

Neben einer Art "schützenden Wirkung" der Dialkylammoniumionen auf die Zinkionen an den Tonmineraloberflächen wurde zusätzlich ein großes Adsorptionsvermögen für organische Komponenten geschaffen.

Literatur

- Hasenpatt, R., 1988: Bodenmechanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemischer Verbindungen (Batch- und Diffusionsversuche). Dissertation, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich.
- Kruse, K., 1992: Adsorption von Schwermetallen an verschiedenen Tonen. Dissertation ETH Zürich Nr. 9737.
- Müller-Vonmoos, M., Kahr, G., Rub, A., 1977: DTA-TG-MS in the investigation of clays quantitative determination of H₂O, CO and CO₂ by evolved gas analysis with a mass spectrometer. *Acta Thermochemica*, **20**, 387-393.
- Müller-Vonmoos, M., Kahr, G., 1983: Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. *Nagra NTB* 83-12.
- Müller-Vonmoos, M., Kahr, G., 1985: Langzeitstabilität von Bentoniten unter Endlagerbedingungen. *Nagra NTB* 85-25.
- Stockmeyer, M.R., 1991: Adsorption of organic compounds on organophilic bentonites. *Appl. Clay Sci.*, **6**, 39-57.
- Stockmeyer, M.R., Kruse, K., 1991: Adsorption of Zn and Ni ions and phenol and Diethylketones by bentonites of different organophilicities. *Clay Minerals*, **26**, 431-434.

Heilungs- und Zerstörungsprozesse in Deponiebarrieren

R. Nüesch

Institut für Geotechnik, Tonmineralogisches Labor, ETH-Zentrum, Sonneggstr. 5,
CH-8092 Zürich

1. Einleitung

Jede Deponiebarriere weist Anisotropien auf, welche potentielle Transportwege sind für aus der Deponie austretende Sickerwässer. Werden Anisotropien, z.B. Brüche, in ein Barrierensystem einbezogen, so stellt sich die Frage nach der Auswirkung auf das Umfeld einer Deponie. Austretende Sickerwässer sind dann auch zur Zeit das größte Problem der Deponietechnik (CHRISTENSEN et al., 1992). Kenntnisse über die Entwicklung von bisherigen und die mögliche Entstehung von neuen Fließwegen erlauben Aussagen, ob ein Austreten kontaminierter Wässer aus der Deponie in Zukunft zu- oder abnehmen wird und sind daher wichtig für das Langzeitverhalten und die Qualität von Deponiebarrieren. Die Entwicklung von Fließwegen hängt von der Art des Sickerwassers, des Barrierenmaterials und den dazwischen stattfindenden Interaktionen ab.

Den selbstheilenden Rissen (z.B. Trockenrisse) stehen Risse gegenüber ohne Selbstheilung. Für solche Risse und für jene, bei der die Selbstheilung sehr langsam ist, sind Fremdheilungen durch Mineralausfällung und Verstopfen (Kolmation) erhoffte Prozesse. Lösungsprozesse durch Sickerwässer, welche sich auf die Barriere nachteilig auswirken, sind jedoch auch denkbar.

In einer mineralischen Basisabdichtung wurde Illitisierung der Smectite, sowie partielle Auflösung des karbonatischen Bindemittels nach 8-jährigem Betrieb festgestellt (ECHLE et al., 1988). Andererseits wurden in Tongesteinen der geologischen Basisbarrieren von 3 Deponien bis auf eine Ausnahme keine chemischen und physikalischen Änderungen festgestellt (PETERS, 1993). Die Ausnahme beschränkte sich auf die obersten 5 cm einer 25 Jahre alten Probe, in der die Tonminerale zerstört wurden.

2. Als Transportweg wirksame Anisotropien

Als Anisotropien werden in natürlichen Deponiestandorten die Sedimentstrukturen der Ablagerung wie beispielsweise siltige Schichten und fossile Spuren wie Grab- oder Wurzelgänge verstanden. Weiters gehören dazu Strukturen der Diagenese und Tektonik, welche vorwiegend

planare Anisotropien umfassen wie Extensions-, Scherbrüche, Scherzonen und Schieferungsflächen. Schließlich entstehen durch Verwitterung, Erosion, Entlastung und Einwirkung der Biosphäre Anisotropien und somit potentielle Schwachstellen einer geologischen Barriere.

