

Ulrich Förstner · Peter Grathwohl



Ingenieur- geochemie

Technische Geochemie – Konzepte und Praxis

2., neu bearbeitete Auflage

 Springer

VDI

Ulrich Förstner · Peter Grathwohl



Ingenieur- geochemie

Technische Geochemie – Konzepte und Praxis

2., neu bearbeitete Auflage

 Springer

VDI

Ulrich Förstner · Peter Grathwohl

Ingenieurgeochemie

Ulrich Förstner · Peter Grathwohl

Ingenieurgeochemie

Technische Geochemie – Konzepte und Praxis

*Unter Mitarbeit von Hermann Rügner, Umweltforschungszentrum Halle-Leipzig,
Joachim Gerth und Sven-Olaf Ipsen, Technische Universität Hamburg-Harburg,
Günther Hirschmann, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg,
Michael Paul, Wismut GmbH Chemnitz, Patrick Jacobs, Tauw GmbH Berlin,
Susanne Heise, TuTech Innovation GmbH Hamburg,
Johannes Barth und Tilman Gocht, Universität Tübingen,
Bernd Susset, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen Düsseldorf,
Volker Birke, Universität Lüneburg*

2., neu bearbeitete Auflage
mit 160 Abbildungen und CD-ROM

 Springer

Prof. Dr. Ulrich Förstner
Technische Universität Hamburg-Haburg
Institut für Umwelttechnik
und Energiewirtschaft
Eißendorfer Str. 40
21073 Hamburg
u.foerstner@tu-harburg.de

Prof. Dr. Peter Grathwohl
Universität Tübingen
Geologisches Institut
Sigwartstr. 10
72076 Tübingen
grathwohl@uni-tuebingen.de

Bibliografische Information der Deutsche Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN-10 3-540-39511-3 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-13 978-3-540-39511-9 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-10 3-540-57005-5 1. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist nicht Urheber der Daten und Programme. Weder Springer noch der Autor übernehmen die Haftung für die CD-ROM und das Buch, einschließlich ihrer Qualität, Handels- und Anwendungseignung. In keinem Fall übernehmen Springer oder der Autor Haftung für direkte, indirekte, zufällige oder Folgeschäden, die sich aus der Nutzung der CD-ROM oder des Buches ergeben.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003, 2007

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Digitale Druckvorlage der Autoren
Herstellung: LE-TeX, Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Umschlaggestaltung: WMXDesign, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3100 YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Dieses Buch beschreibt die Theorie und Praxis der Technischen Geochemie:

1. Fortschrittliche geochemische Problemlösungen sind dem Prinzip der Nachhaltigkeit verpflichtet und beinhalten entsprechende Risikoabschätzungen, vor allem Langzeitprognosen (Kapitel 1)
2. Das Verständnis natürlicher Prozesse und ihrer Wechselwirkungen in komplexen Systemen (Kapitel 2) ist die Grundlage kostengünstiger *in-situ*-Methoden im Grundwasser- und Bodenschutz und bei der flussgebietsübergreifenden Verbesserung der Gewässergüte (Kapitel 3).

Naturnahe Technologien finden gerade in den wirtschaftlich schwierigen Zeiten eine zunehmende Aufmerksamkeit, was sich aus dem Ausgaben für die öffentlichen Forschungsförderung ablesen lässt. Die erste Auflage umfasste bereits vier Gastbeiträge zu abgeschlossenen bzw. laufenden Förderaktivitäten der Bundesrepublik Deutschland für ingenieurgeochemisch orientierte Projekte:

