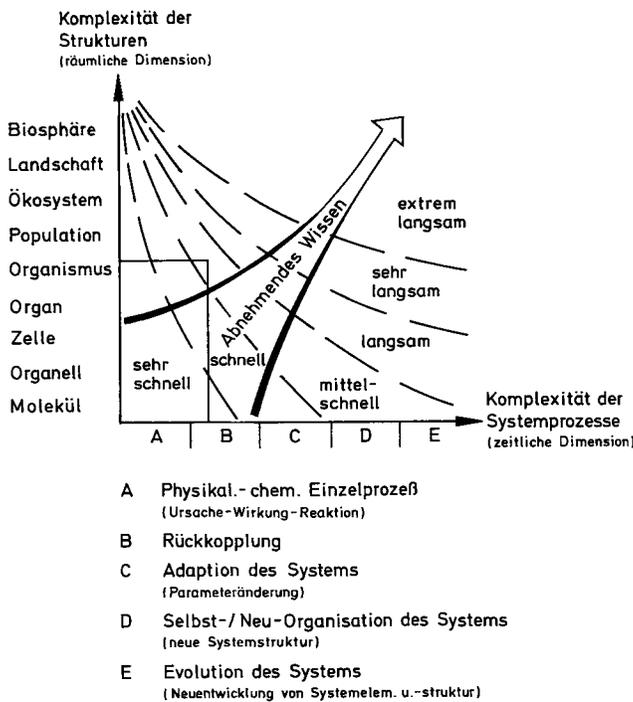


Abb. 1: Strukturelle und funktionelle Hierarchien in biologischen Systemen, zit. nach [11, S. 57]

stoffe bezüglich ihrer Wirkungen bewerten können [vgl. 11]. Ein weiterer Mangel ist, daß die bisher erprobten Testmethoden (→ Abb. 1) fast überwiegend auf der molekularzellulären Ebene angesiedelt sind und daher nur eine geringe ökotoxikologische Relevanz aufweisen. Es kommt hinzu, daß nicht nur das Sediment als „Schutzziel“ im Auge behalten werden muß, sondern auch die verschiedenen „Nutzungsarten“ (→ Kap. 5). Da man Sedimente fallweise auch an Land deponiert und u.U. dort auch nutzt, bieten sich hierfür die „tolerierbaren Gehalte“ für Kulturböden an; der für die menschliche Ernährung geeignete Boden als Schutzziel, der Bodengrenzwert als Ziel-Kriterium.

Aufbauend auf den Arbeiten von KLOKE gingen entsprechende Zahlen als Bodengrenzwerte in die Klärschlammverordnung ein, zwischenzeitlich in novellierter Form (→ Tabelle 1 [12]). Der zuerst für Cadmium bei 3 mg/kg liegende, dann auf 1,5 mg/kg erniedrigte Grenzwert ist jedoch offenbar nicht darauf abgestimmt, bei der Nutzung der Sedimente in der Landwirtschaft schon bestehende Grenz- oder Richtwerte in Futter- und Nahrungsmitteln zu verhindern, und er ist daher auch nicht geeignet, in die human-toxikologisch duldbaren täglichen Aufnahmemengen (DTA, ADI) überzuleiten, wie man es bei den Parametern der Trinkwasserverordnung überwiegend getan hat.

Die Bodengrenzwerte haben sich gleichwohl bei der Nutzung von belastetem Klärschlamm in der Landwirtschaft, ebenso wie bei der Landlagerung von Baggergut (dies allerdings als „Boden“) eingebürgert. Damit bietet sich neben dem Tonstandard der Bodengrenzwert für eine Beurteilung der Qualität von Sedimenten an.

Tabelle 1: Tongesteinsstandard und Bodengrenzwert in mg/kg nach der Klärschlammverordnung

Element	Tonstandard (T)	Bodengrenzwert (B)	Toleranzfaktor (T _F)
Blei	20	100	5,0
Cadmium	0,3	1,5	5,0
Chrom	90	100	1,1
Kupfer	45	60	1,3
Nickel	68 (30)	50	0,7 (1,7)
Quecksilber	0,4	1,0	2,5
Zink	95	200	2,1
Arsen	9	20	2,2

Toleranzfaktor (T_F)

2.2.1 Beispiel Cadmium

Im Zuge der heute allgemein geforderten UVU beim Ausbau von Bundeswasserstraßen wurden fünf Wertstufen definiert (→ Tabelle 2 [13]):

Wertstufe 1 bedeutet „Wert sehr gering“, was unter analytischen Gesichtspunkten als „sehr stark belastet“ zu verstehen ist. Weitere Wertstufen und aktuelle Cadmium-Belastungen lassen sich in einem kartesischen Koordinatensystem unterbringen, mit den Fixpunkten des Tongesteinsstandards (Wertstufe 3 = 1,5 mg/kg). Die Zuordnung zur Wertstufe 3,0 weist folglich die Cadmium-Belastung als „mäßig“, den Wert des Sediments – Zielrichtung Boden – als „mittel“ aus. Diese Festlegung ist zwar nicht ohne eine gewisse Willkür, doch nach Lage der Dinge wohl akzeptabel.

Tabelle 2: Definition der Wertstufen

Spanne	Stufe	Wert	chemische Bewertung
≤1 1,7	1	sehr gering	sehr stark belastet
1,8 } 2,7 }	2	gering	stark belastet
2,8 } 3,7 }	3	mittel	mäßig belastet
3,8 } 4,4 }	4	hoch	schwach belastet
>4,5	5	sehr hoch	unbelastet

Die Zuordnung von Cadmium-Konzentrationen zu den Wertstufen 1 und 2 ist ebenfalls nicht ohne weitere Festlegungen möglich. Im Vorschlag I (→ Abb. 2) soll je Verdopplung (= Spreizungsfaktor nach ROCKER [20]) der Cd-Konzentration eine niedrigere Wertstufe erreicht werden; d.h. Cd = 3 mg/kg bedeutet Wertstufe 2, Cd = 6 mg/kg Wertstufe 1. In der offenen Skala kann die Wertstufe 0 nicht erreicht werden. Den Vorschlag II möchten wir auf die Exponentialfunktion (→ Abb. 2)

$$\text{aktuelle Wertstufe} = 5,68 \cdot e^{-a \cdot \text{Cd-Gehalt}}$$

$$(\text{analog } y = y_0 \cdot e^{-a \cdot x})$$

stützen, wobei $y_0 = 5,68$ (Cd = 0 mg/kg) ist. Mit dieser Funktion werden die Vorzüge des natürlichen Logarithmus genutzt und eine nach hohen Konzentrationen hin offene Skalierung ermöglicht. Abgesehen von der letztgenannten irrealen Wertstufe für Cd = 0 ergibt sich ein brauchbarer Kurvenverlauf, der für die Wertstufen 3 bis 5 überhaupt nicht vom Verlauf des Vorschlages I abweicht, dann aber ab Wertstufe 2 deutlich stringenter als jener verläuft.

