

Jahrestagung der Fachsektion Hydrogeologie/DGG, Darmstadt, 21. Mai.2004

Heilt die Zeit auch unsere Umweltschäden? Nachhaltigkeit aus der Sicht eines Geochemikers

Ulrich Förstner, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, TUHH

1 Einleitung

Zwei allgemein bekannte Vorzeigethemen des technischen Umweltschutzes sind die Nutzung erneuerbarer Energie und die weitestgehende Vermeidung von Abfall. In einem dritten Sektor entwickelt sich – ohne besondere öffentliche Aufmerksamkeit – ein **neues Langzeitdenken**, das eine geowissenschaftliche Ergänzung zu der biowissenschaftlich geprägten vernetzten Denkweise darstellen könnte. Es geht hier vor allem um die Prozesse im Boden und Grundwasser, und letztlich um die Frage, wie die Natur unsere Abfallstoffe verdauen kann.

Vom Langzeitverhalten lässt sich die Brücke zum **Leitbild der Nachhaltigkeit** schlagen. Das Recht künftiger Generationen auf uneingeschränkte Entwicklung fordert von der heutigen Generation, dass keine Handlung die wesentlichen lebenserhaltenden Ökosystemfaktoren (Luft, Wasser, Boden, genetische Vielfalt) für unsere Nachkommenschaft gefährden darf. Es scheint, dass die Belastungsfähigkeit der Ökosysteme wesentlich engere Entwicklungsgrenzen für anthropogene Stoffflüsse aufbaut, als die Ausbeutung nicht-regenerativer Ressourcen. Die Beschränkung liegt daher auf der **Entsorgungs-** und weniger auf der Versorgungsseite.

Künftige **Rezyklierungs- und Abfallbehandlungsverfahren** sollen nur noch drei mögliche **Produkte** haben (Moser, 1996): 1. Rezyklierbare Güter und Stoffe, 2. kurz- und langfristig umweltverträgliche Emissionen in Wasser, Boden und Luft, und 3. endlagerfähige Reststoffe, die in Deponien auch über sehr lange Zeiträume (Jahrtausende) nur umweltverträgliche Restflüsse an die Hydrosphäre abgeben.

Ab dem Jahr 2020 sollen in Deutschland alle Abfälle verwertet werden; das bedeutet, dass ein größerer Anteil an schadstoffbelasteten Materialien in Kontakt mit dem Boden und Grundwasser gelangen wird als dies bei einer langzeitsicheren Deponierung der Fall wäre. Der **„ingenieurgeochemische Ansatz“**, der in diesem Vortrag dargestellt wird, zeichnet sich dadurch aus, dass er die Bewertung der Risiken für das Grundwasser mit naturnahen, kostengünstigen Maßnahmen für die Demobilisierung von potentiellen Schadstoffen kombiniert.

Bei der Abschätzung der Risiken benötigt man sowohl für die **Langzeitprognosen** (Teil 2) als auch für die Auswahl und den Einsatz von **Frühwarnindikatoren** (Teil 3) eine breite Basis an geowissenschaftlichem Prozesswissen (z.B. Grathwohl, 2003). Im Teil 4 dieses Vortrags werden daraus Konzepte und praktische Beispiele von naturnahen, geochemisch begründeten **Techniken** für Grundwässer, Böden, Deponien und Massenabfälle wie Baggergut, Schlacken und Flugaschen abgeleitet.

Moser, F. (1996) Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Entwicklung. In: Brauer, H. (Hrsg.) Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Band 2: Produktions- und produktintegrierter Umweltschutz. S. 1059-1153. Springer-Verlag Berlin

Grathwohl, P. (2003) Natürlicher Abbau und Rückhalt von Schadstoffen. In: Förstner, U., Grathwohl, P. (Hrsg.) Ingenieurgeochemie – Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. S. 151-242. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

2 Übersicht Teil 1: Geochemie und Nachhaltigkeit

Bei der Übersicht über wichtige Befunde, Konzepte und Strategien in der Ingenieurgeochemie sollen auch einige prominente Akteure in dem seit 15 Jahren sich entwickelten Fachgebiet vorgestellt werden.

3 Leitbild Nachhaltigkeit (1) - Rohstoffverbrauch

Nachhaltigkeit wird in erster Linie am **Verbrauch von Rohstoffen** festgemacht. Generell stimmt es natürlich, dass Stoffe wie Öl und Gas mittelfristig knapp werden. Aber viele Prognosen sind nicht eingetreten. Anfang der 70er Jahre wurde z.B. die Reichweite der Zinkvorräte auf etwa 20 Jahre geschätzt. Inzwischen ist die Zeit um und es gibt größere und billigere Vorräte als damals. Die Verbesserungen der Technik waren schneller als der Verbrauch.

Aber es gibt auch Beispiele, wo wir die **Engpässe unausweichlich** vor uns sehen. Peter Baccini von der ETH Zürich, der Vater des modernen Stofffluss-Managements, hat das am Beispiel der Kiesbildung und Kiesnutzung in der Schweiz gezeigt. Die seit 100.000 Jahren gebildeten Kiesvorkommen wurden mit der Zeit immer intensiver genutzt. Die Nutzung war durchschnittlich 10 Millionen Kubikmeter pro Jahr über die letzten 100 Jahre; die Lager sind 10 Milliarden Kubikmeter. Kein Problem? Doch – wenn man bedenkt, dass nur etwa 10 % wirklich verfügbar sind, weil es die Nutzung für die Grundwassergewinnung, Straßen, Siedlungen und vieles andere gibt, dann sind nur 1 Mrd. Kubikmeter nutzbar. Diese Vorräte wären innerhalb von etwa 50 Jahren erschöpft. Kies lässt sich nicht über beliebige Entfernungen herbeischaffen und so bleibt als wesentlicher Ausweg die Nutzung von **Recyclingbaustoffen**. Das gilt auch für die Lagerbestände an Schwermetallen wie Zink und Kupfer in solchen Gebäuden, die bereits etwa 40 bis 50 % der „geogenen Lager“, d.h. den heute als abbauwürdig eingeschätzten vorwiegend terrestrischen Erzvorkommen, entsprechen (Lichtensteiger 2001).

Baccini, P. (1992) Vom Abfall zum Stein der Weisen. Einführungsvorlesung am 20. Mai 1992 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Manuskript 18 S.

Lichtensteiger, T. (2001) Die petrologische Evolution als Ansatz zu erhöhter Effizienz im Umgang mit Rohstoffen. In: Huch, M., Matschullat, J., Wycisk P. (Hrsg.) Im Einklang mit der Erde – Geowissenschaften für die Zukunft. S. 193-208. Springer-Verlag Berlin

4 Leitbild Nachhaltigkeit (2) – Schadstoffbelastung

Die Mehrzahl der Experten, die sich mit dem Phänomen „Nachhaltigkeit“ befassen, sieht in der Belastung der Umwelt mit Schadstoffen ein größeres Problem als in der Verknappung von Rohstoffen. Für die Abschätzung langfristiger ‚**Tragfähigkeitsgrenzen**‘ spielen die Funktionen des Bodens – **als Filter, Speicher und als Vermittler von Stoffumwandlungen** – eine zentrale Rolle. Der niederländische Rat für Umweltforschung hat solche „Eco-Capacities“ abgeschätzt (Weterings und Opschoor, 1992): Danach müssten die Einträge von Kupfer um 90%, von Cadmium und Zink um 95% reduziert werden. Bei den Säureeinträgen sollte bis 2040 ebenfalls ein Rückgang von 85% erreicht sein.