- Das Programm „Sickerwasserprognose“ des BMBF und BMU (2001–2006; ca. 13 Mio €), erarbeitet die wissenschaftlichen Grundlagen für die weitere Umsetzung der Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Der Beitrag von *Dr. Joachim Gerth* (TUHH) befasst sich mit Verfahrensentwicklungen zur Ermittlung der Quellstärke für anorganische Schadstoffe (Abschn. 3.1; neu: Juli 2006).
- Aus dem BMBF-Verbundprojekt „Deponiekörper“ (1993–1997; ca. 3,25 Mio €) stammt der Beitrag von *Dr.-Ing. Günther Hirschmann* (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg) über geochemische Ansätze zur Bewertung des Langzeitverhaltens von Schlacken aus der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen (Abschn. 3.2), dies ist ein zentraler Aspekt im späteren Verbund „Sickerwasserprognose“ (Abschn. 3.1 und 4.1).
- Die Rolle der Ingenieurgeochemie bei der Sanierung von Altbergaustandorten beschreibt der Beitrag von *Dr. Michael Paul* (Wismut GmbH) am Beispiel des weltweit größten Bergbausanierungsvorhabens, der Sanierung der Uranerzbergbau- und -aufbereitungsstandorte der ehemaligen SDAG Wismut in Thüringen und Sachsen (Abschn. 3.3). Dieser Beitrag schlägt auch die Brücke zu den internationalen Verbundprogrammen über Bergbaualtlasten, aus denen nach wie vor die entscheidenden Impulse für die Entwicklung geochemischer Stabilisierungstechniken stammen.
- Eine erfolgversprechende Problemlösung für kontaminierte Gewässersedimente ist das „subaquatische Depot mit aktivem Abdeckungssystem“, dessen Entwicklung im Rahmen einer australisch-deutschen Forschungsallianz vom BMBF gefördert wurde (1997–2001; 0,55 Mio €; Beitrag von *Dr.-Ing. Patrick Jacobs*). Abschn. 3.4 beschreibt auch den BMBF-Verbund „Feinsedimentdynamik und Schadstoffmobilität in Fließgewässern“ (SEDYMO, 2002–2006; ~3,1 Mio €) und das Projekt „Spittelwasser“ im BMBF-Verbund KORA (s.u.).

In der vorliegenden 2. Auflage der *Ingenieurgeochemie* finden sich weitere Beiträge zu europäischen und nationalen Großprojekten auf dem Gebiet der angewandten umweltgeochemischen Forschung:

- Im Mittelpunkt der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie stehen flussgebietsübergreifende Maßnahmen gegen prioritäre Substanzen, die u.a. aus historisch kontaminierten Sedimenten remobilisiert und verfrachtet werden. Im Abschn. 3.5 gibt *Dr. Susanne Heise* (TuTech Hamburg-Harburg) einen Überblick über die Situation in den Einzugsgebieten von Rhein und Elbe; die Fallstudien für den Port of Rotterdam und die Hamburg Port Authority sind – mit freundlicher Genehmigung durch die Auftraggeber – auf einer CD beigelegt.
- Das EU-Projekt AquaTerra (2004–2009; 13 Mio € „EU contribution“) soll zu einem verbesserten Prozessverständnis im System Boden-Grundwasser-Sediment beitragen. Die Übersicht in Abschn. 3.6 von *Dr. Johannes Barth* und *Dr. Tilman Gocht* (Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen) wird ergänzt durch Detaildarstellungen zeitlich integrierender Messmethoden aus den Unterprojekten FLUX und BIOGEOCHEM sowie der konzeptionellen Modelle für Schadstofffrachten.
- Das Kapitel 4 „Materialien“ informiert über die neuesten Entwicklungen in den BMBF-Verbundprogrammen „Sickerwasserprognose“ (siehe auch Abschn. 3.1) und RUBIN („Reinigungswände und -barrieren im Netzwerkverbund“, 2002–2006; ca. 3,7 Mio €) in Textbeiträgen und CD-Foliensätzen „Sickerwasserprognose für Altlasten und mineralische Materialien zur Verwertung“ von *Dr. Bernd Susset* (Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen) und Durchströmte Reinigungswände von *Dr. Volker Birke* (Universität Lüneburg).
- Die CD enthält auch eine Farbbildserie mit Text von *Dr. Hermann Rügner* und *Prof. Peter Grathwohl* (Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle und Universität Tübingen) zur Nutzung von Natural Attenuation-Prozessen bei der Altlastenbearbeitung. Diesen Themenkomplex bearbeitet auch der BMBF-Förderschwerpunkt KORA (kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden; 2002–2007, 20,2 Mio € BMBF-Förderung bei 25,4 Mio € Gesamtaufwendungen),

