


Ulrich Förstner · Peter Grathwohl

Ingenieurgeochemie

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Engineering  **ONLINE LIBRARY**

<http://www.springer.de/engine-de/>

Ulrich Förstner
Peter Grathwohl

Ingenieurgeochemie

Natürlicher Abbau und Rückhalt,
Stabilisierung von Massenabfällen

Unter Mitarbeit von **Joachim Gerth**, Technische Universität Hamburg-Harburg,
Günther Hirschmann, Behörde für Umwelt und Gesundheit Hamburg,
Michael Paul, Wismut GmbH und **Patrick Jacobs**, Technische Universität
Hamburg-Harburg



Springer

Prof. Dr. Ulrich Förstner
Technische Universität Hamburg-Harburg
Abteilung Umweltschutztechnik
Eißendorfer Str. 40
21073 Hamburg
e-mail: u.foerstner@tu-harburg.de

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

ISBN 978-3-662-07904-1 ISBN 978-3-662-07903-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-07903-4

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

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 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.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2003
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2003

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: Reproduktionsfertige Vorlagen der Autoren
Einbandgestaltung : Struve & Partner, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem Papier

SPIN: 10099433

68/3020/M - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Prozessverständnis, Ressourcensicherung und Schutz der Umwelt – mit diesem Wirkungsdreieck charakterisiert eine Denkschrift der Deutschen Forschungsgemeinschaft* die Rolle fortschrittlicher Geotechnologien. Zusätzliche Aktivposten sind die Zusammenarbeit mit benachbarten Natur- und Ingenieurwissenschaften, internationale Kooperationen und die Definition möglicher Synergiepotentiale mit Industrieunternehmen. Die „Ingenieurgeochemie“, die in dem vorliegenden Buch erstmals umfassend beschrieben wird, entspricht mit ihren Konzepten und praktischen Aufgaben diesen Leitvorstellungen für eine moderne geowissenschaftliche Disziplin:

- Das Verständnis natürlichen Prozesse und ihrer Wechselwirkungen in komplexen Systemen besitzt erste Priorität beim künftigen Einsatz kostengünstiger *in-situ*-Methoden im Grundwasserschutz (Kapitel 1 und 2).
- Geochemisches Prozesswissen ist auch die Voraussetzung für eine Sickerwasserprognose von Abfällen und Altlasten (Abschn. 3.1) und für die Optimierung der thermischen Abfallbehandlung mit dem Ziel einer Verwertbarkeit der Produkte (Abschn. 3.2).
- Die bereits erfolgreiche Anwendung geochemischer Techniken bei interdisziplinären Sanierungsmaßnahmen an Bergbaualtlasten (Abschn. 3.3) eröffnet ähnlich günstige Perspektiven für den künftigen Umgang mit problematischem Baggergut (Abschn. 3.4).

Fortschrittliche geochemische Problemlösungen sind dem Prinzip der Nachhaltigkeit verpflichtet und beinhalten entsprechende Risikoabschätzungen, vor allem Langzeitprognosen (Kapitel 1). Dieser integrale Ansatz und die wirtschaftlichen Vorteile naturnaher Technologien haben bei der öffentlichen Forschungsförderung eine gute Resonanz gefunden. Neben dem Verbundprojekt „Kontrollierter natürlicher Abbau und Rückhalt“ (Kapitel 2) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) stammen auch die Gastbeiträge im Kapitel 3 „Geochemische Stabilisierungstechniken“ aus der Bearbeitung strategisch ausgerichteter Gemeinschaftsvorhaben:

- Das Programm „Sickerwasserprognose“ des BMBF und BMU, das die Grundlagen für die künftige Umsetzung der Bodenschutz- und Altlastenverordnung erarbeiten soll, wird von *Dr. Joachim Gerth* (TUHH) am Beispiel anorganischer Schadstoffe im Abschn. 3.1 beschrieben.
- Aus dem BMBF-Verbundprojekt „Deponiekörper“ (1993-1997) berichtet *Dr.-Ing. Günther Hirschmann* (Behörde für Umwelt und Gesundheit Hamburg) im

* „Geotechnologien – Das ‚System Erde‘: Vom Prozessverständnis zum Erdmanagement“. Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1999, 140 Seiten

Abschn. 3.2 über geochemische Ansätze zur Bewertung des Langzeitverhaltens von Schlacken aus der thermischen Behandlung von Siedlungsabfällen.

- Die Rolle der Ingenieurgeochemie bei der Sanierung von Altbergbaustandorten wird von *Dr. Michael Paul* (Wismut GmbH) im Abschn. 3.3 am Beispiel des weltweit größten Bergbausanierungsvorhabens, der Sanierung der Uranerzbergbau- und -aufbereitungsstandorte der ehemaligen SDAG Wismut in Thüringen und Sachsen, dargestellt. Dieser Beitrag schlägt auch die Brücke zu den internationalen Verbundprogrammen über Bergbaualtlasten, die nach wie vor die entscheidenden Impulse für die Entwicklung geochemischer Stabilisierungstechniken geben.
- Im Abschn. 3.4 gibt *Dipl.-Geol. Patrick Jacobs* (TUHH) u.a. einen Überblick über das Thema „subaquatische Unterbringung von Sedimenten und aktive Abdeckungssysteme“, das seit 1997 im Rahmen einer australisch-deutschen Forschungsallianz vom BMBF gefördert wird. Das wasserrechtlich genehmigte Demonstrationsprojekt „Hitzacker/Elbe“ steht kurz vor der Realisierung.

Dem herzlichen Dank an die Autoren dieser Beiträge schließt sich die Würdigung jener Kollegen an, die für dieses Arbeitsgebiet besondere Pionierleistungen erbracht haben. An erster Stelle sind Prof. Wim Salomons und Prof. „Olaf“ R. D. Schuiling zu nennen, die Ende der achtziger Jahre das Gebiet konzeptionell und durch Praxisbeispiele definiert haben. Prof. Michael Kersten und Prof. Horst D. Schulz, der Koordinator des DFG-Schwerpunktprogramms „Geochemische Prozesse mit Langzeitwirkungen in anthropogen beeinflussten Sicker- und Grundwässern“, haben sich früh für dieses Buchprojekt engagiert.

Unser Dank gilt Frau Barbara Eckhardt (Hamburg) und Frau Iris Madlener (Tübingen) für die Erstellung der Druckversion der Manuskripte. Wir danken dem Springer-Verlag und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lehnert für das Vertrauen, das uns während des langen Entwicklungsprozesses der nun vorliegenden *Ingenieurgeochemie* entgegengebracht wurde und wir hoffen, dass sich das Warten vor allem für die Leser gelohnt hat.

Hamburg, Tübingen im Juli 2002

Ulrich Förstner, Peter Grathwohl

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
1.3	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 residualer 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 residualer 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
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 Quellermittlung durch Säulenversuche.....	263
3.1.3	Zeitliche Entwicklung des Quellverhaltens.....	270
3.1.4	Anmerkungen zum Prüfwertkonzept.....	272
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 Deponieinhalte.....	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 Bergbauallasten	
	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
	Literatur	361
	Sachverzeichnis	383