Die **Kombination der beiden Schadstoffgruppen ‚Metalle‘ und ‚Säure‘** zeigt eine interessante Perspektive für die praktische Umsetzung des Leitbilds Nachhaltigkeit, denn mit einer Reduktion der Säure-Emissionen wird zugleich erreicht, dass sich die Tragfähigkeit der Böden für Schwermetalle aufgrund ihrer verringerten Mobilität und Bioverfügbarkeit wesentlich verbessert.

Weterings, R.A.P.M., Opschoor, J.B. (1992) The Ecocapacity as a challenge to technological development. Advisory Council for Research on Nature and Environment (RMNO). RMNO Publ. No. 74a, Rijswijk, Niederlande

5 Befund und Konzept „verzögerte Reaktionen“ – Stigliani (1988)

Ein interessanter Befund von William Stigliani führte zum **Konzept der ‚verzögerten Reaktionen‘**.

Der Große Elchsee in den Adirondacks im Nordosten der USA liegt in der Windrichtung einer stark industrialisierten Region und erhielt seit 1920 hohe Säureeinträge aus der Kohleverbrennung. Das nur schwach gepufferte Seewasser zeigte dennoch bis etwa 1950 konstante pH-Werte. Danach allerdings, innerhalb von 30 Jahren fiel der pH-Wert um eine ganze Einheit, verbunden mit dem Verschwinden des Fischbestands. Dafür gibt es nur eine plausible Erklärung: Über Jahrzehnte waren die Böden im Einzugsgebiet in der Lage, die Luft-Einträge abzupuffern, aber als die Pufferkapazität verbraucht war, wurde das Wasser im Großen Elchsee sehr schnell sauer.

Das **Fazit** aus diesem Beispiel ist: Selbst gründliche Untersuchungen des engeren Ökosystems hätten wenig Hinweise auf langfristige Effekte gebracht: Als der pH-Rückgang sichtbar wurde war es bereits zu spät zum Eingreifen: *„Umweltschutz über Ökosysteme als Indikatoren ist eigentlich Späterkennung“* (Baccini und Bader, 1996). Ein Überwachungsprogramm hätte nur einen Sinn gehabt, wenn es die **Veränderung der Pufferkapazität in den Böden des weiteren Einzugsgebiets** berücksichtigt hätte.

Stigliani, W.M. (1988) Changes in valued „capacities“ of soils and sediments as indicators of nonlinear and time-delayed environmental effects. Environ. Monit. Assess. 10: 245-307

Baccini, P., Bader, H.-P. (1996) Regionaler Stoffhaushalt – Erfassung, Bewertung und Steuerung. 420 S. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

6 Konzept „Gekoppelte geochemische Faktoren“ – Salomons (1993)

Den Befund der verzögerten Reaktionen hat Wim Salomons generell so gedeutet, dass es auf der einen Seite Antriebskräfte gibt, die im Kontakt mit anderen, vor allem festen Systemkomponenten abgebremst werden. Typische **Antriebskräfte sind die Säure- und Redoxpotentiale**. Diesen steht die **Pufferkapazität** entgegen, oder andere Kapazitäten. Sind diese verbraucht, erfolgt ein Durchbruch, der zur Freisetzung von Schadstoffen führt. Das kann unter Umständen relativ lange dauern. Im Großen Elchsee waren es etwa 50 Jahre, bis die Pufferkapazität in den Böden des Einzugsgebiets verbraucht werden. Wir werden Beispiele sehen, wo dazu tausend Jahre benötigt werden.

Für eine **Langzeitprognose** werden **beide Größen miteinander verglichen**.

Das Konzept der gekoppelten geochemischen Faktoren zeigt bereits die **Ansätze für Sanierungstechniken**. Beispielsweise kann man die Redoxbedingungen konstant halten, durch Ablagerung unter permanent sauerstofffreien Verhältnissen. Oder man kann Pufferkapazität in das System einbringen, z.B. durch Kalkung oder Verwendung von sorptionsaktiven Stoffen wie Tonmineralen. Wenn der Durchbruch erfolgt ist, kann man nur noch mit konventionellen verfahrenstechnischen Methoden – z.B. Trennung oder Anreicherung – arbeiten.

Salomons, W. (1993) Non-linear and delayed responses of toxic chemical in the environment. In: Arendt, F., Annokée, G.J., Bosman, R., van den Brink, W.J. (Editors) Contaminated Soil '93, S. 225-238. Kluwer, Dordrecht

7 Praxisbeispiele „Ingenieurgeochemie“ – Schuiling, v.d. Sloop u.a.

Von den Zuschlagstoffen zur Verbesserung der Kapazitäten kommen wir direkt zu den Praxisbeispielen in einem neuen Fachgebiet „Ingenieurgeochemie“, das von Olaf Schuiling und Mitarbeitern an der Universität Utrecht seit den 80er Jahren entscheidend vorangetrieben wurde. Zwei typische **Beispiele** seien hier genannt;

Im ersten Bild wird eine **schichtförmigen Anordnung von Kohleflugasche und Jarosit** – ein Eisensulfat, das bei der Zinkgewinnung anfällt – mit Wasser durchströmt. Es finden zwischen den beiden Abfallsubstanzen Reaktionen statt, bei denen innerhalb von 4 Monate die Durchlässigkeit um nahezu 3 Größenordnungen verringert wird.

Es gibt weitere Beispiele für diese Form der **Selbstverfestigung, Verdichtung, Selbstheilung von Klüften**. Das zweite Beispiel zeigt die Gewinnung von Zeolith aus Flugasche. Diese Zeolithe können in verschiedenen Arten von Barrieren genutzt werden (s.u.).

Schuiling hat einen kuriosen Vorschlag gemacht, der sogar patentiert wurde. Abfallschwefelsäure soll in die tieferen Kalkschichten der Niederlande eingepresst werden. Es wird Gips gebildet und durch die Verdopplung des Gesteinsvolumens würde **Holland angehoben** werden.

Schuiling, R.D. (1998): Geochemical Engineering – taking stock. J. Geochem. Explor. 62: 1-28

Ding, M., Geusebroek, van der Sloot, H.A. (1998) Interface precipitation affects the resistance to transport in layered jarosite/fly ash. J. Geochem. Explor. 62: 319-323

Steenbruggen, G., Hollman, G.G. (1998) The synthesis of zeolites from fly ash and the properties of the zeolite products. J. Geochem. Explor. 62: 305-309

De Graaf, J.W.M. (1998) Acidic waste disposal by underground injection. J. Geochem. Explor. 62: 325-329

8 Konzept „Innere Barriersysteme“ – Bambauer und Pöllmann (1998)

Realitätsnäher und weiterreichend ist das Konzept der ‚Inneren Barriere‘ der Mineralogen Bambauer und Pöllmann. Die äußere Barriere einer Deponie umfasst die natürliche Geologische Barriere und die konventionellen Sicherungssysteme, vor allem bestehend aus der Deponiebasisabdichtung und einer Oberflächenabdichtung. Diese äußere Barriere hat die Aufgabe, den Wasseraustausch zwischen Deponiekörper und Grundwasser zu minimieren.

Das „Innere Barriere-System“ beruht dagegen auf einer **mineralogischen Immobilisierung von Schadstoffen innerhalb des gesamten Abfallkörpers**. Das wird durch eine Vorbehandlung erreicht, im allgemeinen durch die normale Müllverbrennung. Es entstehen dort sehr reaktive anorganische Verbindungen, vergleichbar den Zementmineralien.

In der Deponie werden nochmals neue Mineralphasen gebildet werden, die als Speicher für Schadstoffe fungieren können und die – wie bereits im vorangegangenen Bild gezeigt – eine **Verdichtung** und damit eine verringerte Durchlässigkeit für die Porenlösungen bewirken. Der Deponiekörper wird langfristig zu einer Art **Monolith**.