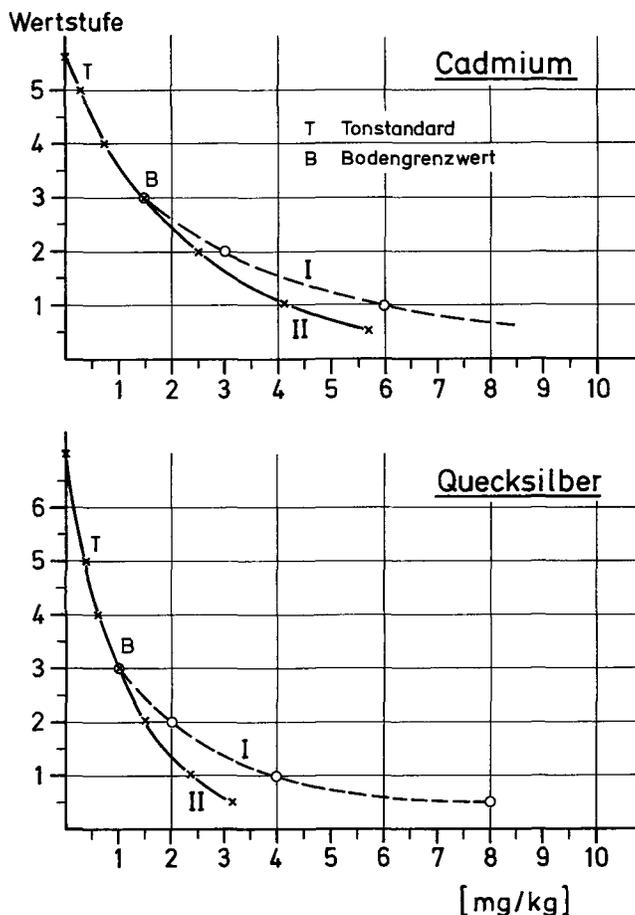


Abb. 2: Zusammenhang von Wertstufe A und Sedimentbelastung durch Cadmium und Quecksilber.

- I = Verdoppelung der Sedimentbelastung (Abszisse) von Wertstufe 3 → 2 → 1
- II = exponentieller Ansatz

Andere Varianten sind denk- und diskutierbar, so etwa indem man als dritte Konstante den Grenzwert für Klärschlamm einbezieht (→ Kap. 4.4).

2.2.2 Andere Schwermetalle

In der Klärschlammverordnung sind neben Cadmium noch sechs weitere Schwermetalle und Arsen genannt. Tabelle 1 zeigt, daß die natürlichen Hintergrundgehalte sich bei ihnen um mehr als zwei Zehnerpotenzen unterscheiden. Dabei bil-

den Cadmium und Quecksilber das untere, Chrom und Zink das obere Ende der Reihe. Dementsprechend staffeln sich auch die Bodengrenzwerte. Hier fällt auf, daß die „Toleranzspanne“ zwischen dem Hintergrund- und dem Bodengrenzwert je nach Element sehr unterschiedlich sein kann. Mit einem Faktor von nur 1,1 ist sie zum Beispiel bei Chrom am geringsten und am größten bei Blei und Cadmium von je 5.

Auch wenn man in der Praxis von den absoluten Zahlen (nicht von Toleranzspannen) ausgehen muß, sei dahingestellt, ob die bei Chrom und Blei zum Ausdruck kommende Bewertung fachlicher Kritik standhält. Wegen der in den letzten Jahrzehnten beobachteten Chrom- und Kupferkonzentrationen in den Sedimenten müßten diesen überwiegend die geringen Wertstufen 1 und 2 zugemessen werden, sofern man dem exponentiellen Ansatz nach Kurve II folgt. In Abb. 3 wurde für Nickel nicht der übliche Tonstandard von 68, sondern der in der Fachliteratur ebenfalls zitierte niedrigere Hintergrundwert von 30 mg/kg angesetzt. Die übrigen Schwermetalle nebst Arsen sind in den Abb. 4 und 5 berücksichtigt.

2.3 Gesamtbewertung

– Der Sediment-Qualitätsindex (SQI)

Anhand der Bewertungskurven – Zielkriterium: Bodennutzung – kann jedem der mehrfach genannten Elemente eine Wertstufe zwischen 0 und 5 zugeordnet werden. In der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz bewertete die Mehrheit der Analytiker dieses System als ausreichend, sofern eine Landlagerung des Sediments ins Auge gefaßt wird. Wird auch nur bei einem Element die Wertstufe von weniger als 3 (Bodengrenzwert) ermittelt, sollte das Baggergut nicht mehr uneingeschränkt zur Landlagerung empfohlen werden dürfen.

Abweichend von diesem Grundsatz und mit allem Vorbehalt (→ Kap. 2.1) wird im folgenden versucht, mit den Kriterien der Bodennutzung (da nichts anderes greifbar) einen aquatischen Sedimentqualitätsindex (SQI) zu erarbeiten, welcher in einer einzigen Zahl die Wertstufen aller SM einschließlich des Arsens zusammenfaßt.

Vorbild ist das biologische Gütesystem nach dem Saprobienindex sowie der 1980 vorgeschlagene „Chemische Index zur Überwachung der Wasserqualität von Fließgewässern“ [14]. (Der Einwand, man dürfe nicht zwei verschiedene Wertstufen „miteinander vermengen“, wäre prinzipiell auch gegen jenes Verfahren zu richten, faßt es doch acht Parameter von der O₂-Sättigung bis zur elektrischen Leitfähigkeit zusammen [14, Tabelle 1].)

Hier wie dort gehen die Bewertungskurven auf die subjektive Meinung einer größeren Anzahl von Wasserfachleuten zurück. Sie sind mithin diskussionsbedürftig. In [14] fand die Diskussion allerdings „nach mehrjährigen fachlichen und vor allem auch statistischen Untersuchungen über sechs verschiedene Indexansätze auf der Basis amerikanischer Ergebnisse ihren Abschluß“.

