

Forschung, Wissenschaft

Geochemische Aspekte unserer Umwelt*

Theodor Hügi**

Abstract

Since the industrial revolution of the 19th century, due to human activities, increasing amounts of toxic substances are released and may influence in many ways the health of man. Examples show where toxic elements occur in the geological environment and how they can circulate. Discussed are the following examples: burning of fossil fuels, petrol and domestic waste, the use of sewage sludge in agriculture and safe disposal of radioactive waste. Distribution in various geological and other environments and characteristics of substances such as CO₂, SO₂, HCl, N-oxides, Cd, Hg, Pb, Zn, Cu, Ba, Cr, Ni, Co and Mo are discussed. Five tables give data on substances found in various environments. In solving such problems interdisciplinary investigations, in which geochemistry may play an important rôle, are needed.

A. Einleitung

Vor bald 30 Jahren bot sich mir die Gelegenheit, an einem schottischen Forschungsinstitut arbeiten zu können. Am Macaulay Institute for Soil Research in Aberdeen wurde ich erstmals mit interdisziplinär betriebener Forschung konfrontiert. Forschern des genannten Instituts gelang es, in Zusammenarbeit mit Kollegen eines tierärztlichen Instituts (Rowett Research Institute for Animal Nutrition) die Co-Mangelkrankheit bei Schafen zu klären. Vor allem Jungschafe erkrankten und gehen ein, wenn getrocknetes Weidgras weniger als 0.08 ppm Co enthält. Das Vitamin B₁₂ (Co-haltig) kann dann im Pansen der Jungschafe durch Bakterien nicht mehr in genügendem Masse produziert werden. Seit dieser in Aberdeen verbrachten Zeit hielt ich es für richtig, im Rahmen einer Geochemie-Vorlesung auf Zusammenhänge Boden–Leben hinzuweisen. Der eigentliche Begründer der Geochemie, *Schönbein* [1], hat bereits 1838 ein Programm der geochemischen Forschung umrissen, das heute noch in verschiedener Hinsicht aktuell ist: «Wir müssen mit grösster Genauigkeit die Eigenschaften des einzelnen geognostischen Gebildes kennen lernen, wir müssen die Beziehungen, in welchen diese Erzeugnisse hinsichtlich ihrer chemischen Natur, physikalischen Beschaffenheit und chronologischen Aufeinanderfolge zu einander stehen, so scharf genau als nur immer möglich ausmitteln, und zu gleicher Zeit die Producte, welche durch die, heuti-

gen Tages noch chemisch wirksamen, Kräfte hervor-gebracht werden, mit den unorganischen Körpern der Umwelt sorgsamst vergleichen. Es muss, mit einem Worte, erst eine vergleichende Geochemie geschaffen werden, ehe die Geognosie zur Geologie werden, und ehe das Geheimnis der Genesis unseres Planeten und der ihn constituierenden unorganischen Massen enthüllt werden kann.» Heute ist es eine Selbstverständlichkeit, dass sich die Geochemie auf chemische, physikalische und geophysikalische Fakten abstützen muss. Die Bedeutung der biophilen Elemente, deren Wanderungs- und Anreicherungs-möglichkeiten in der belebten Welt hat V.M.Goldschmidt, ein Pionier der Geochemie, bereits vor mehr als fünfzig Jahren erkannt. Die Geochemie weist Berührungspunkte mit den verschiedensten Bereichen der Erdwissenschaften, aber auch mit biologischen Disziplinen, auf. Der Petrologe beispielsweise interessiert sich für stoffliche Umlagerungen, die in der Lithosphäre im Verlaufe erdgeschichtlicher Vorgänge bei wechselnden *p-t*-Bedingungen stattgefunden haben. Nach heutigen Vorstellungen ist die Entwicklung unserer Erde keineswegs abgeschlossen. Es wird mit einem andauernden Stofffluss Erdkern → Mantel → Kruste (Lithosphäre) → Biosphäre gerechnet. In älteren oder jüngeren geologischen Zeiten, insbesondere während gebirgsbildender Prozesse, kam es oft zu spektakulären Gesteinsumwandlungen: so kann bei entsprechend grossem *p* und *t* ein monoton aussehender Ton z.B. zu einem schönfarbigen Disthen-Stauroolith-Paragonit-Muskowitschiefer werden. Es gibt aber auch Umwandlungen, die heute und andauernd in wenig augenfälliger Weise vor sich gehen. Ich denke da vor allem an solche, die im Spannungsfeld Lithosphäre, Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre ablaufen. Beim Zirkulieren von Wasser entlang von Rissen und Klüften im Fels wird dauernd mineralische Substanz weggeführt, es kommt zur chemischen Erosion. Die Existenz der chemischen Erosion wird beispielsweise aufgezeigt durch Analysen von Grundwasser, von Stollenwässern sowie von Mineral- und Thermalquellen. Karren- und Höhlenbildungen im Kalk- und Gipsfels sprechen für sich. In Zusammenarbeit mit dem Kantonalen Laboratorium Bern und den Kollegen Prof. Oeschger, Dr. Siegenthaler und Herrn Schotterer vom Physikalischen Institut Bern ist im Verlauf der letzten Jahre versucht worden, die Natur und Herkunft

* Dieser Aufsatz gibt den Inhalt der am 26. Juni 1979 gehaltenen Abschiedsvorlesung in teilweise erweiterter Form wieder.