Dem herzlichen Dank an die Autoren dieser Beiträge schließt sich die Würdigung jener Kollegen an, die für dieses Arbeitsgebiet Pionierleistungen erbracht haben. An erster Stelle sind Prof. Wim Salomons und Prof. Olav Schuiling in den Niederlanden zu nennen, die Ende der achtziger Jahre das Gebiet konzeptionell und durch Praxisbeispiele definiert haben. In der Folge war es vor allem das Verdienst einer langfristigen Strategie der BMBF-Abteilung „Nachhaltigkeit in Produktion und Dienstleistung“, dass die Forschung in Deutschland dieses Gebiet in voller Breite und Tiefe erschließen konnte.

Unser Dank gilt Frau Barbara Eckhardt (Hamburg) und Frau Dr. Iris Madlener (Tübingen) für die Erstellung der Druckversion der Manuskripte. Wir danken dem Springer-Verlag und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lehnert für die Anregung, mit einer stark erweiterten 2. Auflage der *Ingenieurgeochemie* den raschen Fortschritt auf diesem jungen Forschungs- und Praxisgebiet zu dokumentieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Technische Geochemie – Konzepte und Praxis	1
	ULRICH FÖRSTNER	
1.1	Ingenieurgeochemie – Einführung	5
1.1.1	Fachliche Grundlagen der Ingenieurgeochemie.....	7
1.1.2	Definitionen und Fallbeispiele.....	8
1.1.2.1	Begriff „Ingenieurgeochemie“.....	8
1.1.2.2	Beispiele aus Forschung und Praxis.....	9
1.2	Geochemie im Leitbild „Nachhaltigkeit“	11
1.2.1	Kapazitätsgrenzen für Stoffflüsse.....	11
1.2.1.1	Stoffwirtschaftliche Prioritäten.....	12
1.2.1.2	Regionale Kapazitätsermittlung.....	14
1.2.2	Gekoppelte geochemische Systemfaktoren.....	15
1.2.2.1	Schadstofffreisetzung in verzögerten Prozessen.....	16
1.2.2.2	Geochemische Steuerfaktoren.....	18
1.2.2.3	Kapazitätsbestimmende Eigenschaften.....	20
1.2.2.4	Kopplung geochemischer Systemfaktoren.....	23
1.2.2.5	Messparameter für langfristige Prognosen.....	25
1.2.3	Geochemische Barrieren-Konzepte.....	25
1.2.3.1	Biologisch-geochemische Barrieren.....	27
1.2.3.2	Geochemische pH-Eh-Barrieren.....	27
1.2.3.3	Redoxzonen als Barrieren.....	29
1.2.3.4	Innere Barrieren-Systeme.....	31
1.2.3.5	Schadstoffrückhaltepotential.....	33
1.2.4	Leitbild „Endlagerqualität“.....	35
1.2.4.1	Reaktor- und Inertstoffdeponie.....	36
1.2.4.2	Langzeitprognosen für Deponie-Sickerwässer.....	38
1.2.5	Geowissenschaften und nachhaltige Abfallwirtschaft.....	39
1.2.5.1	Endlagerqualität, Verwertung und Nachhaltigkeit.....	40
1.2.5.2	Bewertung des Langzeitverhaltens von Abfall.....	41
1.2.5.3	Geochemische Kriterien für anthropogene Rohstofflager.....	41
1.2.6	Vortrag „Heilt die Zeit auch unsere Umweltschäden? Nachhaltigkeit aus der Sicht eines Geochemikers“.....	CD/471
1.3	Umweltchemie – Technologische Aspekte	43
1.3.1	Umweltchemische Konzepte.....	44
1.3.1.1	Übersicht Lehrbücher „Umweltchemie“.....	44
1.3.1.2	Zielsetzungen der Umweltchemie.....	47
1.3.1.3	„Diagnose“ und „Therapie“ bei Altlasten.....	48