In Anlehnung an dieses Verfahren sind als nächstes die Parameter zu „wichten“. Die Wichtung (→ Tabelle 3) ist wiederum subjektiv; sie sollte dennoch möglichst plausibel und auf die entsprechenden Schutzgüter abgestimmt sein.

Mit dieser Wichtung werden Wertstufen der Schwermetalle sowie des Arsen zu einem geometrischen bzw. multiplikativ gewichteten Index zusammengefaßt, der die gesuchte integrierte Wertstufe darstellt:

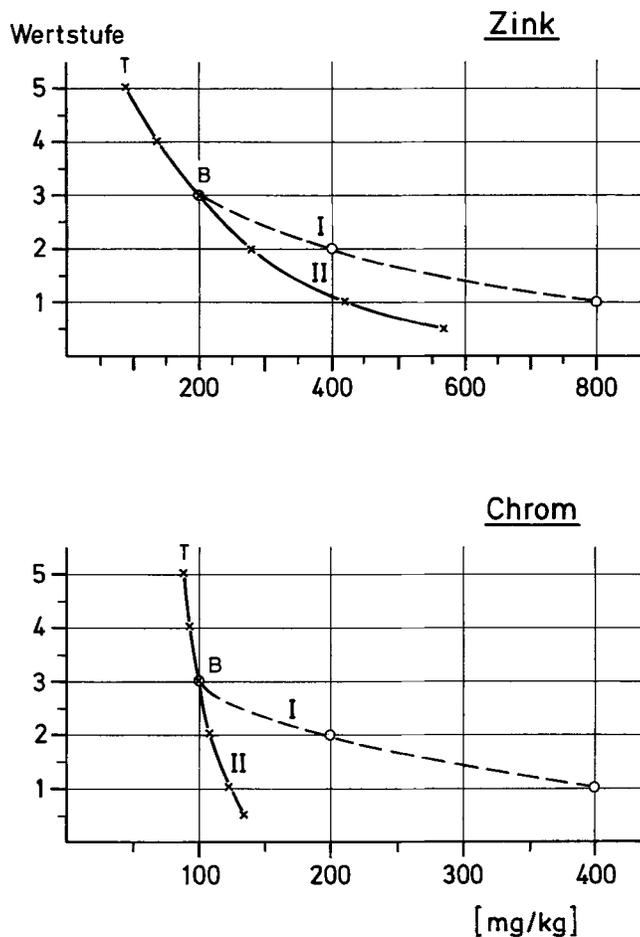
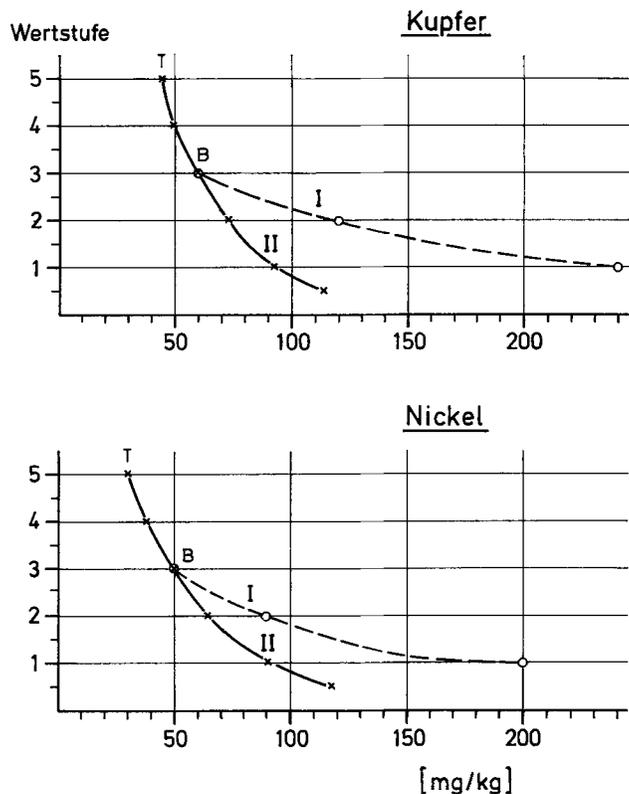


Abb. 3: Wie Abb. 2, Belastung durch Kupfer und Nickel

T = Tonstandard,
B = Bodengrenzwert

Abb. 4: Wie Abb. 2, Belastung durch Zink und Chrom

Tabelle 3: Wichtung (B) der Schwermetalle und des Arsen

	B
Blei	0,08
Cadmium	0,25
Chrom	0,06
Kupfer	0,13
Nickel	0,08
Quecksilber	0,25
Zink	0,10
Arsen	0,05
Σ	1,0

$$SQI = A^B (\text{Blei}) \cdot A^B (\text{Cadmium}) \dots$$

$$\text{Es gilt: } \sum_1^n \text{Wichtung (Zahl 0 - 1,0)} = 1,0$$

SQI = Sediment-Qualitätsindex
A = Wertstufe
B = Wichtung

Es wird darauf hingewiesen, daß dieser Ansatz hier zur Diskussion gestellt wird. Die letztgültigen Zahlen und vor allem die Wichtung müssen u.E. aus der Bioverfügbarkeit und der Toxizität sowie mit Blick auf das Schutzziel möglichst interdisziplinär abgeleitet und begründet werden.

3 Beispiele

3.1 Sedimente

Auf die in der Einleitung gestellte Frage nach der Bewertung eines mit 3 mg Cadmium pro kg belasteten Sediments lautet die Antwort: nach Kurve I (= Wertstufe 2,0) und Kurve II (= Wertstufe 1,7) „stark belastet“ und „Wert des Sediments gering“.