Es gibt noch die Reaktive Barriere, die für die Reinigung von kontaminierten Grundwässern eingesetzt wird. Wir werden typische Einsatzstoffe kennen lernen. Hier ist allerdings eine Selbstverdichtung unerwünscht.

Bambauer, H.U., Pöllmann, H. (1998) Concepts and methods for applications of mineralogy to environmental management. In: Marfunin, A.S. (Editor) Mineral matter in space, mantle, ocean floor, biosphere, environmental management, and jewelry. Advanced Mineralogy, Vol. 3, S. 279-292. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York

9 Bedeutung einzelner „Barrieren“ in Reaktor- und Inertstoffdeponien

Das Konzept des „Innere Barriere-Systems“ hat wichtige Folgen für die Abfallwirtschaft. In der konventionellen Technik für Reaktordeponien, in denen die organischen Abfallsubstanzen in Deponiegas und gelöste Inhaltsstoffe umgewandelt, abgeleitet, aufbereitet und verwertet werden, galt das sog. „Multibarrierenprinzip“ (Stief 1986). In einer Abfolge von Sicherungen sollte jeweils die nächste Barriere die Defizite der vorausgehenden „Barriere“ übernehmen. Insbesondere hatten die technischen Abdichtungssysteme die Mängel bei den natürlichen Barrieren zu kompensieren. Das war auch notwendig, weil die Administration jedem Landkreis seine Deponie zugeordnet hat, unabhängig von Qualität des Geologischen Untergrunds. Künstliche Abdichtung und Entsorgung hatten die größte Bedeutung.

In einer Deponie von mehr oder weniger inerten Reststoffen ändert sich das Bild völlig. Nun kommt es darauf an, wie gut die **Vorbehandlung** ist – z.B. die Entfernung der löslichen Salze. Und dann liegt alles an der **Wirksamkeit der ‚Inneren Barriere‘**, d.h. an der Stabilität der neugebildeten Minerale und an dem Grad der Selbstverdichtung.

Fazit: Mit entsprechenden Prüfverfahren und Prognosemodellen ist es möglich, eine langfristige und weiträumige Sicherheit für diese rein mineralischen Deponien zu gewährleisten (Förstner 2003).

Stief, K. (1986) Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll u. Abfall 18: 15-20

Anonym (1993) TA Siedlungsabfall. Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz vom 14. Mai 1993. Bundesanzeiger, Jahrgang 45, Nr. 99a

Förstner, U. (2003) Technische Geochemie – Konzepte und Praxis. In: Förstner, U., Grathwohl, P. (Hrsg.) Ingenieurgeochemie – Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. S. 1-150. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

10 Übersicht Teil 2: Indikatoren – Zeitskalen, medienübergreifende Schäden

Bevor wir zu den Langzeitprognosen kommen, möchte ich Sie mit der Rolle von Umweltindikatoren bekannt machen. Im Bereich der angewandten Geochemie benötigen wir solche Indikatoren vor allem zum Erkennen von mittelfristigen Veränderungen und bei der Untersuchung von medien- und flussgebietsübergreifenden Verschmutzungen.

11 Indikatoren für das Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“

Das Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“ kann letztlich nur auf regionaler Ebene umgesetzt werden. Es gibt dafür in Europa eine standardisierte Vorgehensweise. Am einfachsten sind noch die **Sachbilanzen**, bei denen die Einträge von Material, Energie und Wasser und die Austräge von Abfällen, Emissionen und Abwässern ermittelt werden.

Für die Abschätzung von Umwelteffekten hat das Umweltbundesamt **10 Kategorien** vorgeschlagen. Für unser Thema ist vor allem die Kategorie „Versauerung“ von direkter Bedeutung. Z.Z. werden von den einzelnen Bundesländern „Umweltindikatorensysteme“ entwickelt. Leider habe ich für den Grundwasserbereich keine spezifischen Indikatoren gefunden. Ich versuche es deshalb mit dem Ansatz **„Zeitskalen der Grundwasserverschmutzungen“**.

Weber-Blaschke, G., Frieß, H., Peichl, L., Faulstich, M. (2002) Aktuelle Entwicklungen bei Umweltindikatorsystemen. UWSF-Z. Umweltchemie Ökotox. 14: 187-193

12 Zeitskalen von Grundwasserverschmutzungen

Die Effekte am kurzfristigen Ende der Zeitskala können direkt gemessen werden. Hier stehen die grundwassergängigen organischen Substanzen bei Unfällen und Leckagen, von Nitrat und Pestiziden aus der Landwirtschaft.

In einem **mittleren Zeitskalenbereich von Monaten bis Jahrzehnten** können vorteilhaft Frühwarnindikatoren eingesetzt werden:

- Aus der Oxidation von Sulfiden in **Bergbauabfällen** resultieren meist rasch einsetzende pH-Absenkungen, die z.T. unmittelbar aus den Lösungskonzentrationen, z.B. von Schwermetallen, gemessen werden können.
- **Indikatoren für deponiebeeinflusste Grundwässer** sind die anorganischen Komponenten Bor, Sulfat, Ammonium und leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffe. Bemerkenswert ist vor allem Arsen, auf das ich noch genauer eingehen werde.
- Als Frühwarnindikatoren für **Bodenveränderungen durch Säureeinträge** kommen vor allem Calcium und Magnesium aus relativ oberflächennahen Sickerwässern in Frage, bevor am Ende der Austrag von Aluminium eine völlige Veränderung des Mineralbestands anzeigt.

Förstner, U. (1996) Grundwasserverschmutzung. In: Alloway, B.J., Ayres, D.C. (Hrsg.) Schadstoffe in der Umwelt – Chemische Grundlagen zur Beurteilung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzungen. Kap. 7.5 Frühwarnsysteme für Veränderungen der Grundwasserqualität (S. 307-312). Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg

13 Medienübergreifende Effekte – Reaktionen mit Feststoffphasen

Die Benutzung von Indikatorsubstanzen ergibt sich auch aus der Erfahrung, dass Umweltbelastungen in vielen Fällen medienübergreifend auftreten. Diese lassen sich experimentell nur schwer untersuchen.

Ein wichtiger medienübergreifender Effekt ist die Anreicherung von wasserbürtigen Schadstoffen an Feststoffen, z.B. im Klärschlamm und im Baggergut. Ein zweiter Pfad, der hier verfolgt werden soll, beginnt bei den Luftverschmutzungen, einer **Kombination von Schadstoffen und Säureeinträgen**. Durch die nachfolgenden Reaktionen sowohl im Boden als auch in den Deponien und Altlasten werden Schadstoffe mobilisiert und gelangen über das Sickerwasser ins Grundwasser.

Förstner, U. (1996) Gesetzliche Regelungen – das deutsche Schadstoffrecht. In: Alloway, B.J., Ayres, D.C. (Hrsg.) Schadstoffe in der Umwelt – Chemische Grundlagen zur Beurteilung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzungen. Kap. 3.3.5 Perspektiven im deutschen Schadstoffrecht (S. 78-83). Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg

14 Cadmiumaufnahme mit Nahrungsmitteln – Rhein-Einzugsgebiet

Über die großräumigen Auswirkungen kann man nur spekulieren, wie es Stigliani und Jaffe für das Einzugsgebiet des Rheins getan haben. Die Frage war, ob die tolerierbare wöchentliche Cadmiumaufnahme aus den dort gewonnenen Nahrungsmitteln mit der Zeit zunimmt, wenn der pH-Wert sinkt. Es wird angenommen, dass bei einem entsprechenden **Verbrauch von Pufferkapazität** in den Böden die Schwermetalle leichter aufgenommen werden und dann allmählich auch die Grenzwerte in den Lebensmitteln überschritten werden.