1.3.1.4	Produktionsintegrierte Schadstoffminderung	52
1.3.1.5	Übergänge zur „äußeren Umwelt“	53
1.3.2	Umweltchemikalien und Stoffdynamik	55
1.3.2.1	Eigenschaften von Umweltchemikalien	56
1.3.2.2	Parameter der Stoffdynamik in der Umwelt	57
1.3.2.3	Bewertung der Grundwassergängigkeit	58
1.3.3	Schadstoffquellen und Belastungspfade	61
1.3.3.1	Skalen der Schadstoffausbreitung	62
1.3.3.2	Schadstoffe aus Abfallablagerungen	64
1.3.4	Medienübergreifende Schadstoffflüsse	66
1.4	Umweltgeochemie – Grundlagen und Anwendungen	69
1.4.1	Globale und regionale Stoffflüsse	69
1.4.1.1	Globale Stoffflüsse	70
1.4.1.2	Regionaler Stoffhaushalt – Beispiel Metalle	74
1.4.1.3	Sedimente als Verschmutzungsindikatoren	77
1.4.2	Untersuchung mobilisierender Einflussfaktoren	80
1.4.2.1	Schadstofftransport durch Kolloide	80
1.4.2.2	Remobilisierbarkeit von Schadstoffen	83
1.4.2.3	Langzeiteinflüsse auf kontaminierte Böden	86
1.4.3	Natürliche Demobilisierung von Schadstoffen	90
1.4.3.1	Organische Schadstoffe	91
1.4.3.2	Anorganische Schadstoffe	93
1.4.4	Chemische Bewertung kontaminierter Feststoffe	95
1.4.4.1	Strategien für Langzeitprognosen	96
1.4.4.2	Untersuchung und Bewertung von Alterungseffekten	97
1.4.4.3	Fazit für geochemische Untersuchungen	98
1.5	Ingenieurgeochemie und Abfallwirtschaft	99
1.5.1	Abfallvermeidung bei der Rohstoffgewinnung	99
1.5.1.1	Umweltbelastung durch Bergbau	100
1.5.1.2	Abfälle aus dem Erzbergbau	101
1.5.1.3	Abfallvermeidung bei der Aufbereitung	103
1.5.1.4	Nutzung der anthropogenen Lager	106
1.5.2	Langzeitstabilisierung von Abfall	109
1.5.2.1	Subaquatische Lagerung	111
1.5.2.2	Konditionierung von Abfallstoffen	114
1.5.2.3	Festlegung in Speichermineralen	116
1.5.2.4	Chemische und biologische Extraktion	120
1.5.2.5	Schmelzverfahren	121
1.5.2.6	Kostenvergleich der Verfahren	123
1.5.3	Ingenieurgeochemisches Handlungskonzept	124
1.5.3.1	Abfolge von Arbeitsschritten – Beispiel „Altbergbau“	125
1.5.3.2	Entwicklung eines Handlungskonzepts	127
	Literatur	133

2	Natürlicher Abbau und Rückhalt von Schadstoffen	151
	PETER GRATHWOHL	
2.1	Rückhalt/Sorption organischer Schadstoffe im Untergrund	151
2.1.1	Sorptionsmechanismen und -isothermen.....	151
2.1.2	Einfluss des natürlichen organischen Materials auf die Sorption.....	159
2.1.3	„Partitioning“ in natürlichem organischen Material.....	163
2.1.4	Sorption in heterogenen Materialien.....	167
2.1.5	Adsorption organischer Verbindungen durch Aktivkohlen.....	170
2.1.6	Sorptionskinetik.....	171
2.2	Stofftransport im Grundwasser	
	Advektion/Retardation, Dispersion, Abbau	178
2.2.1	Advektion und Retardation.....	178
2.2.2	Dispersion und Verdünnung.....	179
2.2.3	Schadstoffabbau: Stationäre Fahnen.....	187
2.2.4	Transportvermittlung: Kosolventen/DOC/Kolloide/Partikel.....	191
2.3	Schadstoff-Freisetzung (Desorptionskinetik, Lösungskinetik)	192
2.3.1	Stoffübergang zwischen mobiler und immobil Phase.....	193
2.3.2	Lösungskinetik feinverteilter residueller Phasen.....	197
2.3.3	Löslichkeit und Lösungskinetik.....	201
2.3.4	Schadstofflösung aus „Pools“.....	210
2.3.5	Schadstoff-Freisetzung durch diffusionskontrollierte Desorption.....	214
2.3.6	Rückdiffusion aus Geringleitern (Ton- und Kohlelagen).....	218
2.4	Zeitskalen im Schadensherd und Natural Attenuation	221
2.4.1	Zeitskalen der Lösung residueller Flüssigphasen.....	221
2.4.2	Diffusionslimitierte Desorption.....	224
2.4.3	Wirkung von Lösungsvermittlern zur beschleunigten Sanierung von Schadensherden.....	228
2.4.4	Fazit: „Natural Attenuation“ im Schadensherd.....	231
	Literatur	234
2.5	Nutzung von Natural Attenuation Prozessen bei der Altlasten- bearbeitung (HERMANN RÜGNER UND PETER GRATHWOHL)	CD/471
3	Ingenieurgeochemie im Boden- und Gewässerschutz – Praxisbeispiele und rechtlicher Rahmen	243
3.1	Sickerwasserprognose für anorganische Schadstoffe	
	JOACHIM GERTH.....	255
3.1.1	Anforderungen nach Bundes-Bodenschutzverordnung.....	255
3.1.1.1	Anwendungsbereich.....	255
3.1.1.2	Prüfwertkonzept.....	256
3.1.1.3	Möglichkeiten der Abschätzung nach BBodSchV.....	257