Für ein Sediment aus der mittleren Weser (1989) (→ Tabelle 4) berechnet man aus den Analysenergebnissen über die Wertstufen A und die Wichtung B zunächst für jedes Element den partiellen Index A^B und daraus durch Multiplikation den gesuchten Sediment-Qualitäts-Index $SQI = 1,80$. Das Gesamturteil heißt „stark bis sehr stark belastet“. Tabelle 4 ist im einzelnen zu entnehmen, welches die besonders kritisch belasteten Elemente sind: aufgrund der Wertstufe A sowie nach erfolgter Wichtung sind es Cadmium,

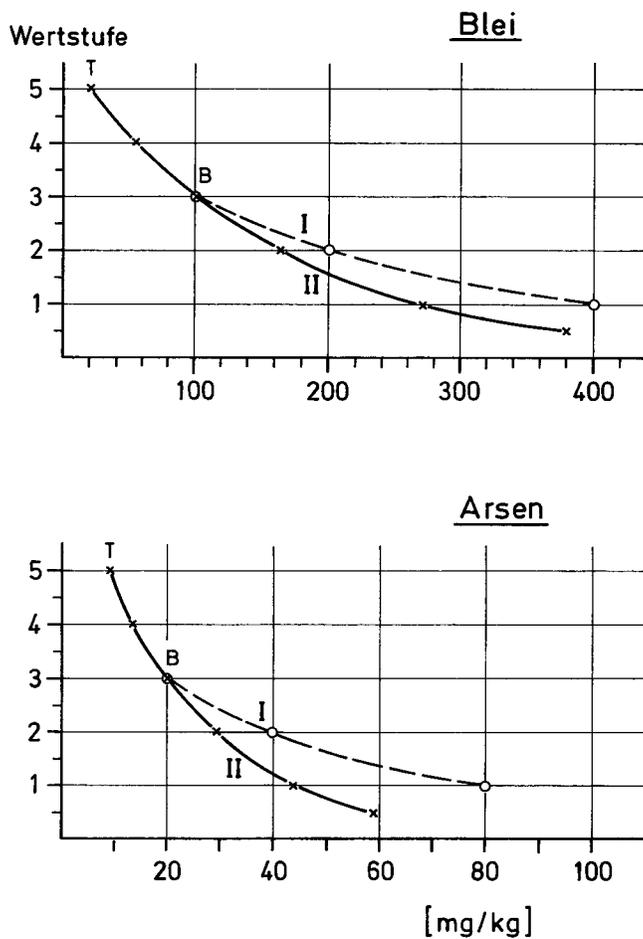


Abb. 5: Wie Abb. 2, Belastung durch Blei und Arsen

Tabelle 4: Beispiel Weser-Sediment

	mg/kg	Wertstufe A	Wichtung B	A ^B
Blei	70	3,7	0,08	1,11
Cadmium	9,2	0,5	0,25	0,84
Chrom	83	3,5	0,06	1,08
Kupfer	90	2,0	0,13	1,09
Nickel	60	3,3	0,08	1,10
Quecksilber	1,2	2,8	0,25	1,29
Zink	391	1,9	0,10	1,07
Arsen	9	4,9	0,05	1,08

Gesamturteil: stark (-sehr) belastet SQI 1,80

A^B = partieller Qualitätsindex
 SQI = Sediment-Qualitätsindex

Kupfer und Zink. Besondere „Wertträger“ wie das Arsen wirken sich wegen der niedrigen Wichtung nicht positiv auf das Gesamtergebnis aus.

In Tabelle 5 geht es um die Beschaffenheit von Neckar-Hochflutablagerungen. Das Material erweist sich als „mäßig bis schwach belastet“.

Zu dem günstigen Befund tragen hier vor allem die niedrigen Cadmium- und Quecksilber-Konzentrationen bei.

Tabelle 5: Beispiel Neckar-Sediment

	mg/kg	Wertstufe A	Wichtung B	A ^B
Blei	46	4,3	0,08	1,12
Cadmium	1,5	3,0	0,25	1,32
Chrom	90	5,0	0,06	1,10
Kupfer	79	2,3	0,13	1,11
Nickel	39	5,0	0,08	1,13
Quecksilber	0,21	5,0	0,25	1,50
Zink	249	2,4	0,10	1,09
Arsen	18	3,2	0,05	1,06

Gesamturteil: mäßig-schwach belastet

SQI 3,53

A^B = partieller Qualitätsindex
 SQI = Sediment-Qualitätsindex

3.2 Schwebstoffe

Da Sedimente aus Schwebstoffen entstehen und resuspendierte Sedimente wieder zu Schwebstoffen werden, lag es nahe, auch letztere in die Bewertung einzubeziehen. In Tabelle 6 handelt es sich um Schwebstoffe aus Bundeswasserstraßen, die 1982 – 1984 in automatischen Entnahmestationen gesammelt wurden. Die Ergebnisse der Schwermetallanalyse wurden auf die Feinkornfraktion genormt und im Detail in [15] publiziert. Da das Arsen hier fehlt, mußten die Zahlen für die Wichtung etwas geändert werden. Die B-Werte wurden für Blei, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink um 0,01 erhöht. In Tabelle 6 sind die aus den Bewertungskurven entnommenen Wertstufen, der partielle Index A^B für jedes Metall sowie das Gesamtergebnis enthalten. Der Überblick zeigt, daß damals die Schwebstoffe überwiegend „stark bis sehr stark“ belastet waren. Ausgenommen sind die Proben von der Küste bei Tönning (SQI = 4,25) und aus der unteren Ems bei Terborg (SQI = 3,31). „Sehr hoch belastet“ ist die Elbe (SQI = 0,73 und 1,39), gefolgt von der mittleren Weser bei Höxter, der unteren Weser und dem Mittel- und Niederrhein. Das Resultat entspricht dem allgemeinen chemischen und biologischen Gütebild der Gewässer.

Im einzelnen gibt Tabelle 6 Auskunft, welche Schwermetalle besondere Probleme verursachen, am wenigsten ist dies bei Chrom der Fall, während Cadmium und Kupfer sich weit verbreitet überwiegend negativ auswirken, noch übertroffen von Zink. Quecksilber ist nur an wenigen Stellen (untere Elbe, Rhein) problematisch.

Da die als Dezimal-Stelle aufgeführten Zahlen die Einordnung erschweren, wird vorgeschlagen, die Bereiche wie folgt abzustecken: 4,5 bis 5 (= 5), 3,8 bis 4,4 (= 4), 2,8 bis 3,7 (= 3) und 1,8 bis 2,7 (= 2).