** Adresse des Verfassers: Prof. Th. Hügi, Abteilung für Geochemie des Mineralogischen Instituts der Universität, Sahlstrasse 6, 3012 Bern

des Thermalwassers von Leukerbad zu untersuchen. Bei einem Trockenrückstand von rund 1800 mg/l und einem Gesamtguss von rund 1500 l/min können pro Jahr bis gegen 1000 t mineralische Substanz aus dem Gebirge abgeführt werden. Weiter ergaben Tritium- und Sauerstoffisotopenmessungen, dass zwischen Einsickern von Schmelzwasser im Majinggletschergebiet und Wiedertzutreten des Wassers in der Thermalquelle von Leukerbad relativ viel Zeit verstreichen muss, d.h. mindestens etwa 20 Jahre. Jegliche Veränderung, wie z.B. Ableiten von Schmelzwasser des Majinggletschers, würde sich daher erst nach mehr als 10 Jahren bemerkbar machen. Ein Thermalwasserrückgang wäre für die Rheumastation Leukerbad katastrophal.

Weniger bekannt ist allgemein, dass die chemische Erosion auch in kristallinem Gestein wirksam sein kann. Analysen an Stollenwässern aus dem Innertkirchner-Kristallin (Aarmassiv) haben beispielsweise folgende Werte ergeben:

K	bis 2.5 ppm
Na	67
SO ₄	20

Die Alkalien stammen vor allem aus den Feldspäten, aus deren Gerüstsilikatstruktur sie sich relativ leicht herauslösen lassen. Aus feinstem Orthoklaspulver wird durch destilliertes Wasser bereits nach kurzer Zeit K¹⁺ frei gemacht (Demonstrationsversuch mit Thymolblau).

Als geochemisch relativ mobil gelten z.B. Elemente wie U und Mo. Beide können bei günstigen pH-Werten durch Wasser, das mit dem Gestein in Kontakt kommt, herausgelöst werden. Dafür sprechen U- oder Mo-haltige Wässer. In U-Bergwerken ist immer wieder zu beobachten, dass Uran aus Pechblende-haltigem Gestein herausgelöst wird und es bereits nach Wochen zur Bildung von sekundären U-Mineralien, wie Autunit und weiteren U-Phosphaten und -Sulfaten kommen kann.

B. Beziehungen zwischen Geochemie und Umwelt

Nachstehend soll anhand ausgewählter Beispiele gezeigt werden, dass der Mensch bei all seinen Aktivitäten nicht ungestraft geochemisch-mineralogische Zusammenhänge vernachlässigen kann. Bei der Komplexität unseres Daseins laufen wir leicht Gefahr, vielleicht kurzfristig die Umweltbedingungen etwas zu verbessern, aber durch nicht zu Ende gedachte Massnahmen neue Probleme zu schaffen. Schädliche Auswirkungen können sich sofort, u. U. aber erst nach Jahren bemerkbar machen. Dabei müssen wir uns stets bewusst sein, dass umweltbelastende Vorgänge irreversibel sind.

1. Energieträger Kohle

Es dürfte allgemein bekannt sein, dass seit Beginn der Industrialisierung um die Mitte des 19. Jahrhunderts

der CO₂-Anteil in der Atmosphäre ständig steigt (im Jahr um 1/300 der Gesamtmasse CO₂). Damit ist ein irreversibler Vorgang eingeleitet worden. Wie *Siegenthaler* und *Oeschger* [2] und andere Forscher gezeigt haben, dürfte dies letztlich mit grösster Wahrscheinlichkeit zu einer unerwünschten Erwärmung der Erde führen, mit all den unabsehbaren und schlimmen Folgen. Damit hat es aber keineswegs sein Bewenden. Der fossile Brennstoff Kohle enthält meist in mehr oder weniger fein verteilter Form Erzminerale wie Pyrit und Zinkblende. Beim Verbrennen werden aus den sulfidischen Erzen in wechselnden Mengen neben dem schädlichen SO₂ auch noch Cd-haltige toxische Abgase freigesetzt. Das Cd ist als Spurenelement in der Zinkblende in variablen Mengen enthalten: Die Durchschnittswerte von Zinkblende verschiedener Vorkommen liegen zwischen 1350 und 4300 ppm Cd. Im menschlichen Körper können erhöhte Cd-Gehalte unheilbare Erkrankungen mit tödlichem Ausgang verursachen, wie die Itai-Itai-Krankheit. Im Einzugsgebiet der Pb-Zn-Mine Kamioka (Japan) trat seinerzeit eine rätselhafte Krankheit auf. Eingehende Untersuchungen der Itai-Itai genannten Krankheit ergaben, dass sie letztlich auf eine Verseuchung der Wässer und damit auch der Reisfelder unterhalb der Pb-Zn-Mine zurückzuführen war. Die Reisfelder wurden mit Abwässern der Mine bewässert. Wasser und Reis zeigten erhöhte Gehalte an Cd. Nierenvergiftung und Knochenleiden der Bevölkerung konnten eindeutig mit einer Cd-Vergiftung in Zusammenhang gebracht werden. Über festgestellte Cd-Gehalte orientiert die Tabelle 1 [3, 4].