3.1.2	Materialuntersuchung.....	258
3.1.2.1	Verfahren nach BBodSchV.....	258
3.1.2.2	Verfahrensentwicklungen für anorganische Schadstoffe.....	260
3.1.2.3	Beispiele zur Quelltermittlung.....	263
3.1.3	Ergänzende Verfahren.....	270
3.2	Langzeitverhalten von Deponien	
	GÜNTHER HIRSCHMANN.....	273
3.2.1	Regelungen und Maßnahmen zur Emissionsminderung.....	274
3.2.1.1	Gesetzliche Regelungen für Deponien in Europa.....	274
3.2.1.2	Beschleunigte Stabilisierung der Deponieeinhalte.....	275
3.2.1.3	Mechanisch-biologische Vorbehandlung (MBV).....	277
3.2.2	Langzeitverhalten von organischen Deponien.....	279
3.2.2.1	Altdeponien.....	279
3.2.2.2	Langzeitversuche und Modellszenarien.....	280
3.2.2.3	MBV-Deponien.....	281
3.2.2.4	Managementkonzept für organische Deponien.....	281
3.2.3	Ablagerung von thermisch behandelten Abfällen.....	283
3.2.3.1	Charakterisierung von Müllverbrennungsschlacken.....	285
3.2.3.2	Untersuchung des Langzeitverhaltens.....	288
3.2.3.3	Perspektiven für die Schlacke-Deponierung.....	296
3.3	Geochemische In-situ-Stabilisierung von Bergbaualtlasten	
	MICHAEL PAUL.....	298
3.3.1	Grundlagen der Sauerwasserbildung.....	298
3.3.2	Prognose der Sickerwasserqualität.....	302
3.3.2.1	Statische Tests.....	302
3.3.2.2	Kinetische Tests.....	304
3.3.3	Technologien und Behandlungsmethoden für Sauerwässer bei der Ablagerung von Bergematerialien und Tailings.....	305
3.3.3.1	Überblick.....	305
3.3.3.2	Subaquatische Lagerung.....	307
3.3.3.3	Geringdurchlässige Abdeckungen, Einkapselung („dry covers“).....	308
3.3.3.4	Sauerstoffzehrende und reaktive Abdeckungen.....	309
3.3.3.5	Verschneiden von säuregenerierendem Gestein und Alkalienzugabe.....	310
3.3.3.6	Weitere Verfahren.....	311
3.3.3.7	Komplexe Ablagerungstechnologien.....	313
3.3.4	Verwahrung von Untertagebergwerken und Tagebauen.....	313
3.3.4.1	Grubenflutungen.....	313
3.3.4.2	Flutung von Tagebauen.....	316
3.3.5	Entwicklung umfassender Sanierungsstrategien – Das Fallbeispiel WISMUT.....	316
3.3.5.1	Projektüberblick.....	316
3.3.5.2	Probleme und Sanierungslösungen am Standort Ronneburg.....	318
3.3.5.3	Flutung der Ronneburger Grube.....	320
3.3.5.4	Haldensanierung und Tagebauverfüllung.....	321