Glücklicherweise sind in den letzten Jahren durch **Luftreinhaltemaßnahmen** die Säureeinträge in Deutschland deutlich zurückgegangen. Die Zeitskalen für den Verbrauch von Pufferkapazität werden also länger. Außerdem muss man berücksichtigen, dass die **Erhaltungskalkung** auch künftig zur Stabilisierung der pH-Werte auf Ackerflächen beitragen wird.

Stigliani, W.M., Jaffe, P.R. (1993) Industrial metabolism and river basin studies: a new approach for the analysis of chemical pollution. Research Report 93-6. IIASA, Laxenburg, Österreich

15 Auswirkungen von Klimaänderungen für Böden und Gewässer

Bei der Frage nach Langzeiteffekten kommt die Rede letztlich auf die Folgen von Klimaänderungen. Dargestellt ist eine **Faktorenkette** ausgehend von Temperatur und Niederschlag über mikrobielle Prozesse und die Veränderungen bei organischen Substanzen. Die Veränderungen betreffen die **Bodenstruktur, das Kationenaustauschvermögen, pH und Redox** im Boden, sowie unter ungünstigen Bedingungen auch die Schadstoffeinträge ins Grundwasser.

Eine zweite Wirkungslinie führt über die verstärkten episodischen Niederschläge zu einer **Häufung von Hochwassersituationen**, weiter zur Erosion und Umlagerung von Böden und Sedimenten. Damit muss mit einer generellen Verstärkung des partikulären Schadstofftransportes gerechnet werden. Speziell interessiert diese Frage im Hinblick auf die Verlagerung von **historischen Schadstoffanreicherungen** (POR III-Studie für das Rheineinzugsgebiet).

Hesterberg, D., Stigliani, W.M., Imeson, A.C. (Hrsg., 1992) Chemical time bombs: linkage to scenarios of socioeconomic development. Executive Report 20 (CTB Basic Document 2). IIASA, Laxenburg/Österreich.

16 Überflutungssedimente – Beispiele und übliche Maßnahmen

Wir haben in den vergangenen Jahren mehrere **katastrophale Flutereignisse** erlebt und auch zwei spektakuläre **Bergbau-Unfälle** mit schlimmen Auswirkungen auf die unterliegenden Flusseinzugsgebiete, am Guadiana-Fluss in Südwestspanien und in der Baía de Minho Mine, bei der die Flüsse Var und dann die Teiße schwer betroffen waren. In all diesen Beispielen wurde lediglich die Belastung in Böden, Sedimenten, und Organismen gemessen, teilweise auch das Grundwasser. Wissenschaftliche Ausführungen zur Sanierung sind jedoch kaum zu finden.

Ein typisches Überflutungsgebiet ist das **Spittelwasser** in der Region Bitterfeld, dem sog. Chemie-Dreieck. Dieses etwa 60 km² große Überflutungsgebiet ist stark mit Dioxinen und anderen Schadstoffen belastet. Bei Hochwasser werden die kontaminierten Partikel über das Spittelwasser und die Mulde in die Elbe verfrachtet. Aufgrund eines charakteristischen **Musters an Dioxinkongeneren** lässt sich die frühere Quelle – die Produktion von Magnesium – bis in die Hafensedimente von Hamburg, 300 km flussabwärts, verfolgen.

Müller, A., Wessels, M. (1999) The flood in the Odra River 1997 – Impact of suspended solids on water quality. Acta hydrochim hydrobiol 27: 316-320

Friese, K., Witter, B., Miehl, G., Rode M (Hrsg. 2000) Stoffhaushalt von Auenökosystemen – Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen, 438 S. Springer Verlag Berlin

Förstner, U., Wittmann, U. et al. (2000) Umgang mit Kontaminationen in Flusseinzugs- und Überschwemmungsgebieten am Beispiel des Niederungsgebietes „Spittelwasser“ Bitterfeld. Umweltbundesamt, Projektträger des BMBF für Abfallwirtschaft und Altlastensanierung. 27 S. Berlin

Goetz, R., Steiner, D., Friesel, P., Roch, K., Walkow, F., Maaß, V., Reincke, H. (1996) Dioxin in the River Elbe – investigations of their origin by multivariate statistical methods. Organohalogen Compounds 27: 440-443

17 Übersicht Teil 3 Langzeitprognosen für Deponien, Sickerwässer, Untergrund

Im dritten Teil möchte ich Ihnen die Entwicklung von Langzeitprognosen darstellen und dabei insbesondere auf die Voraussetzungen eingehen, solche Prognosen verlässlich zu machen.

18 Langzeitprognosen im Leitbild „Nachhaltige Entwicklung“

Für Langzeitprognosen für das Verhalten von Schadstoffen in festen Abfällen kann man **Zeitraffermethoden** einsetzen, bei denen z.B. eine kontrollierte Überdosierung mobilisierender Umgebungsparameter erfolgt, wie z.B. die Säurekonzentration, das Redoxpotential, Temperatur usw. Wichtig ist aber auch die Kenntnis der Steuerpotentiale, speziell die eingebauten **Säurebildungspotentiale** im Eisensulfid von Baggerschlämmen oder die Säureeinträge von außen in das System „Abfall“.

Die Abschätzung der Nachhaltigkeit bei bodenrelevanten Prozessen benötigt letztlich solche Parameter wie den **Verbrauch von Säurepuffer, Redoxpuffer und Sorptionskapazität in der festen Matrix**.

19 Langzeitprognose: Redoxkapazität in Fluss- und Grundwässern

Für die Beurteilung der Vorgänge im Untergrund von Deponien spielen der Redoxbedingungen eine entscheidende Rolle. Die Tabelle zeigt die typischen **Unterschiede bei der Redoxsteuerung in Oberflächen- und Grundwässern**. Die Beiträge zur Oxidationskapazität, also die Pufferung gegen eine Sauerstoffminderung, ist in den Oberflächen- und Grundwässern selbst nicht sehr verschieden. Wenn man dagegen die Feststoffe betrachtet, dann dominieren im Grundwasser die Eisen- und Manganoxide als wichtigste Oxidationspuffer ganz entscheidend. Aber auch die Reduktionskapazität ist im Grundwasserbereich viel höher, wie die 12 equiv./ m³ an Schwefelverbindungen zeigen. Das bedeutet aber auch, dass der **Untergrund solche Reduktionsprozesse, die beim Abbau von organischen Substanzen auftreten, über lange Zeiten speichern kann**.

Heron, G., Christensen, T.H., Tjell, J.Ch. (1993) Oxidation capacity of aquifer sediments. Environ. Sci. Technol. 28: 153-158

20 Änderung von Wasser- und Feststoffeigenschaften unter Deponien

Das Ausmaß der Veränderungen im Deponieuntergrund wurde von Thomas Christensen und Kollegen an der Deponie Veijen in Dänemark untersucht. Von der Versickerung der Deponiewässer bis in etwa 500 m Entfernung hat der Abbau der organischen Stoffe seine Spuren im Grundwasser hinterlassen. Wir sehen hier die ganze **biochemische Reduktionsfolge**, von der Reduktion von Nitrat, Eisen-/Manganoxiden, Sulfat bis zur Bildung von Methan im Grundwasser.