Tabelle 1:

Cd-Gehalte im Gebiet der Pb-Zn-Mine Kamioka (Japan) [3]

Wasser Imtsu-Fluss	Cd, As, Pb, Zn-verseucht!
Boden verseucht	3,2–7,2 ppm Cd
Reis auf verseuchtem Boden	0,72–4,17
Kontrollgebiet Boden	max. 1
Reis	0,03–0,11

Cd- und Zn-Gehalte von Illinois-Kohlenaschen (23 Proben) [4]

Kohle bei 150° verascht	< 0,3–28 ppm Cd	18–3100 ppm Zn
Kohle bei 450° verascht	< 0,3–3,6	15–1760 ppm

Bergarbeiter von Zink-Minen und die Bevölkerung in deren Umgebung sind unbedingt vor Cd-Vergiftungen zu schützen. So wird beispielsweise das Zinkerz der Grube Mt. Isa (Australien) nicht an Ort und Stelle verhüttet, um die in der Grubenstadt lebende Bevölkerung zu schützen. Wenn auch die Kohle relativ weniger Cd enthält, so ist die Schädlichkeit des Cd, wie die des CO₂ und SO₂, gebührend zu berücksichtigen. Aus Amerika und Schweden sind neuerdings Fälle von Fischsterben bekannt geworden, wofür die Verseuchung der Gewässer durch Schwefelsäure verantwortlich gemacht wird. Dabei kann das SO₂ aus Kohle oder anderen industriellen Quellen stammen. Da beim Verbrennen der Kohle nicht allein CO₂-Gase, sondern

weitere Schadstoffe in die Atmosphäre gelangen können, die aus den im Brennstoff enthaltenen Erzmineralien entstehen, ist es deshalb nicht ratsam, zusätzlich benötigte Energie einseitig aus der Kohle zu beziehen. Hierzu kommt noch, dass beim Verbrennen der Kohle merkliche Mengen Quecksilber in die Atmosphäre gelangen. Bei einem Hg-Gehalt der amerikanischen Kohlen von 0,5 bis 3,3 ppm gelangen beim Verbrennen der 550 Mio t Kohle an die 275 bis 1800 t Quecksilber in die Atmosphäre. Ob die neue Generation der grossen Kohlekraftwerke eine echte Alternative darstellen, bleibt abzuwarten.

Im Umkreis von Hüttenwerken, die Sulfiderze verarbeiten, gibt es unschöne Beispiele zerstörter Baumbestände. Man versucht da und dort, die Missstände, etwa durch Erhöhen der Kamine, zu beheben.

2. Abgase von Kehrichtverbrennungsanlagen

Eine Möglichkeit, die stetig grösser werdenden Mengen von Kehricht zu beseitigen, besteht im Verbrennen. Im Umkreis solcher Anlagen ist in letzter Zeit verschiedentlich das Auftreten von Krankheiten festgestellt worden. Inwieweit letztere in Zusammenhang zu bringen sind mit Schadstoffen der erwähnten Anlagen, war bisher kaum eindeutig zu beurteilen. Dies wundert bei den derzeitigen Gegebenheiten nicht: die Zusammensetzung des Kehrichts ist komplex, variabel, und zeitweilig absichtlich oder unabsichtlich beigefügte toxische Stoffe können ohne laufend durchzuführende Analysen kaum im voraus erfasst werden. Es sei zudem bemerkt, dass Daten über Art und Menge der an die Atmosphäre abgegebenen Schadstoffe schwer erhältlich sind; die Herausgabe wird von gewissen Stellen sogar verweigert. Die Tabelle 2 gibt einige Zahlen für die Anlage Hinwil [5]. Es werden durch diese Anlage beispielsweise pro Jahr etwa 0,3 t Pb, 540 t Chlorwasserstoff und 90 t Schwefeldioxid an die Atmosphäre abgegeben. Vergleichsweise beträgt der Pb-Ausstoss der KEBAG Emmenspitz-Zuchwil ebenfalls rund 0,3 t pro Jahr, auch der SO₂-Ausstoss ist praktisch gleich [6].

Tabelle 2: Haushaltverbrennungsanlage Hinwil; Tagesleistung 120 t Müll/Tag

Schadstoffe

Pb	11	g/t verbrannten Mülls
Zn	45	
Ba	1,5	
Cd	0,3	
Cr	0,8	
Chlorwasserstoff	15,0	kg/t *
Fluorwasserstoff	0,055	
Schwefeldioxid	2,50	
Stickoxide	2,20	

* 95 %-Werte der Summenhäufigkeit

Angaben über Quecksilber sind spärlich. In der KEBAG [6] wurde stichprobenweise über einige Monate ein Hg-Gehalt von 0,2 mg/Nm³ Abgas gemessen.