3.3.5.5	Sanierung der industriellen Absetzanlagen.....	328
3.3.5.6	Verwahrung eines Untertage-Laugungsbergwerkes: Standort Königstein.....	328
3.4	Gewässersedimente und Baggergut	
	PATRICK JACOBS UND ULRICH FÖRSTNER.....	330
3.4.1	Integrierte Prozessstudien.....	331
3.4.1.1	Experimentiertechniken zur Simulation der Wechselwirkungen zwischen Hydrodynamik, Sedimentverhalten und Stoffsorption.....	331
3.4.1.2	Mikrobieller Umsatz von gelöstem und partikulärem Material.....	333
3.4.1.3	Gekoppelte biogeochemische Prozesse und Schadstoffmobilität.....	334
3.4.1.4	Modellierung des Sediment- und Schadstofftransports.....	335
3.4.1.5	Ansatz zu einem Forschungsverbund „Integrierte Prozessstudien“.....	336
3.4.2	Problemlösungen für Überflutungssedimente.....	338
3.4.2.1	Fallstudie Spittelwasser im Elbe-Einzugsgebiet.....	339
3.4.2.2	Organisation eines interdisziplinären Programms.....	342
3.4.3	Subaquatische Lagerung.....	343
3.4.3.1	Internationale Erfahrungen.....	343
3.4.3.2	Planung und Durchführung.....	346
3.4.4	Capping – Aktive Barriere Systeme.....	347
3.4.4.1	Subaquatische In-situ-Abdeckung.....	347
3.4.4.2	Aktive Barriere Systeme (ABS).....	351
3.4.4.3	Zeolithbasierte ABS.....	355
3.4.5	Strategien für ein integriertes Sedimentmanagement.....	357
3.4.5.1	Integrierte Risikobewertung von Gewässersedimenten.....	358
3.4.5.2	Integrierte Maßnahmen bei der Beseitigung von Baggergut.....	358
3.5	Sedimente und WRLL – Fallstudien Rhein und Elbe	
	SUSANNE HEISE UND ULRICH FÖRSTNER.....	361
3.5.1	Forschungsinitiativen zum integrierten Sedimentmanagement.....	361
3.5.2	Erfassung von partikelgebunden Schadstoffbelastungen.....	363
3.5.2.1	Ziele für Feststoffuntersuchungen in der Wasserwirtschaft.....	363
3.5.2.2	Feststoffuntersuchungen im Gewässergüte-Monitoring.....	364
3.5.2.3	Prioritäre Substanzen in Schwebstoffen und Sedimenten.....	365
3.5.2.4	Metall-Background und Referenzkonzentrationen (BRCs).....	365
3.5.2.5	Schadstoffe aus historisch kontaminierten Sedimenten.....	366
3.5.2.6	Untersuchungsstrategien in den vorliegenden Studien.....	366
3.5.3	Qualitätssicherung bei der Untersuchung von Sedimentproben.....	367
3.5.3.1	Mängel bei Daten für flussgebietsübergreifende Bewertungen.....	367
3.5.3.2	Das Konzept der Rückverfolgbarkeit für Sedimentdaten.....	368
3.5.3.3	Flussgebietsübergreifende Datensätze – Beispiel Elbe.....	372
3.5.3.4	Hydrodynamische Daten – Beispiele aus dem Elberaum.....	376
3.5.3.5	Kontaminierte Feststoffe in Flussgebieten – Zwischenfazit.....	379
3.5.4	Konzept der Sedimentstudien von Rhein und Elbe.....	380
3.5.5	Ausgewählte Ergebnisse der Rheinstudie – POR III.....	384
3.5.6	Ausgewählte Ergebnisse der Elbestudie – HPA.....	388