Das hat Folgen für die Verteilung der **festen Eisenphasen**: Eisensulfide direkt unterhalb der Deponie, dann werden die Eisenoxide aufgelöst und weiter außen wieder ausgefällt. So ergibt sich das Bild einer fortschreitenden Eisenoxidfront, das sich zwanglos mit dem Abbau von organischen Substanzen im Deponiesickerwasser erklären lässt.

Dabei wird im Untergrund der Deponie eine **Reduktionskapazität** aufgebaut, die sich unter technisch-ökonomisch Kriterien nicht mehr revidieren lässt.

Christensen, T.H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H.-J., Heron, G., Nielsen, P.H., Bjerg, P.L., Holm, P.E. (1994) Attenuation of pollutants in landfill leachate polluted aquifers. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 24: 119-202.

Christensen, T.H., Bjerg, P.L., Banwart, S.A., Jakobsen, R., Heron, G., Albrechtsen, H.-J. (2000) Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes. J. Contam. Hydrol. 45: 165-241

21 Arsen-Mobilisierung aus Deponien und Böden

Es gibt noch andere Probleme durch die Redoxänderungen – die Freisetzung von Arsen. Bei Untersuchungen von 33 Deponien aus den 60er Jahren wurde gefunden, dass im Grundwasser unterhalb dieser Deponie einige Stoffe besonders stark angereichert wurden. Neben **Bor**, das vor allem aus der Hausbrandasche stammt, und **Ammonium**, das beim Abbau der organischen Substanzen entsteht, ist Arsen im Durchschnitt um den Faktor 40 aufkonzentriert.

Arsen ist aller Wahrscheinlichkeit nach kein typisches Abfallprodukt in Deponien. Seine Anreicherung im Sickerwasser erklärt sich vielmehr aus typischen **Reaktionen in der Frühphase der Deponieentwicklung**, beim Übergang zu reduzierenden Bedingungen.

Dieselbe Ursache, nämlich die **Freisetzung aus Eisen- und Manganoxiden**, wird auch bei der „größten Massenvergiftung der Geschichte“ vermutet, die z.Zt. in **Bangladesh** stattfindet und dort die Wasserversorgung von 35 Millionen Menschen bedroht. Ausgelöst werden diese Redoxänderungen durch den verstärkten Eintrag von organischen Substanzen. Es ist ein zeitlich verzögerter Vorgang, der – einmal in Gang gekommen – mit technischen Mitteln kaum zu stoppen ist.

- Arneth, J.D., Milde, G., Kerndorff, H., Schleyer, R. (1989) Waste deposits influences on ground water quality as a tool for waste type and site selection for final storage quality. In: Baccini, P. (Editor) The Landfill – Reactor and Final Storage. Lecture Notes in Earth Sciences 20: 399-416. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg
- Harvey, C.F., Swartz, C., Badruzzaman, A.B.M., Keon-Blute, N., Yu, W., Ali, M.A., Jay, J., Beckie, R., Niedan, V., Brabander, D., Oates, P.M., Ashfaq, Kh.N., Islam, S., Hemond, H.F., Ahmed, M.F. (2002) Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh. Science 298, 1602-1606

22 Erkenntnisse zum Leitbild „Endlager in der Abfallwirtschaft“

Peter Baccini und seine Kollegen haben für eine fiktive **Modellregion Metaland** abgeschätzt, was passiert, wenn die Abdichtungen einer solchen Reaktordeponie nicht mehr funktionstüchtig sind. Das Ergebnis ist, dass dann vermutlich jedes Jahr die Konzentrationen von Zink und Chlorid im Grundwasser um 5 % bzw. 7 % zunehmen, die gelöste **organische Substanz jedoch um 50 Prozent**.

Eine zweite Schätzung betrifft die Zeitspanne, bis **umweltverträgliche Frachten im Deponie-Sickerwasser** erreicht werden. Dies dauert für das Beispiel Zink nur etwa maximal 10 Jahre, bei den Stickstoffverbindungen etwa 50 Jahre und bei den Chloridfrachten etwa 100-200 Jahre. Bei den Frachten an gelösten organischen Substanzen wird dieser umweltverträgliche Zustand erst nach etwa **1000 Jahren** erreicht.

Das bestätigte die Forderung nach einer „Endlagerqualität“ der festen Abfälle, wie sie bereits 1986 im Leitbild der Schweizer Abfallwirtschaft erhoben und seitdem konsequent verfolgt wurde. Quintessenz: **„Organische Stoffe gehören nicht in ein Endlager“**.

- Baccini, P., Belevi, H., Lichtensteiger, T. (1992) Die Deponie in einer ökologisch orientierten Volkswirtschaft. Gaia 1: 34-49
- Belevi, H., Baccini, P. (1989) Long-term behaviour of municipal solid waste landfills. Waste Management Res. 7 : 483-499

Anonym (1986) Leitbild für die Schweizerische Abfallwirtschaft. Ausgearbeitet von der Eidgenössischen Kommission für Abfallwirtschaft. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 51, 41 S.. Herausgegeben vom Bundesamt für Umweltschutz, Bern, Juni 1986.

23 Stabilität von Müllverbrennungsresten unter Deponiebedingungen

Die Frage ist nun, ob eine **Deponie von Reststoffen aus der Müllverbrennung einem Endlager entspricht**. Auch dazu gibt es vor allem Untersuchungen aus der Schweiz. Wenn man das **Alter** dieser Müllverbrennungsreste vergleicht, dann kann man erkennen, dass die jüngsten Beispiele noch **Calciumhydroxide und Calciumsilikate** enthalten, die bei den älteren Beispielen sukzessive verschwinden. **Calciumkarbonat** bleibt stabil, wahrscheinlich werden die basischen Minerale ebenfalls in Karbonat umgewandelt.

Bacini, P., Bader, H.-P., Belevi, H., Ferrari, S., Gamper, B., Johnson, A., Kersten, M., Lichtensteiger, T., Zeltner, C. (1993) Deponierung fester Rückstände aus der Abfallwirtschaft – Endlagerqualität am Beispiel Müllschlacke. vdf Hochschulverlag, Zürich, 100 S.

24 Prognose: Sickerwässer aus Müllschlacken-Deponien

Nach den vorliegenden Prognosen können in der **langfristigen Entwicklung einer Müllschlacken-Deponie** drei Phasen unterschieden werden:

1. In einer **Auswaschphase** werden vor allem Chloride und Sulfate gelöst. Die Metallfreisetzung erfolgt auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Schlackedeponie fungiert offenbar sogar als Schwermetallsenke.
2. Danach folgt eine Phase, in der die Sickerwässer durch **Karbonate** gepuffert sind. Da der pH-Wert in der Regel nicht unter 7 sinkt, wird praktisch keine Schwermetallfreisetzung stattfinden.
3. Eine solche Metallmobilisierung ist erst zu erwarten, wenn z.B. die saure Niederschläge die **Kalkanteile weggelöst** sind. Dann würden bei den Schwermetallen zuerst Zink und Cadmium, später auch Blei und Kupfer freigesetzt. Für eine mehrere Meter mächtige Deponie könnte die Karbonatpufferung bei heutigen Säureeinträgen mehrere Jahrtausende vorhalten. Mit der erwarteten Abnahme der Säureeinträge würde sich dieser Zeitraum noch weiter hinausschieben.