Tabelle 6: Sedimentqualitäts-Index, übertragen bzw. abgeleitet für die Schwebstoffe aus automatischen Entnahmestationen 1982/84 nach [15]

Entnahmestelle	Blei		Cadmium		Chrom		Kupfer		Nickel		Quecksilber		Zink		Σ
	A	A ^B	A	A ^B	A	A ^B	A	A ^B	A	A ^B	A	A ^B	A	A ^B	
1 Tönning	3,6	1,12	4,4	1,45	5,0	1,12	5,0	1,25	5,0	1,16	4,3	1,44	2,8	1,12	4,25
2 Wedel	2,8	1,10	2,2	1,22	3,6	1,09	2,0	1,10	2,3	1,08	0,4	0,80	1,0	1,00	1,39
3 Geesthacht	2,1	1,07	0,9	0,97	2,2	1,06	0,9	0,98	2,0	1,06	0,2	0,69	0,5	0,93	0,73
4 Terborg	4,1	1,14	2,2	1,22	3,9	1,10	5,0	1,25	3,2	1,11	3,9	1,40	2,7	1,12	3,31
5 Rheine	4,2	1,14	2,2	1,22	4,0	1,10	2,3	1,12	2,8	1,10	4,3	1,44	1,4	1,04	2,82
3 Langwedel	1,5	1,04	0,4	0,80	3,2	1,08	1,4	1,38	2,0	1,06	3,9	1,40	0,9	0,99	1,82
7 Rinteln	3,0	1,10	0,4	0,80	3,0	1,08	1,4	1,38	1,5	1,04	3,9	1,40	1,1	1,01	1,93
8 Höxter	3,3	1,11	0,4	0,80	3,4	1,09	1,6	1,07	1,9	1,06	4,3	1,44	0,9	0,99	1,56
9 Trier	1,6	1,04	3,6	1,38	3,2	1,08	2,7	1,15	2,8	1,10	4,5	1,46	0,8	0,98	2,79
10 Garstadt	2,7	1,09	2,3	1,23	3,8	1,10	1,3	1,04	2,1	1,11	3,4	1,35	1,4	1,04	2,39
11 Rockenau	2,7	1,09	1,2	1,05	2,7	1,07	1,5	1,06	2,0	1,06	3,9	1,40	1,2	1,05	2,02
12 Obertürkheim	2,7	1,09	2,0	1,19	3,7	1,10	1,7	1,08	2,3	1,08	4,0	1,41	0,4	0,90	2,11
13 Vilshofen	3,0	1,10	1,9	1,17	3,0	1,08	2,0	1,10	2,6	1,09	3,8	1,40	1,2	1,05	2,45
14 Regensburg	3,3	1,11	1,6	1,12	3,7	1,10	2,2	1,12	2,5	1,08	3,0	1,32	1,0	1,01	2,2
15 Bockum	2,1	1,07	1,9	1,17	2,4	1,06	1,9	1,09	1,8	1,05	2,2	1,22	1,0	0,98	1,8
16 Schierstein	2,3	1,08	1,6	1,12	3,0	1,08	1,5	1,06	1,9	1,06	2,1	1,10	1,1	1,01	1,78
17 Worms	2,5	1,08	2,0	1,19	2,2	1,06	1,2	1,02	1,6	1,04	2,0	1,19	1,2	1,05	1,82
18 Breisach	3,3	1,11	3,7	1,39	3,0	1,08	2,0	1,10	1,5	1,04	3,2	1,34	2,2	1,09	2,78

A = Wertstufe

B = Wichtung

A^B = partieller Qualitätsindex

SQI = (integraler) Sediment-Qualitätsindex

4 Weitere Bewertungsansätze

Wenn die 70er Jahre weltweit als die Periode der umfassenden Analyse von Sedimenten auf Schwermetalle bezeichnet werden, stehen die 80er Jahre im Zeichen der Suche nach einem Bewertungsschema.

4.1 Der Geoakkumulations-Index (nach MÜLLER [16])

MÜLLER (1979) untersuchte am Neckar die Probleme, die Cadmium-belastete Sedimente bei der „Bodenverbesserung“ in Weinbergen verursachen [16]. Auch für ihn waren die von den Wasserwerken eingeführten „Indizes zur Bewertung der Wasserqualität“ Anlaß, einen Index zur Beurteilung der Sedimentablagerungen, d. h. der Sedimentqualität, vorzuschlagen. Der „Geoakkumulations-Index“ ist in gleicher Weise für Böden verwendbar [14, 16]. Ausgangspunkt ist der Tonstandard, der mit dem Faktor 1,5 versehen wird, „um den lithographischen Abweichungen gerecht zu werden“. Jede Verdoppelung bedeutet die Obergrenze einer neuen Klasse, von denen MÜLLER sieben (0 – 6) den sieben IAWR-Güteklassen

(1 – 4) gegenüberstellt, von „praktisch unbelastet“ (I_{Geo}-Klasse 0) bis „übermäßig belastet“ (I_{Geo}-Klasse 6). Die höchste Stufe stellt eine mehr als 100fache Anhebung des Hintergrundwertes dar.

Wird also der Schwermetallgehalt eines Sediments, z.B. 3 mg Cadmium/kg, durch den Hintergrundwert 0,45 dividiert, so stellt der Quotient ein Mehrfaches der Zahl 2, den I_{Geo}-Wert dar:

$$2^{I_{Geo}} = \frac{3}{0,45}; I_{Geo} = 2,7$$

I_{Geo} = Geoakkumulationsindex

I_{Geo} = 2,7 fällt in die I_{Geo}-Klasse 3 und bedeutet „mäßig bis stark belastet“.

Wie FÖRSTNER bereits 1981 bemerkte, geben diese Geo-Indices *per se* als Anreicherungs-faktoren „kaum schlüssige Hinweise für die Bewertungsfrage“ [17], und auch der Bezug zu den wichtigen Bodengrenzwerten fehlt. Entsprechend seien die analogen Konzentrationskriterien der „U.S. Federal Water Quality Administration“ für Metalle im Baggergut wieder aufgegeben worden (zit. nach [17]).

FÖRSTNER macht allerdings zu Recht darauf aufmerksam, daß mit der Anreicherung meist auch die Verfügbarkeit zunimmt, so daß über eine **Gewichtung** der einzelnen Metalle (nach Toxizität und Bindungsfestigkeit) auch der Akkumulations-Index eine Abschätzung der Umweltverträglichkeit ermöglichen könnte.

FÖRSTNER diskutierte zur Bewertung der **Umweltverträglichkeit von Schlämmen** folgende Ansätze [17]:

- Natürliche Hintergrundwerte
- Anthropogene Metallanreicherungen
- Sediment/Wasser-Beziehungen
- Auslaug-Tests mit Wasser
- Chemische Extraktion von Metallen aus Feststoffen
- Biologische Testverfahren

4.2 Normenentwurf der Niederlande

[6, Tabelle 3]

Es werden Zielwerte (langfristig), Standard- und Grenzwerte fixiert, die jedoch nicht ökologisch begründet wurden. FÖRSTNER sichtet diese Vorschläge kritisch und kommt teilweise zu etwas abweichenden Zahlen in [6, Tabelle 4].