Sicherlich müssen weitere Anstrengungen unternommen werden, damit kein Quecksilber mehr in den Kehricht kommt.

Die Abgase solcher Verbrennungsanlagen bedürfen sicher noch vermehrter Kontrollen, insbesondere auch hinsichtlich toxischer Elemente. Für verschiedene Schadstoffe müssen erst noch Limiten festgesetzt werden.

3. Quecksilber

Mit dem toxischen Element Quecksilber kann der Mensch auf verschiedenste Art in unerwünschte Berührung kommen. In den letzten Jahren gelangte Quecksilber, vor allem in der chemischen Industrie, vermehrt zum Einsatz. Der Weltverbrauch an Quecksilber beträgt jährlich mehr als 10000 t. Nicht zuletzt fehlender Reglemente wegen gelangt ein unbekannter Anteil an Quecksilber wieder in die Umwelt. Die schreckliche Minamata-Krankheit ist erstmals in Japan studiert worden [7]. Als Verursacher gilt die Industrie, welche Quecksilber verwendet (als Katalysator) und dieses unkontrolliert an die Umwelt abgibt. Dieses unrühmliche Beispiel mag eine ernsthafte Warnung sein. Ein weiterer Quecksilberherd stellen die in vorangehenden Abschnitten erwähnten Kohlen- und Kehrichtverbrennungsanlagen dar. Das wenige Zahlenmaterial zeigt jedenfalls die Anwesenheit von Hg in den Abgasen der erwähnten Anlagen. In einer interessanten Studie von Vernet und Thomas [8] findet sich eindrückliches Zahlenmaterial über Hg-Gehalte in Sedimenten von Schweizer Seen, Rhone und Industrieablaufkanälen.

Tabelle 3: Hg-Gehalte in:

a) Sedimenten von Schweizer Seen	Mittelwerte nach Vernet/Thomas [8]
Brienzersee	190 ppb Hg
Bielensee	546
Rhone	594
Lac Léman	675
Lac de Joux	970
Saosee-See (GR)	1056 !
b) Industrieablaufkanälen	
bei Visp	2154 ppb Hg (Mittel)
Martigny	6525
Monthey	11928 (bis 52192 = 52 ppm)
c) Rhone/Porte de Scex	
1964	169 ppm Hg
1970	970
1971	1404

Die Tabelle 3 gibt einige Daten in Auswahl. Eigenartigerweise zeigen unter den natürlichen Gewässern die Sedimente des Saosee-Gebirgssees (Val di Campo, E Berninapass) den höchsten Mittelwert von 1056 ppb Hg. Bestimmt sind die hohen Hg-Werte der Industrieablaufkanäle fabriktionsbedingt (anscheinend führten inzwischen getroffene Massnahmen zu einer Verbesserung). Ob der deutlich erhöhte Hg-Gehalt im Saosee-See tatsächlich der Industrie (nach Vernet/Thomas

Raum Mailand–Turin) angelastet werden kann, bedarf der Überprüfung. Als erstes sollen nun die Hg-Gehalte benachbarter Gesteinseinheiten ermittelt werden. Möglicherweise existiert um die seit langem bekannten sulfidischen Vererzungen am Berninapass mit Pyrit, Arsenkies, z. T. auch Antimonit, Bleiglanz, Zinkblende, ein sog. Quecksilber-Halo*. Bei geochemischen Prospektionsarbeiten ist es wiederholt gelungen, aufgrund erhöhter Hg-Gehalte an Gesteinen der Oberfläche auf tiefergelegene Erzkörper zu schliessen. So gelang es mit dieser Prospektionsmethode z.B., die Fortsetzung der Kupferlagerstätte Mitterberg (Österreich) nachzuweisen.

Im Falle des Kuskokwim River (Alaska), der absolut keine industrielle Verschmutzung aufweist, aus dessen Einzugsgebiet jedoch eine Hg-Vererzung bekannt ist, konnten in Flusssedimenten $< 0,04\text{--}520$ ppm Hg nachgewiesen werden [9].

Vielfach wird Saatweizen mit Quecksilber (Methyl-Hg) behandelt. Mangelnde Information und Kontrolle kann zu bedauerlichen Unfällen führen. Im Jahre 1972 wurde in Irak irrtümlich Saatweizen verspiesen, der vorher mit Hg behandelt worden war. Es traten 6530 Vergiftungsfälle, davon 459 mit tödlichem Ausgang, auf [10].