Anonym (1992) Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke (Projekt EKESA). MBT Umwelttechnik Zürich/EAWAG, Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt, Dübendorf/Schweiz

Kersten, M., Johnson, C.A., Moor, Ch. (1995) Emissionspotential einer MV-Schlackendeponie für Schwermetalle. Müll u. Abfall 11: 748-758

Kersten, M., Schulz-Dobrick, B., Lichtensteiger, T., Johnson, A. (1998) Speciation of Cr in leachates of a MSWI bottom ash landfill. Environ. Sci. Technol. 32: 1398-1403

Hirschmann, G. (2003) Langzeitverhalten von Deponien. In: Förstner, U., Grathwohl, P. (Hrsg.) Ingenieurgeochemie – Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. S. 273-298. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

25 Langzeitentwicklungen von Reaktor- und Inertstoffdeponien

Aus den vorliegenden Daten ergeben sich für die Reaktor- und Inertstoffdeponien unterschiedliche Perspektiven. Die **Sickerwässer der Reaktordeponie** erreichen im Zeitraum von mehreren Jahren die Methanphase. Es ist jedoch weitgehend ungeklärt, wie sich die Deponien nach dem Abbau der organischen Komponenten verhalten. Die Frage ist z.B., ob die eindringenden sauerstoffhaltigen Niederschläge zu einer **Oxidation der Sulfidminerale** führen. In diesem Fall könnte sich Schwefelsäure bilden und dadurch würden auch toxische Schwermetalle mobilisiert.

Sehr viel übersichtlicher sind die Verhältnisse in einer **Deponie von Müllverbrennungsresten**. Die erste Phase der **Chloridlösung** könnte sogar in die technische Konditionierung einbezogen werden; teilweise erfolgt dies schon jetzt durch einen Waschprozess und eine dreimonatige Lagerung. Bei der Bildung und Umbildung von **Calcium-Aluminium-Silizium-Hydraten** ist keine wesentliche Änderung der Metallmobilität zu erwarten. Dies wäre erst bei einer Auflösung der Karbonatminerale denkbar, aber selbst in diesem Fall wäre der Übergang in das Grundwasser über einen langen Zeitraum gestreckt. Als Fazit ist festzustellen, dass der große **Vorteil dieser mineralischen Inertstoffdeponie in der sicheren Vorhersage ihrer langfristigen stofflichen Entwicklung** liegt.

Förstner, U. (1996) Langzeitprognosen und naturnahe Dauerlösungen – ingenieurgeochemische Konzepte für Schadstoffe in Abfällen auf Deponien und in Böden. Geowissenschaften 14: 169-172

26 Naturnahe Technologien für Böden und Gewässersedimente

Im abschließenden Teil meines Vortrags möchte ich einige weitere Beispiele für die Anwendung von naturnahen, geochemisch begründeten Techniken geben. Ich werde mich dabei vor allem auf Problemlösungen für Böden und Sedimente in Flusseinzugsgebieten konzentrieren.

Förstner, U. (1995): Risk assessment and technological options for contaminated sediments - a geochemical perspective. Mar. Freshwater Res. 46: 113-127

Förstner, U. (2002): Soil and sediment problems. In: Burden, F.R., McKelvie, I., Förstner, U., Guenther, A. (Eds.) Environmental Monitoring Handbook. Chap. 12, pp. 12.1-12.23. McGraw-Hill New York

Jacobs, P., Förstner, U. (2003) Gewässersedimente und Baggergut. In: Förstner, U., Grathwohl, P. (Hrsg.) Ingenieurgeochemie – Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. S. 330-360. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

27 Sedimentprobleme in einem Flusseinzugsgebiet

Die Belastung von Sedimenten mit Schadstoffen kann unterschiedliche Ursachen haben: Luftverschmutzungen, die in Form nasser oder trockener Depositionen eingetragen werden; Oberflächenabschwemmungen von Böden als sog. diffuse Quellen; und punktförmige Quellen, insbesondere Einleitungen aus Industriebetrieben und Kommunen, Deponiesickerwässer und – lokal sehr wichtig für den Eintrag von Schwermetallen – Zuflüsse aus Bergwerken.

Im **Oberlauf** der Flüsse fallen die belasteten Sedimente vor allem in Seen, Rückhaltebecken und Stauseen an. **Flussmündungsgebiete und Häfen** sind besonders vielfältig von Sedimentproblemen betroffen.

Für die Lösung von Sedimentproblemen werde ich im folgende drei Möglichkeiten aufzeigen:

- 1) **Festlegung von Schadstoffen ,Vor-Ort'**, am Beispiel von gefluteten Bergwerken,
- 2) **Sicherung von flächenhaft verteilten Sedimenten und Böden in Überflutungsgebieten** mit Hilfe von natürlichen und verstärkten Rückhalte- und Stabilisierungsprozessen, und
- 3) langzeitsichere Ablagerungen von Baggergut in sog. **Unterwasser-Depots mit einer Abdeckung**, die stabilisierende Zuschlagstoffe enthält.

Förstner, U. (2003): Geochemical techniques on contaminated sediments – river basin view. Environ. Sci. & Pollut. Res. 10 (1) 58-68

Förstner, U. (2004): Flussgebietsmanagement am Beispiel von Sedimenten. Kap. 10.4.3 in: Umweltschutztechnik, 6. Auflage, S. 350-351. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

28 Vor-Ort-Reinigung von Bergbauabwässern mit passiven Barrieren

Das erste Beispiel betrifft **Bergwerke** in Sachsen, die nach der Wende aufgegeben wurden und inzwischen geflutet werden. Dabei werden Schwermetalle in hohen Konzentrationen freigesetzt, und wird vermutet, dass aus diesem Grunde die Belastung der Gewässersedimente im Unterlauf wesentlich weniger als erwartet zurückgegangen ist.

Die abfließenden Lösungen werden **teilweise technisch aufbereitet**, besonders in der ersten kritischen Phase bei extrem hohen Konzentrationen, bis eine bestimmte Restkonzentration erreicht ist. Danach folgt eine lange Zeitspanne, in der die Konzentrationen zwar immer niedriger werden, die abgeführten Frachten aber dennoch beträchtlich sind. Für diese zweite Phase haben wir in einem Forschungsvorhaben untersucht, ob mit bestimmten **Sorptionsmitteln**, vorzugsweise mit Abfallstoffen, ein Teil dieser Metalle in den Bergwerken fixiert werden kann.

Die günstigsten Resultate aus technischer und wirtschaftlicher Sicht versprechen die Verwendung von **Flugaschen** aus der Kohleverbrennung wegen ihres hohen Säurepuffervermögens und der Einsatz von **Rotschlämmen** aus der Aluminiumproduktion wegen ihrer relativ hohen spezifischen Oberfläche für die Bindung von Schwermetallen.

Paul, M. (2003) Geochemische In-Situ-Stabilisierung von Bergbaualtlasten. In: Förstner, U., Grathwohl, P. (Hrsg.) Ingenieurgeochemie – Natürlicher Abbau und Rückhalt, Stabilisierung von Massenabfällen. S. 298-329. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

Baacke, D. (2000) Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfiderzgruben am Beispiel der Grube „Himmelfahrt“ in Freiberg/Sachsen. Diss. TU Bergakademie Freiberg, 139 S.

Zoumis, T., Calmano, W., Förstner, U. (2000): Demobilisierung von Schwermetallen aus Grubenwässern. Acta Hydrochim. Hydrobiol. 28: 212-218

29 Materialien für den Einsatz in Reaktions- und Sorptionswänden

An dieser Stelle gibt es eine Querverbindung zur Entwicklung und zum Einsatz von Sorptionsmittel in den Reinigungswänden, die bei Grundwasserkontaminationen eingesetzt werden.