4.4 Weitere Vorschläge

Weitere Vorschläge von Kollegen vereinigen verschiedene im Raum stehende Grenz- und Richtwerte. Die Hintergrund- und Bodengrenzwerte stehen wie bei dem hier diskutierten Vorschlag, letztere verknüpft mit der Wertstufe 4. Die niedrigeren Wertstufen gründen auf den Werten der Holland-Liste und auf den Klärschlamm-Grenzwerten. Sie scheinen uns für die Verhältnisse in aquatischen Sedimenten zu großzügig und – jedenfalls in den Gewässern der Alten Bundesländer – zumeist jenseits der dort noch auftretenden Konzentrationen.

Es existieren zahlreiche weitere Listen mit Grenz-, Richt- und Prüfwerten, denen aber die notwendige Bewertungsgrundlage abgeht.

4.5 „Handlungsanweisung“ [18]

Es werden Richtwerte definiert. Diese leiten sich aus den derzeit vorliegenden Schadstoffkonzentrationen in Wattenmeersedimenten der Nordsee ab. Um gewisse Unsicherheiten mit einzuschließen (vgl. MÜLLER [16]), werden diese mit dem Faktor 1,5 versehen und als Richtwert (RW) definiert. Die Zahlen für die Schwermetalle sind auf die Feinkornfraktion < 20 µm bezogen.

Im Hinblick auf die **Oslo-Helsinki-Richtlinien** werden nach [18] drei Stufen bzw. Fälle unterschieden: *Im Fall 1* gehen die Schwermetallwerte bis zum Richtwert, *im Fall 2* sind sie größer als dieser aber kleiner als das 5fache, *im Falle 3* überschreiten sie das 5fache des RW. Nach diesen drei Fällen soll nicht nur der zeitliche Meßaufwand geregelt werden, sondern auch der weitere Handlungsbedarf:

- Fall 1: Das Baggergut ist nicht bis wenig belastet und kann überall im Geltungsbereich der Konvention umgelagert werden.
 Fall 2: Bei einer Umlagerung sind bestimmte Maßnahmen erforderlich.

Fall 3: Es sind weitere Untersuchungen und Maßnahmen notwendig.

Die Basis dieser Bewertung wurde vom UBA kritisiert [19]. Das Amt schlägt vielmehr den geochemischen Hintergrundwert als Grundlage (= Referenzsituation) vor. Das Doppelte (= mäßig belastet) ist als „Zielvorgabe“ und Zielkriterium vorgesehen. Schutzgut ist nach dem UBA die aquatische Lebensgemeinschaft im limnischen Bereich.

4.6 Vorschlag ROCKER [20]

Auch das Anliegen von ROCKER (1993) ist nicht primär das Sediment, sondern die aquatische Lebensgemeinschaft als Schutzgut [20]. Er sucht dazu ein Klassifizierungssystem für chemische Kenngrößen und fordert, daß die Klasseneinteilung mit der des biologischen Saprobien-systems identisch sein muß. Außerdem sollen die auf den NOEC-Werten des „Bund-Länder-Arbeitskreises Qualitätsziel (BLAK QZ)“ beruhenden Zielvorgaben [21] der Klasse II entsprechen. Drittens ist das „Spreizungsmaß“, d.h. der Faktor von Klasse zu Klasse und die Klassenbreite, logisch zu begründen.

Neu ist der Vorschlag von ROCKER, die Spreizungsfaktoren aus dem Verhältnis akute Toxizität zur Zielvorgabe abzuleiten. Die akute Toxizität ist in den Stoffblättern des BLAK QZ für die empfindlichste wasserrelevante Art angegeben (leider nicht für Schwermetalle, sondern für organische Schadstoffe). Die akute Schwermetall-Toxizität sollte der fiktiven, im ursprünglichen System nicht vorgesehenen Klasse IV zugeordnet werden.

Da vier Klassen „zu bedienen“ sind, lautet die Formel für den Spreizungsfaktor:

$$F_{sp} = \sqrt[4]{\frac{C_{AT}}{C_{ZV}}}$$

C = Stoffkonzentration
 F_{sp} = Spreizungsfaktor
 AT = akute Toxizität
 ZV = Zielvorgabe

Beispiele werden für organische Einzelstoffe durchgerechnet [20, Tabelle]. Bemerkenswert ist, daß der Spreizungsfaktor in aller Regel um 2 liegt (womit die von MÜLLER [16] und vom Autor dieses Beitrages vorgeschlagenen ad-hoc definierten Faktoren eine gewisse Plausibilität erhalten könnten).

Offen ist noch die Frage der Güteklasse I. Es werden mehrere Lösungen vorgeschlagen, u.a. den heute ubiquitären Pegel als Zahlenwerte einzusetzen.

4.7 Planungsgruppe grün (UVU Unterweser)

Der historische Zustand der Unterweser von 1880 soll per Definition die Wertstufe I als rekonstruierte Grundbelastung erhalten [22]. Die Skalierung erfolgt in Anlehnung an die LAWA-Güteklassen siebenstufig. Stufe II als „gering belastet“ bedeutet den Vorsorge- und Schutzwert, Stufe III (mäßig belastet) bereits den Sanierungswert. Bei Stufe VI (akute Toxizität) sind ökologische Auswirkungen möglich. Ausgewählt werden einige klassische Parameter und die Schwermetalle Blei und Cadmium.

Die Toxizitäts-Daten der Schwermetalle basieren auf der gelösten Spezies. Sie werden unter bestimmten Annahmen wie Schwebstoffkonzentration und 20 μm -Fraktion auf die Schwebstoffe umgelegt und dann auf die Sedimente übertragen (vgl. [21]). Als Wertstufe I fungiert der geochemische Hintergrundwert, bezeichnet als **Grundbelastung**. Die Einteilung der Klassen und -breiten ist etwas willkürlich und nicht so durchsichtig wie bei ROCKER. Stufe III bedeutet im Mittel etwa den Bodengrenzwert, Stufe IV annähernd das Doppelte und Stufe V im Mittel ebenfalls ca. das Zweifache.

5 Kritischer Rückblick

Die Aufstellung eines Bewertungsschemas wie auch eines Güteindex setzt einige grundlegende Definitionen voraus. Zunächst sollte klar gestellt werden, was unter „Schutzgut“ und „Schutzziel“ zu verstehen ist. Die eingangs gestellte Frage nach der Bewertung von 3 mg Cadmium/kg Sediment z.B. ist ohne Benennung von Schutzgut und evtl. Nutzung nicht zu beantworten. Das heißt nicht, daß man nicht eine nützliche **Beschreibung der Belastung** geben könnte (vgl. [16]). Wie die Literatur zeigt, betreffen derzeit die meisten Ansätze die aquatische Lebensgemeinschaft als Schutzgut.