4. Blei

Die vermehrte Motorisierung hat eine dauernd zunehmende Verseuchung der Luft und der Vegetation im Bereich von stark befahrenen Strassen und Autobahnen zur Folge. Die Zunahme der Pb-Gehalte an einem amerikanischen Highway von 1961 bis 1969 veranschaulicht Abb.1. Generell nimmt der Pb-Gehalt mit grösser werdendem Abstand von der Strasse ab;

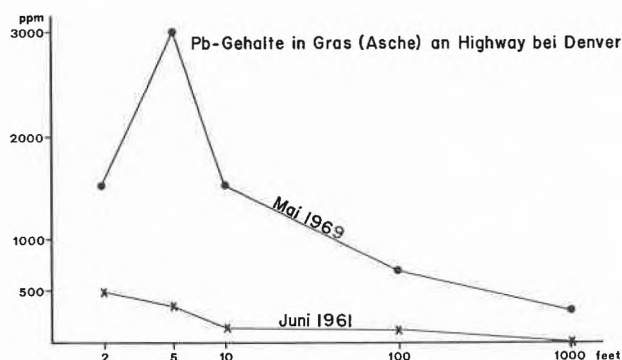


Abb. 1: In Gras (Asche) gemessene Bleigehalte (Werte in ppm) an gleichen Stationen in verschiedenen Abständen von Highway nahe Denver (USA). Messdaten: Juni 1961 und Mai 1969 (nach Environmental Geochemistry in Health and Disease. Edited by Cannon, Hopps, 1971, Memoir 123, Geol. Soc. America).

* Im Falle von magmatischen, insbesondere hydrothermalen Erzlagerstätten wanderten Cu-, Pb-, Zn-Sulfide usw. im Gestein weniger weit als Hg. Cinnabarit (HgS) bildet dann um den sulfidischen Erzkörper einen Halo. HgS erscheint meist feinverteilt im Gestein, das den sulfidischen Erzkörper umschliesst.

besondere Windsituationen und Topographie können aber Anomalien verursachen (siehe die 3000 ppm Spitze bei 5-feet-Abstand). Über die Pb-Gehalte neben verkehrsreichen Strassen gibt es in der Schweiz relativ wenig Daten. Vor allem fehlt es an systematischen Kontrollmessungen. Zur Zeit dürfte es kaum möglich sein, eindeutig festzustellen, wo und in welcher Distanz von einer Strasse Pflanzland, Getreide, Gras usw. ohne Bedenken genutzt werden darf. Die jährlich in der Schweiz von Motorfahrzeugen ausgestossene Bleimenge soll 700 t Pb ausmachen [11]. Pflanzen am Rande von Autostrassen zeigen Werte bis zu 100 ppm Pb in der Trockensubstanz. Selbst in Abständen von über 100 m ist noch eine beachtenswerte Pb-Ablagerung feststellbar. Nach erfolgtem Waschen von Pflanzen nimmt der Pb-Gehalt um 30 bis 65 % ab. In welchem Masse sich jedoch die Einnahme von bleiverseuchten Nahrungsmitteln physiologisch bei Mensch und Tier auswirkt, bedarf weiterer Untersuchungen. Die zitierte Arbeit von Zuber et al. [11] gibt Bleigehalte für verschiedene Pflanzenkulturen am Rand der Autobahn

Tabelle 4: Bleigehalte verschiedener Pflanzen am Rande der Autobahn Bern–Zürich (Ittigen) und auf dem Gurten (verkehrs-frei) – 1969 [11]

	Pb-Gehalt in ppm in Trockensubstanz	
	Autobahn	Gurten
Sommerweizen (ungewaschen):		
Körner	7,0	3,5
Spelzen	15,0	6,0
Stroh	76,0	8,5
Boden	12,5	8,0
Spinat:		
ungewaschen	55,0	11,0
gewaschen	25,0	7,5
Boden	7,5	4,0
Nüsslisalat:		
ungewaschen	157,5	–
gewaschen	81,5	27,5
Zwerghohnen:		
Schoten: ungewaschen	16,0	5,5
gewaschen	11,0	5,0
Blätter: ungewaschen	185,0	19,0
gewaschen	125,0	10,5
Stengel: ungewaschen	28,5	8,5
gewaschen	20,0	6,5
Boden	8,0	3,0

N1 und vom Gurten. Tabelle 4 gibt einige ausgewählte Daten. Die in Pflanzen vom Gurten gefundenen Bleigehalte sind durchwegs niedriger als in solchen am Rande der Autobahn. Inwieweit der Bleipege auf dem Gurten wegen der Stadtnähe auch bereits erhöht ist, wäre zu prüfen. Je nach der mineralogischen Zusammensetzung eines Bodens kann der natürliche Pb-Gehalt variieren. Der Pb-Gehalt von K-Feldspat, der durchaus in merklichen Mengen in den Böden vorkommt, beträgt zwischen einigen Zehner ppm Pb bis zu 1 %. In weitaus den meisten Fällen müssen die geo-

chemischen Grundlagedaten erst noch beschafft werden (natürlicher Grundpegel eines Elementes in Boden, Wasser, Luft). Was zu tun wäre, wurde wiederholt gesagt: aus präventivmedizinischer und ökologischer Vorsorge die weitere Bleiakкумуляtion möglichst gering halten. Langfristig muss auch die uneingeschränkte Nutzung von Kulturen entlang verkehrsreicher Strassen möglich sein [12]. Jedenfalls sind weitere Untersuchungen sowie die Herabsetzung des Bleigehaltes im Benzin oder bleifreier Ersatz vordringlich. Bei der Beurteilung der Lebensqualität für Anwohner einer stark befahrenen Strasse sollte nicht bloss Motorfahrzeuganzahl und Lärm, sondern auch der Pb-Gehalt der Luft ein Kriterium sein.