Sie sehen hier eine Auswertung von Dr. Birke vom BMBF-Verbund RUBIN – **Reinigungswände und -barrieren im Netzwerkverbund** – für 124 Projekte aus aller Welt. In der Mehrzahl der Fälle geht es um die Eliminierung von chlororganischen Verbindungen durch nullwertiges Eisen, wir finden aber auch Sorptions- und Fällungsmittel wie Eisenoxid, Silikate, Branntkalk und Zeolithe. Diesen Zeolithen werden wir gleich noch einmal begegnen, wenn wir uns ihre Verwendung in einer aktiven Abdeckung von Sedimenten ansehen.

Birke, V. (2001) Reinigungswände 2001: Schadstoffe und reaktive Materialien – Stand der Technik, Entwicklungen und Grenzen. RUBIN – Reinigungswände und -barrieren im Netzwerkverbund. 116 S. Fachhochschule Nordostniedersachsen Suderburg

30 Mechanismen für den natürlichen Rückhalt von Schadstoffen

Die generelle Finanznot hat insbesondere im Altlastenbereich zur einem starken Rückgang der Sanierungsprojekte geführt, und es werden z.B. heute nur noch wenige Maßnahmen mit Waschverfahren oder Thermischen Verfahren durchgeführt. Gleichzeitig hat das Interesse an naturnahen Methoden zugenommen, in erster Linie der Einsatz von biologische begründeten Techniken. In den USA und den Niederlanden hat man frühzeitig auf die **Methode des natürlichen Abbaus und Rückhalts von Schadstoffen** – Natural Attenuation – gesetzt, und vor einem Jahr ist auch ein großer Forschungsverbund „KORA“ – Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau – beim Bundesministerium für Bildung und Forschung endlich in Gang gekommen.

Bei allen kontroversen Diskussionen, die zwischen der Wissenschaft und Praxis stattfanden und die immer noch anhalten, muss man doch feststellen, dass das **vertiefte Prozessverständnis** des Natural Attenuation-Ansatzes auf jeden Fall ein beträchtliches wirtschaftliches Potenzial darstellt.

Der natürliche Rückhalt ist ein typisch geowissenschaftliches Thema. Er besteht aus einer breiten Palette von stabilisierenden Mechanismen – **Kompaktion, Rekristallisation, Sorption und Fällung** – die letztlich zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Feststoffe und zu einer Verringerung der Schadstoffwirkung führt. An zwei Beispielen zur Arsenbindung an Eisenoxiden möchte ich diese Effekte darstellen.

Förstner, U., Gerth, J.: Natural attenuation – non-destructive processes. In: Stegmann, R., Brunner, G., Calmano, W., Matz, G. (Hrsg.) Treatment of Contaminated Soil. S. 567-586. Springer-Verlag Berlin 2001

Förstner, U., Beitinger, E., Tarnowski, F., Gehrke, M., Burmeier, H., Jacobs, P. : Soil and sediment remediation. In: Burden, F.R., McKelvie, I., Förstner, U., Guenther, A. (Eds.) Environmental Monitoring Handbook. Chap. 13, pp. 13.1-13.47. McGraw-Hill New York 2002

31 Bindung von Arsen an Eisenoxidoberflächen - Einfluß der Kontaktzeit

Bei anorganischen Schadstoffen erfolgt der verstärkte Rückhalt durch Prozesse wie Sorption, Fällung, Mitfällung und Einbau in Speichermineralen. Für die Sorption stehen Plätze unterschiedlicher Bindungsenergien zur Verfügung.

Hier wird dargestellt, wie sich die unterschiedliche **Kontaktzeit** einer Arsenatlösung mit Eisenoxiden auf eine spätere Elutionsphase auswirkt. Eine 100%ige Bindung von Arsenat bei geringer Anfangskonzentration erfolgt relativ schnell. Nach Ende der Reaktionszeit von 16 Stunden bzw. 1 Woche wurde versucht, die gebundenen Anteile mit 0,5 molarer Natronlauge während einer 1stündigen Extraktionszeit zu mobilisieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Anschluss an die Adsorption **langsame Festlegungsvorgänge** ablaufen, die eine Immobilisierung des Schadstoffs bewirken.

Gerth, J., Dankwarth, F., Förstner, U. (2001): Natural attenuation of inorganic pollutants – a critical review. In: Stegmann, R., Brunner, G., Calmano, W., Matz, G. (Hrsg.) Treatment of Contaminated Soil. S. 603-614. Springer-Verlag Berlin 2001

32 Arsenbindung an Eisenoxidoberflächen - Einfluss der Verdünnung

In einem zweiten Beispiel ist die relative Adsorption von Arsenat an Eisenoxid bei einem unterschiedlichen Metallangebot dargestellt. Bei geringen Anfangskonzentrationen von Arsenat werden über den gesamten untersuchten pH-Bereich 100% des vorgelegten Arsens gebunden. Erst bei einer Anfangskonzentration von mehr als 100 mmol/L Arsen wird weniger als 100% adsorbiert.

Dieser Befund deutet darauf hin, dass der **Faktor Verdünnung** bei den Sorptionsprozessen eine entscheidende Rolle spielt. Der Faktor Verdünnung sollte unter Langzeitaspekten durchaus weiter diskutiert werden (Gerth et al. 2001).

33 Sicherung kontaminierter Sedimente – Aktive Barriere

Für Gewässersedimente oder Baggerschlämme mit ihrer breiten Schadstoffpalette bedeutet „Sicherung“ in erster Linie eine Ablagerung in natürlichen oder künstlichen Vertiefungen unter dauerhaft **anoxischen Verhältnissen**. Diese Bedingungen sind deshalb vorzuziehen, weil die **Schwermetallsulfide sehr schwer löslich** sind.

Zur weiteren Absicherung gegen einen Schadstoffübergang in den darüber liegenden Wasserkörper kann man entweder die natürliche Sedimentation nutzen oder künstliche Abdeckungen herstellen. Noch weiter lässt sich die Sicherheit verbessern, wenn man dieser **Abdeckungsschicht eine aktive Komponente zumischt**, mit der Schadstoffe aus dem aufsteigenden Porenwasser zurückgehalten werden. Wir haben das bereits bei den Reaktionswänden gesehen.

Jacobs, P. (2003) Kontaminierte Sedimente und Baggertgut: Aktive Barriere-Systeme für die subaquatische Lagerung und Abdeckung. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg. 202 S.

34 Subaquatisches Depot + Aktive Barriere – Projekt Hitzacker/Elbe

Wir haben zusammen mit australischen Kollegen verschiedene Zuschlagstoffe für eine solche aktive Barriere getestet und es soll nun an einem Fallbeispiel ihre Wirksamkeit getestet werden.

Das Projekt wurde für einen kleinen **Sportboothafen an der Elbe** geplant. Es liegen dort verschmutzte Sedimente, die über einen Stichkanal in den Hafen eingeschwemmt worden sind. Dieser Stichkanal soll von beiden Seiten geschlossen und mit den kontaminierten Sedimenten, die nach einem patentierten Verfahren ganz vorsichtig aufgenommen werden, verfüllt werden. Anschließend wird die Barriere mit den Zuschlagstoffen aufgebracht und die Testphase kann beginnen.

Josef Möbius Baugesellschaft (Hamburg) und Arbeitsbereich Umweltschutztechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg (2002): Einrichtung und Überwachung eines Testfelds zur Abdeckung kontaminierten Baggerguts mit aktiven Barriere-Systemen, Sportboothafen Hitzacker/Elbe. Antrag auf Förderung einer Forschungs- und Entwicklungsmaßnahme beim Projektträger Wassertechnologie und Entsorgung, FZK Karlsruhe

35 Zeolithe als chemische Barriere – Prüfung der Rückhaltewirkung

Als Sorptionsmittel wird der Sandabdeckung vor allem ein **Zeolithmaterial** zugemischt, das sich aus technischen und wirtschaftlichen Gründen als optimal herausgestellt hat. Die Überwachung erfolgt über ein sog. Peepersystem, das für diese Anwendung weiterentwickelt und unter **Realbedingungen in einem Abwasserteich bei Leipzig getestet** wurde. In diesem System können tiefenbezogen die Porenwässer im Sediment und in der Abdeckung verfolgt werden. Die Weiterentwicklung bestand darin, dass die Lösungen immer wieder ausgetauscht werden können und damit die Veränderungen über lange Zeiträume verfolgt werden können.