Schwierig ist die **Festlegung der Parameter** (Indikatoren), mit deren Hilfe der Istzustand bewertet werden soll. (Nach [22] werden die beiden Schwermetalle Cadmium und Blei für ausreichend erachtet, um damit die Unterweser zu beurteilen.) Schließlich müssen **Systemzustände** (= Klassen oder Wertstufen) definiert werden, und zwar nach Anzahl und Klassenbreite. Die UVU in der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz stützen sich auf fünf Wertstufen; Literaturbeiträge zum aquatischen Ökosystem halten sieben Stufen für angebracht, ROCKER vier und eine hypothetische (neben einigen Zwischenstufen).

Für jedes derartige System benötigt man zwei Fixpunkte: einen im positiven Bereich und einen am negativen Ende. Der Natur wird das Prädikat „unbelastet“ (= Stufe I) zuerkannt. Das entspricht dem Tongesteinsstandard bei den Schwermetallen. Stufe II wird gerne als Qualitätsziel, gewünschter Zustand oder Leitbild (= schwach belastet) [22] eingeordnet.

Am negativen Ende befinden sich die Stoffkonzentrationen mit akuter Toxizität gegenüber den Wasserorganismen. Über die Klassenbreiten (von . . . bis) wird meist subjektiv mit dem Faktor 2 entschieden (\rightarrow Kap. 2.2. [16,22]). Selbst der noch am weitesten wissenschaftlich fundierte Ansatz [20] enthält willkürliche Elemente.

Über den Aufbau eines solchen Bewertungsschemas besteht weitgehende Übereinstimmung; die Schwierigkeiten liegen im Detail.

So ist nicht zu übersehen, daß die plausibelsten Ansätze nur die gelösten organischen Stoffe betreffen [20, 21]. Als Referenzpunkte dienen die NOEC-Werte und die der akuten Toxizität [20, 21]. Da solche Daten für die Schwermetalle nicht vorliegen, greift man im Einzelfall auf die Bodengrenzwerte zurück und legitimiert sie für die Sedimente im aquatischen Milieu [22]. Sobald man einen engen Zusammenhang zwischen der Belastung der Sedimente und dem (Güte-)Zustand

der fließenden Welle postuliert, verläßt man den sicheren Boden der Wissenschaft, denn daß die Sedimente den Zustand des Gewässers widerspiegeln [23], gilt keinesweg pauschal für Fließgewässer.

Der in Kap. 2.3 abgeleitete Sediment-Qualitätsindex gründet auf der Nutzung der Sedimente an Land als Boden sowie dem Bodengrenzwert als der Wertstufe 3. Er umgreift außerdem den Naturzustand (Tonstandard) als Wertstufe 5 (nach [20] Wertstufe I). Abgeleitet wird die sich zwanglos ergebende Wertstufe 4 (II). Stufe 3 (III) könnte als „sanierungsbedürftig“ bezeichnet werden. Die weiteren Wertstufen werden jeweils durch Verdoppelung erhalten, wie schon bei [16, 22], und bei [20] über die Stufe VI entsprechend der akuten Toxizität.

Obwohl in Ermangelung geeigneter biologischer Testergebnisse die Wertstufen von uns auf die Verwendung der Sedimente als „Boden“ bezogen werden, dürfte sich doch erweisen, daß dieses Wertesystem wesentlich strenger ist, als es nach einer Ableitung aus toxikologischen Daten im Gewässer sein würde (um dies festzustellen, genügt ein Blick auf die Trinkwasserstandards). Auch orientieren sich die Zielvorgaben für Schwebstoffe/Sedimente des BLAK QZ weitgehend an den Bodengrenzwerten (= Wertstufe 3).

Die Möglichkeit, die einzelnen Schwermetalle gegeneinander zu wichten (\rightarrow Kap. 2.3) und schließlich eine einzige Zahl als „integrale Bewertung“ zu berechnen, sollte u.E. mit Blick auf die verschiedenen Schutzgüter und -ziele im Auge behalten werden; denn nach wie vor fehlt ein begründeter Zusammenhang zwischen der Schwermetallbelastung der Sedimente und den Auswirkungen auf die Schutzgüter.

6 Zusammenfassung

Die Bewertung der Schwermetall-Belastung von Sedimenten wird gefordert im Rahmen von Umweltverträglichkeitsuntersuchungen; darüber hinaus allgemein zur Charakterisierung des Gütezustandes des Gewässers.

Bemühungen, analog zum Saprobien-System auf biologischer Grundlage die Bewertung vorzunehmen, scheitern an der fehlenden Datenbasis. Es kommt hinzu, daß je nach Schutzgut und -ziel sowie nutzungsbezogen bewertet werden muß.

Bei dieser Sachlage werden häufig die Bodengrenzwerte als ein Bewertungskriterium herangezogen. Vorstehend wurden diese mit dem Tonstandard zu einem ausbaufähigen System verknüpft, mit dessen Hilfe die Wertstufen (= Güteklassen) 1 – 5 abgeleitet werden konnten. Verbunden mit einer (subjektiven) Wichtung der Schwermetalle und des Arsen läßt sich aus den partiellen Indices der geometrisch gewichtete Index der integrierten Wertstufe berechnen.

Das Bemühen um ein Bewertungsschema hat zumeist das Schutzgut „Aquatische Lebensgemeinschaft“ zum Ziel.