3.5.7	Fallstudien Rhein/Port of Rotterdam (HEISE et al. 2004) und Elbe/Hamburg Port Authority00 (HEISE et al. 2005).....	CD/471
3.6	Integrierte Untersuchungen in Böden, Grundwässern, Sedimenten und Flüssen: Anwendungen vom EU-Projekt AquaTerra	
	JOHANNES BARTH UND TILMAN GOCHT.....	393
3.6.1	Einleitung.....	393
3.6.2	Zeitlich integrierende Messmethoden aus den Unterprojekten FLUX und BIOGEOCHEM.....	395
3.6.2.1	Passivsammler für Konzentrationsbestimmungen.....	396
3.6.2.2	Atmosphärische Konzentrationsbestimmung mittels Passivsammlern.....	399
3.6.2.3	Keramik-Dosimeter für POP-Konzentrationsbestimmungen im Grundwasser.....	396
3.6.2.4	Atmosphärische Depositionssammler.....	401
3.6.3	Konzeptionelles Modell für Schadstofffrachten.....	403
3.6.4	Modellierungen des Systems.....	404
3.6.5	Verbindungen von AquaTerra zu anderen Initiativen.....	405
3.6.6	Farbtafeln zu Kapitel 3.6.....	CD/471
	Literatur zu Kapitel 3	407
4	Materialien	437
4.1	Ausgewählte Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt SiWaP	
	BERND SUSSET.....	437
4.1.1	Einleitung.....	437
4.1.2	„Quellterm“ – experimentelle Befunde.....	438
4.1.3	„Transportterm“ – experimentelle Befunde.....	446
4.1.4	Aktuelle Aktivitäten zur Gefährdungsabschätzung und Verwertung.....	448
4.1.5	Zitierte Literatur.....	449
4.1.6	Foliensatz zu Kapitel 4.1 (BERND SUSSET).....	CD/471
4.2	Durchströmte Reinigungswände – BMBF „RUBIN“	
	VOLKER BIRKE.....	451
4.2.1	Übersicht zum Stand des BMBF-Förderschwerpunktes RUBIN.....	451
4.2.2	Wissenschaftlich-technische Fragestellungen.....	453
4.2.3	Durchströmte Reinigungswände in Deutschland und Österreich.....	456
4.2.4	Zitierte Literatur.....	457
4.2.5	Foliensätze zu Kapitel 4.2 (VOLKER BIRKE und S.-O. IPSEN).....	CD/471
	Sachverzeichnis	459
	Verzeichnis der Dateien auf der beigelegten CD	471

1 Technische Geochemie – Konzepte und Praxis

Zwei allgemein bekannte Leitperspektiven des technischen Umweltschutzes sind die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien und eine weitestgehende Vermeidung von Abfall. In einem dritten Sektor entwickelt sich ohne besondere öffentliche Aufmerksamkeit ein neues Langzeitdenken, das in jeder Hinsicht dem Leitbild einer nachhaltigen zukunftsfähigen Entwicklung entspricht. Es handelt sich um die nachsorgefreie Ablagerung der letztlich unvermeidbaren Restabfälle, die Optimierung des Einsatzes von Primär- und Sekundärrohstoffen und um die naturnahe Behandlung von kontaminierten Grundwässern. Diese Praxisanwendungen von geochemischen Grundlagen werden in dem vorliegenden Buch dargestellt.

Die Bedeutung des geochemisch-technischen Ansatzes lässt sich anhand der strategischen Neuausrichtung bei der Abfallentsorgung zeigen: In der Tabelle 1.1 sind noch alle Sicherungselemente des früheren „Multibarrierenkonzeptes“ (Stief 1986) von der Geologie des Deponieuntergrundes bis zur Nachsorge aufgeführt. Auch nach der TA Siedlungsabfall (TASi) von 1993 sind „Deponien so zu planen, zu errichten und zu betreiben, dass mehrere weitgehend unabhängig wirksame Barrieren geschaffen und die Freisetzung und Ausbreitung von Schadstoffen nach dem Stand der Technik verhindert werden“. Betrachtet man jedoch das auf die praktische Umsetzung gerichtete Ziel der TASi, die Ablagerung thermisch behandelte Abfälle zum Regelverfahren werden zu lassen, dann erhält die primäre Schadstoffeinbindung in der Abfallmatrix („Innere Barriere“) eine hohe Priorität gegenüber den nachgeschalteten „Barrieren“. Bei einem überschaubaren Spektrum an Stoffen und Reaktionen wäre es künftig möglich, mit verbesserten Prüfverfahren allein über die Zuordnungskriterien eine langfristige und weiträumige Sicherheit zu gewährleisten.