5. ARA-Klärschlamm

Mit der Verwertung des Klärschlammes in der schweizerischen Landwirtschaft und den verschiedenen, damit zusammenhängenden Problemen befasst sich eine Dissertation, die an der ETHZ erarbeitet wurde [13]. In dieser Arbeit wird u.a. festgestellt, dass bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm langfristig keine toxikologisch und hygienisch nachteilig wirkenden Substanzen auftreten sollen. Das toxikologische Risiko kann durch wiederholte chemische Analysen abgeschätzt werden. Wörtlich steht auf S. 7 der zitierten Dissertation: «Enthält ein Klärschlamm übermässige Gehalte an Schadstoffen, so kann das bei seiner landwirtschaftlichen Verwertung zu gefährlichen Anreicherungen dieser Stoffe im Boden führen. Dieser Umstand spricht aber nicht gegen eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes, sondern für eine Elimination der betreffenden Schadstoffquellen.» Nach Auffassung der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarkulturchemie und Umwelthygiene Liebefeld ist eine Minimierung des Schwermetallrisikos nur durch eine umfassende Kontrolle der Klärschlammproduktion und eine Auswahl der für die Verwertung geeigneten Schlämme aufgrund eindeutiger und anerkannter Kriterien möglich. In den letzten Jahren sind durch die erwähnte Forschungsanstalt Liebefeld an Klärschlamm

eingehende Untersuchungen durchgeführt worden. Umfangreiches Zahlenmaterial enthält die Dokumentation über die Informationstagung «Klärschlamm-Verwertung in der Landwirtschaft» [14]. In der nachstehenden Tabelle 5 sind die während verschiedener Beobachtungsperioden ermittelten Metallgehalte in ARA-Schlamm aufgeführt (Mittelwerte sowie minimale und maximale Werte). Die untersuchten 68 ARA-Anlagen erhalten teils häusliche Abwässer mit wenig Industrieanteil, aber auch solche mit normalem bis grossem Industrieanteil. Die Zahlen sind der erwähnten Dokumentation entnommen.

Die an den Kläranlagen 1971–75 und 1975/1976 viermal jährlich ermittelten Schwermetallgehalte zeigen ein recht ähnliches Bild, was auch für neueste Untersuchungsergebnisse gilt. Die Gehalte sind im einzelnen recht unterschiedlich, je nachdem, ob es sich um Klärschlamm aus häuslichem Abwasser handelt oder um solchen mit normalem oder grossem Industrieanteil. Vielfach liegen die gefundenen Werte über den Richtwerten. Als eigentliche Problemstoffe gelten Cd, Zn, Cu, Ni, was aber nicht besagt, dass die übrigen in landwirtschaftlich genutzten Böden keine Schäden hervorrufen. Überdies können Schwermetalle und andere Schadstoffe auch durch Handelsdünger und Pflanzenschutzmittel in den Boden gelangen. Selbstverständlich können Metalle in dosierten Mengen auch nützlich sein. Auf die Bedeutung einer ausreichenden Co-Versorgung des Weidgrases ist eingangs (s. S. 361) bereits hingewiesen worden. Wird landwirtschaftlich genutztes Land über längere Zeit mit ARA-Klärschlamm gedüngt, so besteht Gefahr, dass der Boden früher oder später mit toxischen Schwermetallen übersättigt und schliesslich unbrauchbar werden kann. Die in Böden verschiedenster Art vor sich gehenden Umlagerungen und Anreicherungen von Metallen sind schwer vorzusehen und kaum beeinflussbar. Ein verseuchter Boden kann kaum je wieder in den ursprünglichen Zustand übergeführt werden. In der Sicht des Geochemikers sind solche irreversible Vorgänge gar nicht verantwortbar. Es müssen daher so rasch als möglich Verfahren entwickelt werden, um die Schwermetalle und weitere Schadstoffe aus dem Klärschlamm zu entfernen. Dieses «recycling» bedingt selbstverständlich einen erheblichen Forschungsaufwand und finanzielle Mittel. Einwände wie, die Metallgehalte seien zu gering, die Rückgewinnungsverfahren brauchten zu viel Energie, sind nicht stichhaltig. Langfristig gesehen stellt sich die Frage, ob wir das Risiko eingehen dürfen, unbesehen unser ohnehin rar gewordenes Agrikulturland mit Schadstoffen so zu verseuchen, dass weitere Verluste entstehen.