7 Literatur

- [1] F. ACKERMANN: A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of estuarine and coastal sediments. *Envir. Techn. Lett.* 1, 518 – 527 (1980)
- [2] K. K. TUREKIAN; K. H. WEDEPOHL: Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Bull. Geol. Soc. Am.* 72, 175 – 192 (1961)
- [3] H. FAUTH; R. HINDEL; U. SIEWERS; J. ZINNER: Geochemischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland. Verteilung von Schwermetallen in Wässern und Bachsedimenten. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1985
- [4] G. MÜLLER: Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veränderungen seit 1971. *Umschau* 79, 778 – 783 (1979)
- [5] U. FÖRSTNER und weitere: Qualitätskriterien für Gewässersedimente – Allgemeine Problematik und internationaler Stand der Diskussion. *Z. Wasser- und Abwasser-Forsch.* 20, 54 – 59 (1987)
- [6] U. FÖRSTNER; W. AHLF; W. CALMANO: Entwicklung von Qualitätskriterien für Gewässersedimente. In: *Wasser-Kalender 1990*, S. 92 – 114. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1989
- [7] U. FÖRSTNER; W. AHLF; W. CALMANO; M. KERSTEN: Entwicklung von Sedimentsqualitätskriterien, insbesondere für die Umlagerung in Gewässern. 3. Magdeburger Gewässerschutzseminar: Zur Belastung der Elbe 28. – 30. Nov. 1990. Tagungsband GKSS 90/E/43:156 – 163 (1990)
- [8] H. BERGMANN: Internationale Richtlinien für das Verklappen von Baggergut an der Küste. *Schiff & Hafen/Seewirtschaft* 11, 103 – 105 (1991) zit. n. [9]
- [9] F. KREBS: Ökotoxikologische Untersuchung von Sedimenten. In: *Ökologisch verträgliche Unterbringung von Baggergut im Küstenbereich*. 1. Grundseminar. Tagungsband. Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz 1992
- [10] U. FÖRSTNER: Contaminated Sediments. Springer Verlag, Berlin 1989. (Lecture Notes in Earth Science 21)
- [11] Biochemische Methoden zur Schadstofffassung im Wasser. Hrsg. Fachgruppe Wasserchemie in der GDCh. VCH Weinheim 1993
- [12] K. H. LINDNER: Neuer rechtlicher und technischer Rahmen für die Klärschlamm-Entsorgung. *Korrespondenz Abwasser* 38, 1046 – 1049 (1991)
- [13] Bewertungsverfahren in der Umweltverträglichkeitsuntersuchung. Zwischenbericht. Arbeitsgruppe dito. Hrsg. BfG, Koblenz, 1992
- [14] E. BACH: Ein chemischer Index zur Überwachung der Wasserqualität von Fließgewässern, *DGM* 24, 102 – 106 (1980)
- [15] H. HELLMANN: Schwermetallgehalte der Feinkornfraktion (< 20 µm-Fraktion) von Schwebstoffen aus automatischen Entnahmestationen – Normierung über das Referenzelement Eisen. *Z. Wasser- und Abwasser-Forsch.* 25, 215 – 228 (1992)
- [16] G. MÜLLER: Cadmium in Schlämmen – alte und neue Probleme. *Naturwissenschaften* 66, 359 – 360 (1979)
- [17] U. FÖRSTNER: Umweltchemische Analyse und Bewertung von metallkontaminierten Schlämmen. *Chemiker Z.* 105, 165 – 173 (1981)
- [18] Bundesanstalt für Gewässerkunde: Anwendung der Baggergut-Richtlinien der Oslo- und der Helsinki-Kommission in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (HABAK-WSV). BfG – 0700, Koblenz 1992
- [19] Stellungnahme des Umweltbundesamtes zum Baggergut-Konzept Schleswig-Holstein und der Baggergut-Handlungsanweisung der BfG. *Schreiben Z.* III 3.1-20201-5/25 vom 14. 4. 1993
- [20] W. ROCKER: Physikalisch-chemische Ansätze zur Gewässergüteklassifizierung und Qualitätsanforderungen an Oberflächengewässer als Hilfsmittel der Wasserwirtschaft. Vortrag WASSER BERLIN 1993
- [21] Bund/Länder-Arbeitskreis „Qualitätsziele“ (BLAK QZ): Konzeption zur Ableitung von Qualitätszielen zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen. Stand: 10. 10. 89. Bonn 1989
- [22] Planungsgruppe grün: Der ökologische Zustand der Unterweser. Entwicklung und Anwendung eines Bewertungssystems. Studie im Auftrag des Senators für Umweltschutz und Standortentwicklung der Freien Hansestadt Bremen. Bremen 1993
- [23] H. ZÜLLIG: Sedimente als Ausdruck des Zustandes eines Gewässers. *Schweiz. Z. Hydrol.* 18, 7 – 143 (1956)

Kurznachrichten

MAK-Werte-Liste 1993

Die Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe hat sich mit der krebserzeugenden Wirkung von Fasern, die als Asbestersatzstoffe eingesetzt werden können, beschäftigt. Nach umfangreichen Beratungen in der Kommission ist für die MAK- und BAT-Werte-Liste von 1993 eine Einstufung vorgenommen worden.

Im Abschnitt „Krebserzeugende Arbeitsstoffe“ wurde unter den besonderen Stoffgruppen ein Kapitel über „Faserstäube“ neu aufgenommen. Es enthält allgemeine Grundlagen und kurze Begründungen für die Einstufung in die Gruppen A1, A2, eine neue Gruppe „als ob A2“, B oder für die Aufstellung eines MAK-Wertes. Der MAK-Wert ist die höchst-zulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes als Gas, Dampf

oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz, die nach gegenwärtigem Kenntnisstand auch bei langfristiger, täglich achtstündiger Exposition die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt. Für krebserzeugende Arbeitsstoffe können keine gesundheitlich unbedenklichen Grenzwerte aufgestellt werden. Diese Stoffe werden in die Gruppen A1, d.h. beim Menschen krebserzeugend, oder A2, d.h. im Tierversuch krebserzeugend, oder B, d.h. begründeter Verdacht auf krebserzeugendes Potential, eingestuft.

17 anorganische Faserstäube wurden neu eingestuft:

Erionit in die Gruppe A1, Aluminiumoxid, Attapulgit/Palygorskit, Kaliumtitanatverbindungen und Keramikfasern in die Gruppe A2, Dawsonit, Glasfasern, Siliciumcarbid und Steinwolle in die Gruppe „als ob A2“,

Calcium-Natrium-Metaphosphat, Halloysit, Magnesium-Oxid-Sulfat, Nematolith/Brucit, Schlackenwolle und Sepiolith in Gruppe B.

Für Calciumsulfat (Gips) wurde ein MAK-Wert von 6 mg/m³ (als Feinstaub) aufgestellt. Für Wollastonit wird die Aufstellung eines MAK-Wertes erwogen. Alle weiteren anorganischen Faserstäube werden der Gruppe B zugeordnet.

Von den organischen Faserstäuben wurde p-Aramid in Gruppe B eingestuft, während die Diskussion um die Einstufung weiterer organischer Faserstäube noch nicht abgeschlossen werden konnte.

Senatskommission der Deutschen
Forschungsgemeinschaft
Zur Prüfung gesundheitsschädlicher
Arbeitsstoffe
Vorsitz: Prof. Dr. med. H. Greim