Dieses Projekt markiert einen **Wandel in der administrativen Behandlung** von lokalen Schlickproblemen. Meist wurden diese durch eine „Rückverlagerung“ des mehr oder weniger stark kontaminierten Sedimentes in das Gewässer gelöst. In der wasserrechtlichen Plangenehmigung der vorliegenden Sanierungsmaßnahme sind die technischen Verfahren und die Überwachungsmethoden detailliert aufgeführt. Der Zeitplan für die Baggararbeiten und für den Einbau der Sedimente berücksichtigt die ökologischen Verhältnisse im Vorfluter, in diesem Fall der Elbe.

Förstner, U., Jacobs, P. (2003) Aktive Barriersysteme zur Minimierung der Schadstofffreisetzung aus kontaminierten Meeres- und Süßwassersedimenten. Teilvorhaben B: Auswahl und Charakterisierung der Materialien für die Barriere. Abschlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt 02WS9732/4 beim Projektträger PTWT+E.

Jacobs, P.H., Förstner, U. (1999) The concept of sub-aqueous in-situ capping of contaminated sediments with active barrier systems (ABS) using natural and modified zeolites. Water Res. 33 (9): 2083-2087

Jacobs, P.H. (2003) Monitoring of subaqueous depots with active barrier systems (SUBAD-ABS) for contaminated dredged material using dialysis samplers and DGT probes. J. Soils Sediments 3 (2): 100-107

36 Ausbreitung von Schadstoffen aus subaquatischen Depots

In dem Beispiel der Schlickdeponie Hollandse Diep kommt alles zusammen, was wir für eine nachhaltige Problemlösung bei kontaminierten Sedimenten benötigen:

- günstige hydrogeologische und geochemische Milieubedingungen, und
- langfristige Prognosen in einem adäquaten Überwachungskonzept.

Für die langzeitsichere Lagerung von Baggerschlämmen kommen – nach allem, was wir wissen – nur sog. subaquatische Depots in Frage, d.h. die permanente Ablagerung unter Sauerstoffabschluss. Dabei findet in der Regel eine **Selbstverdichtung** am Übergang zum Grundwasser statt. Ohne advektiven Transport kann man mit einfachen **Diffusionsmodellen** rechnen

Der holländische Richtlinienansatz betrachtet die Kontamination eines Untergrundvolumens, das dem **Volumen der Schlickeinlagerung** entspricht. Die Ausbreitung eines Schadstoffs wird berechnet für **10.000 Jahre** und darf einen Richtwert an der Front dieses Untergrundvolumens nicht überschreiten. Bei zu hohen berechneten Werten müssen zusätzliche Sicherungsmaßnahmen eingebaut werden.

DEPOTEC, Amersfoort und Strom- und Hafenbau, Hamburg (2002) Die subaquatische Unterbringung von Baggergut in den Niederlanden. Sachstandsbericht, Januar 2002.

Loxham, M. (1988) The predictive assessment of the migration of leachate in the subsoils surrounding mine tailings and dredging spoil sites. In: Salomons, W., Förstner, U. (Editors) Environmental Management of Solid Waste – Dredged Material and Mine Tailings. S. 3-23. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg

37 Von grundlegenden Erfahrungen zu nachhaltigen Lösungen

Der Vortrag befasste sich mit vier Themenkomplexen, bei denen der Langzeitcharakter partikelgebundener Schadstoffbelastungen künftig neue Untersuchungsstrategien und Problemlösungen erforderlich machen wird:

1. Die Ableitung der Qualitätsziele für Feststoffe von den vorwiegend bodenbezogenen langfristigen Belastungsgrenzen (Leitbild „Nachhaltigkeit“) unter Berücksichtigung typischer medienübergreifender Effekte.
2. Die Suche nach Indikatorsubstanzen, mit denen nachteilige Auswirkungen von verzögerten Umsetzungen in Böden, Sedimenten und Abfällen, die über mittlere Zeitskalen von Monaten bis Jahrzehnten stattfinden, bereits in einem frühen Stadium erfasst werden können.
3. Die Einbettung der wirkungsbezogenen Untersuchungsparameter für Feststoffe (Mobilisierbarkeit, Bioverfügbarkeit, Speziation von Schadstoffen) in die Langzeitdynamik von Steuerpotentialen und Matrixeigenschaften.

4. Die Anwendung dieser Erkenntnisse bei der langzeitsicheren Deponierung von Abfällen, bei naturnahen Sanierungsmaßnahmen im Bereich Boden/Grundwasser und bei flussgebietsübergreifenden Sedimentproblemen.

Im Mittelpunkt der künftigen Bewertungs- und Schutzstrategien steht das Wasser in der ungesättigten Bodenzone und der Paradigmenwechsel des neuen Bodenschutzrechts manifestiert sich in der sogenannten Sickerwasserprognose. Auch die Kriterien, die künftig bei Entscheidungen über die Wiedernutzung von industriellen Brachflächen anstelle der Erschließung neuer gewerblicher Grundstücke („Flächenrecycling“) Anwendung finden, werden neue Formen der Prognosen benötigen. Darüber hinaus stellt das vertiefte Prozessverständnis, wie es sich in diesen Bewertungsverfahren, aber auch z.B. in dem „Sanierungs“-Ansatz des „Natural Attenuation“, ausdrückt, grundsätzlich ein beträchtliches wirtschaftliches Potenzial dar. Es ist zu erwarten, dass die intrinsischen Stabilisierungsprozesse z.B. in kontaminierten Böden und Sedimenten von Niederungsgebieten in den kommenden Jahren im Zuge des flussgebietsübergreifenden Gewässermanagements eine verstärkte Aufmerksamkeit erhalten werden.

38 Forschungsverbünde zum Boden- und Grundwasserschutz

Die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Umweltgeochemie sind in den vergangenen sowohl von der Deutschen Forschungsgemeinschaft als auch vom Bundesministerium für Bildung und Forschung intensiv gefördert worden. Wichtige Grundlagen wurden im DFG-Schwerpunktprogramm „Geochemische Steuerprozesse mit Langzeitfolgen im anthropogen beeinflussten Sickerwasser und Grundwasser“ erarbeitet. Bei der BMBF-Projekten waren die Gesetzesverfahren im Bereich der Abfallwirtschaft (Verbundprogramm „Deponiekörper“), die Novellierung der Bodenschutzverordnung (Verbundprojekte „Sickerwasserprognose“, „Reaktive Wände“, „Kontrollierter Rückhalt und Abbau“) und die EU-Wasserrahmenrichtlinie (BMBF-Verbundprojekte „Feinsedimentdynamik und Schadstoffmobilität in Fließgewässern“) Anlass für eine Förderung geochemisch begründeter Forschungsarbeiten. Schließlich sind noch die Forschungsaktivitäten im Hinblick auf die Entwicklung einer EU-Bodenschutzrichtlinie zu nennen, insbesondere das große Verbundprojekt „AQUATERRA“ im 6. Forschungsrahmenprogramm, in dem übergreifend die Prozesse, die zwischen Wasser und Boden stattfinden, untersucht werden sollen.