6. Lagerung von radioaktivem Abfall

Ein ernsthaftes Problem, mit dem sich Geochemiker und Geologen ganz allgemein vermehrt befassen sollten, stellt die sachgerechte Lagerung des radioaktiven Abfalles dar. Wenn wir schon von der Kernenergie

Tabelle 5: Klärschlamm-Analysen (nach [14]). Gehalte in ppm bezogen auf Trockensubstanz.

Metall	Auswertung Klärschlamm-Analysen 1971–75 Mittelwert	Bereich	Analysen 1975/76 Bereich	Richtwert	Stark erhöhter Gehalt, wenn Wert höher als
Cd	29 ppm	1–930	2–1095	30	40
Hg	7	1–61	< 1–57	10	15
Zn	2423	110–14180	700–10950	3000	4000
Cu	455	92–4855	98–4855	1000	
Ni	106	7–2139	4–2139	200	250
Pb	521	60–8550	90–8550	1000	
Cr	257	12–3955	5–5180	1000	1500
Co	23	2–1565	3–1760	100	150
Mo	9	2–83	2–38	20	30

profitieren, müssen wir auch gewillt sein, den bereits vorhandenen Abfall im eigenen Land zu lagern. Das Problem einer einwandfreien Lagerung von hochaktivem und schwach/mittelaktivem Abfall ist nach meiner Ansicht so rasch als möglich zu lösen. Konzepte gibt es genug, nützen aber wenig. Was bald vorliegen soll, sind wohlüberdachte, wissenschaftlich verantwortbare, technisch realisierbare Ausführungsprojekte. Jeglicher radioaktiver Abfall ist dauernd isoliert von der Biosphäre zu lagern. Beim hochaktiven Abfall muss diese Isolation über Tausende von Jahren gewährleistet bleiben.

Falls bereits die Pharaonen Kernkraftwerke betrieben hätten, so müssten wir heute noch deren hochaktiven Abfall kontrollieren! Von den verschiedenen vorgeschlagenen Lagerungsmöglichkeiten, z.B. Weltraum, Polareis, Seabed, kommt für die Schweiz kaum eine ernsthaft in Frage. Prüfwert bleibt jedoch die Lagerung in der «Geologischen Formation». Der Nicht-Geologe hält diese Art der Lagerung für fast ideal und problemlos. Der Erdwissenschaftler weiss aber, dass eine geologische Formation ein komplexes Gebilde ist. Gesteinskörper sind in mineralogischer, chemischer, textueller, struktureller und damit auch in mechanischer Hinsicht kaum je einheitlich, höchstens im Kleinbereich. Grössere Gesteinskörper weisen in wechselndem Masse Klüfte und Störungszonen auf, was die Wasserzirkulation ermöglicht. Die in der geologischen Formation zirkulierenden Wässer können Ionen, wie SO_4^{2+} , Cl^{1-} , führen; letztere weisen daher gegenüber Metallen, Glas und keramischen Körpern in unterschiedlichem Ausmass aggressive Eigenschaften auf. Konditionierter Abfall darf mit solchen Wässern nicht in Kontakt kommen. Vor dem Einrichten eines Lagers müssen all die verschiedenen mineralogischen und geologischen Parameter (wie Wasserdichtigkeit, Mineralbestand, Sorptions- und thermische sowie felsmechanische Eigenschaften, Einfluss der Strahlung, tektonische und seismische Stabilität) einer hiefür in Aussicht genommenen geologischen Formation sorgfältig ermittelt werden (siehe dazu z.B. [15]). Die Lagerung von radioaktivem Abfall hat zunächst in einem Zwischenlager zu erfolgen. Dieses muss kontrollierbar und der Abfall rückholbar sein. Am aussichtsreichsten halte ich eine gegen Wasser völlig abzudichtende und sabotagesichere Felskaverne, z.B. in einem Granit mit günstigen Parametern, wobei die dauernde Kontrollmöglichkeit sowie die Rückholbarkeit gewährleistet bleiben muss. Eine Kavernenlösung wird auch in einer kürzlich erschienenen Arbeit von *Hammond* [16] vorgeschlagen. An die Versenkung in einem Bohrloch wird kaum mehr ernsthaft gedacht. Ob anderseits ein Zwischenlager zu einem nicht mehr kontrollpflichtigen Endlager werden kann, sei hier nicht weiter diskutiert. Dies ist sehr fragwürdig, nicht zuletzt im Blick auf die denkbare Nutzung von niedriggradigen Lagerstätten nach dem Jahr 2000. Um späteren Abbau mineralischer Rohstoffe

nicht zu verunmöglichen, ist der Felsuntergrund frei von jeglicher radioaktiven Verseuchung zu halten. Die weiteren Studien und abklärenden Arbeiten, wie Versuchsbohrungen in geeigneten Gesteinen und Messungen zur Ermittlung der verschiedenen Gesteinsparameter, müssen zielstrebig vorangetrieben werden.