Es ist das Ziel der geochemischen Verfahrensansätze in der Entsorgungstechnik, nicht nur naturnahe, sondern auch möglichst übersichtliche Ablagerungsbedingungen zu schaffen, die eine langfristige Prognose erlauben. Diese Voraussetzungen sind bei der Hausmüllverbrennung durch die Zerstörung reaktiver organischer Substanzen und eine nachfolgende Nassbehandlung nahezu perfekt gegeben¹⁾. Bei anderen Massenabfällen wie Bergbauresten oder Baggergut muss eine dauerhafte Sicherung über die Auswahl eines geeigneten Ablagerungsmilieus erfolgen. Langzeitprognosen sind auch hier integraler Bestandteil der technischen Maßnahmen, erfordern jedoch weitergehende Informationen über die mögliche Freisetzung von Schadstoffen.

Bei der geochemischen Immobilisierung von Schadstoffen über geologische Zeiträume empfiehlt es sich, die in der Natur vorkommenden Mineralassoziatio-

¹⁾ In dieser Hinsicht ist die Möglichkeit der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen als Teilstrom nach der Novellierung der TASi (AbfAbIV v. 20.02.2001) eindeutig als Rückschritt zu werten (s. Abschn. 3.2).

nen, die sich als stabil während der „sedimentären Diagenese“ erwiesen haben, zum Vorbild zu nehmen. Je besser die Übereinstimmung zwischen dem anthropogenen „Sediment“ und dem entsprechenden geogenen Modell, desto realistischer wird die langfristige Prognose über die Stabilität der Abfälle. Ein klassisches Beispiel, bei dem von Seiten der Technischen Mineralogie erstmals eine solche umweltrelevante Problemstellung gelöst wurde, ist die Mineralisierung von hochradioaktiven Abfalllösungen in der nuklearen Entsorgungstechnik (Ringwood u. Kesson 1988). Jedoch müssen nicht nur radioaktive Abfälle, sondern auch nicht-radioaktive Sonderabfälle oftmals mit der gleichen Sorgfalt von der Biosphäre isoliert werden.

Tabelle 1.1 Bedeutung einzelner „Barrieren“ für Reaktor- und Inertstoffdeponien

	Schadstoff- „Barriere“	Charakterisierung der Barrierewirkung	Reaktor- Deponie	Inertstoff- Deponie
1	Geologie	Standortwahl nach sorgfältig vorgeprüften hydrogeologischen und geotechnischen Gesichtspunkten	++	+
2	Abdichtung	Schaffung eines allseitig wirksamen Abdichtungssystems aus Sohl-, Wand- und Oberflächendichtung	+++	+
3	„Innere“ Barriere	Immobilisierung von Schadstoffen innerhalb des Abfallkörpers; Einhaltung von Zuordnungswerten	+	++++
4	Entsorgung	optimal wirkende Systeme zur Erfassung, Ableitung und Behandlung von Sickerwasser und Deponiegas	+++	+
5	Betrieb	Betrieb der Deponie nach dem Stand der Technik und allen Erfahrungen bei der Emissionsminderung	++	+
6	Überwachung, Kontrolle und Nachsorge	Messungen im Grundwasseranstrom und -abstrom, Kontrolle der Setzungen und Verformungen des Deponiekörpers sowie der Abdichtungssysteme	++	(+)

Geowissenschaftliche Erkenntnisse und Informationen gehören heute zu den unverzichtbaren Grundlagen langfristig umweltverträglicher und damit zukunfts-trächtiger Technologien zum Schutze unserer Umwelt. Die Anwendung geochemischer Kenntnisse bei der Erschließung und Nutzung von Ressourcen lässt sich zwar bis in die Antike zurückverfolgen, jedoch erfolgte bezüglich des Umweltschutzes der eigentliche Durchbruch erst in jüngster Zeit – nicht zuletzt dank der Entwicklung des erforderlichen analytischen Instrumentariums.