C. Schlusswort

Die Geochemie ist nach wie vor ein Wissensgebiet, das auf verschiedene Art und Weise gepflegt werden kann. Es bietet dem Erdwissenschaftler weiterhin Entfaltungsmöglichkeiten der verschiedensten Art. Interdisziplinär betriebene Geochemie kann meiner Ansicht nach in Zukunft noch Wichtiges zu Problemen beitragen, deren Bewältigung letztlich für das Überleben der Menschheit notwendig sein wird: besonders im Blick auf unsere Umwelt, Ernährung, Rohstoff- und Energiepolitik. Aus den vorangehend skizzierten Beispielen dürfte hervorgehen, wie komplex die Zusammenhänge bei Umweltproblemen sind. Oft fehlen in den einzelnen zu berücksichtigenden Disziplinen wichtige Grundlagen. In der Geochemie sind es neben gesicherten Gehaltsangaben genaue Vorstellungen über die Verbreitung, die Mobilität und den Kreislauf einzelner Elemente.

Bezüglich Basic Research in USA [17] wird über Umweltforschung u.a. gesagt: «Some of the major subjects demanding examination are the following: – Increase in the abundance of heavy metals in food crops and natural food chains as a result of direct deposition from the atmosphere and mobilization in soils due to acid precipitation.»

Rückblickend kann ich feststellen, dass in den Erdwissenschaften im Verlaufe der letzten 20 Jahre grosse Fortschritte erzielt wurden. Ich denke nur an die Vielzahl neuer Methoden und geochemischer Daten. Diese müssen mehr und mehr in Geochemischen Datenbanken gespeichert und international ausgetauscht werden können.

Am Ende meiner Lehrtätigkeit bin ich dankbar, auf eine erlebnisreiche und schöne Zeit zurückblicken zu können. Es war mir vergönnt, in verschiedenen Gebieten in- und ausserhalb der Schweiz, im Felde, über und unter Tage, in Stollen und Bergwerken sowie im Labor arbeiten zu dürfen. Das Suchen nach neuen Erkenntnissen mit Studierenden und Kollegen brachte mir viel Befriedigung. Ich hoffe, es sei mir vergönnt, Begonnenes noch zu einem guten Ende zu bringen. Meinen Kollegen, Mitarbeitern und Studenten beiderlei Geschlechts danke ich herzlich für die gute Zusammenarbeit. Der jungen Generation wünsche ich mit einem kräftigen «Glückauf» viel Erfolg für die weiteren Studien, insbesondere auch für solche interdisziplinärer Art. Gestatten Sie mir, mich mit einem Zitat aus einem Bergmannslied, das aus der Novelle «Heinrich von Ofterdingen» von Novalis stammt, zu verabschieden:

Der ist der Herr der Erde,
Wer ihre Tiefen misst,
Und jeglicher Beschwerde
In ihrem Schooss vergisst.

Wer ihrer Felsenglieder
Geheimen Bau versteht,
Und unverdrossen nieder
Zu ihrer Werkstatt geht.

Literaturverzeichnis

- 1 C.F.Schönbein: Annalen der Physik und Chemie von J.C. Poggendorff 25 (1838) (der ganzen Folge 121.Bd.), Leipzig, 280.
- 2 U.Siegenthaler und H.Oeschger: Science 199 (1978), 388.
- 3 N.Yamagata und I.Shigematsu: Int. Symposium on Hydrogeochemistry and Biogeochemistry, Sept. 7-12, 1970, Tokyo (preprint).
- 4 H.J.Gluskoter und P.C.Lindahl: Science, 181 (1973), No. 4096, 264.
- 5 W.Jutzi: Int. Solid Wastes and Public Cleansing, Association Journal (ISWA), Heft Dez. 1978/Jan. 1979 (4 Seiten). Red. EAWAG Dübendorf.
- 6 R.Rivar: Beilage zu KEBAG-Kehrichtbeseitigungs-AG Emmenten-Zuchwil, 8.Generalversammlung 1979, 31.
- 7 OCDE: Le mercure et l'environnement. Paris 1974.
- 8 J.-P.Vernet und R.L.Thomas: Eclogae geol. Helv. 65 (1972), 293.
- 9 H.Nelson et al.: Science 198 (1977), No. 4319, 820.
- 10 S.F.Bakir and 10 co-authors: Science 181 (1973), No. 4096, 230.
- 11 R.Zuber, E.Boway und W.Tschannen: Schweiz. landwirtschaftliche Monatshefte 49 (1971), 249.
- 12 EDMZ: Bericht der Arbeitsgruppe für Fragen des Motorenbenzins zuhanden des Eidg. Departementes des Innern. Juli 1976.
- 13 J.Schärer: Diss. ETH (Zürich), 1975, 5471.
- 14 Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, CH-3097 Liebefeld-Bern: Dokumentation Informationstagung: Klärschlamm-Verwertung in der Landwirtschaft. 24.3.1977.
- 15 SNG: Die Lagerung radioaktiver Abfälle. Beiheft zum Bulletin 1978/3 der Schweiz. Natf. Ges., 39.
- 16 R.Ph.Hammond: American Scientist, 67 (1979) 146.
- 17 Ph.Handler: Science 204 (1979), No.4392, 474.