Es gibt daher keinen natürlichen Deponiestandort ohne Anisotropien und technische Barrieren sind somit notwendig. Die Art und Bedeutung von Anisotropien für potentielle Fließwege in technischen Barrieren hängt wesentlich von der Einbauqualität ab. Die Aggregatgröße des Barrierenmaterials, deren Wassergehalt und die aufgebrachte Verdichtungsenergie bestimmen unter anderem die Barrierenqualität (z.B. MITCHELL, 1976). Die Größe der Makroporen ist abhängig von der Aggregatgröße des Materials (z.B. DANIEL, 1984). Bei zu geringer Verdichtungsenergie ist die Verzahnung der eingebrachten Lagen ungenügend und die Flächen zwischen den Lagen werden schon bei geringer Neigung zu Fließwegen. Weitere einbaubedingte Anisotropien, welche zu bevorzugten Wegsamkeiten führen, sind Trennfugen und die Übergangsbereiche der Basisbarriere zu Böschungen und Schächten. Die Zusammensetzung der Dichtmasse ist entscheidend für Durchlässigkeit und Festigkeit. Dichtmassen mit schon leicht plastischen Tonen wird die Fähigkeit der Selbstheilung von Rissen infolge mechanischer Beanspruchung und Austrocknung zugesprochen (SAVIDIS & MALLWITZ, 1993).

3. Entstehung von Transportwegen

Transportwege in Deponiebarrieren sind vor allem Bruchflächen und kommunizierende Makroporen. Brüche entstehen durch Versagen des Materials infolge aufgebrachter Scher- oder Zugspannung, welche die Materialfestigkeit erreichte (z.B. EISBACHER, 1991).

Selbstheilende Brüche

Extensionsbrüche mit rauen Bruchflächen werden als Risse und solche mit glatten Flächen als Klüfte bezeichnet. Extensionsbrüche in Tonen entstehen durch Schrumpfen infolge Wasserverlust (Trockenrisse) oder als Folge von Flokkulierung der Tonminerale (chemisch induzierte Risse) und schließen sich bei Wasserzugabe resp. bei Wiederherstellung des dispersen Tongefüges.

Trockenrisse zeigen eine statistische Verteilung und die Winkel zwischen den Rissen betragen ca. 90°. Es entstehen wenig lange und viel kurze Risse. Das Material weist an den Rißflächen durch Schrumpfen oft eine Gefügeänderung in Form einer Saumbildung auf. Dadurch unterscheidet sich das Gefüge in den wiedergequollenen Rissen vom intakten Nebengestein.

Chemisch induzierte Risse zeigen ähnliche Merkmale wie Trockenrisse, z.B. die statistische Verteilung der Risse und die ca. 90° Winkel zwischen den Rissen. Die Risse entstehen durch Einwirkung von Chemikalien und bewirken eine Aggregation der Tonminerale infolge Abnah-

me der diffusen Doppelschicht (z.B. MADSEN, 1989). Die Rißlänge ist abhängig von der Ionenkonzentration, der Wertigkeit der Ionen und der Dielektrizitätskonstante der einwirkenden Lösung. Änderung dieser Parameter in umgekehrter Richtung bewirkt Rißschließung.

Nichtselbstheilende Brüche

Scherbrüche bewirken durch Kornzerkleinerung und Porositätsänderungen eine nicht reversible Deformation des Materials und haben daher keine Selbstheilungstendenz (NÜESCH, 1991). Die Scherbrüche bilden eine Deformationszone, welche eine charakteristische Geometrie der Scherflächen aufweist. Flache (<20°) und steilstehende (60°) Scherflächen in Bezug zur Deformationszone bilden charakteristische rhombische Klasten. Weitere Merkmale sind Gleit Spiegel und Striemung auf den Scherflächen. Bei geringer Überlast sind solche Deformationszonen lokal und mikroskopisch dünn.

Bildung von Makroporen

Makroporen entstehen u.a. durch mangelnde Verdichtung, die Auflast überschreitende Quelldrücke und durch Lösung von Barrierenmaterial infolge Einwirkung der Deponiesickerwässer. Das Sickerwasser kann Lösung von Barrierenmaterial bewirken, die Durchlässigkeit bisheriger Transportwege nimmt zu und es entstehen neue Fließwege. Natürliche Analoga sind Karst- und Lösungserscheinungen von z.B. Karbonaten und Evaporiten, aber auch die Remobilisation von Erzlagerstätten. Erkenntnisse über den Einfluß von Sickerwässern auf das Bindemittel von siltigen Lagen oder Sandsteinen bei natürlichen Barrieren oder auf den Zement bei technischen ist von wesentlicher Bedeutung hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Transportwegen. An Ton-Zement-Dichtmassen, welche mit Sickerwasser durchströmt wurden, wurde eine Porenverkleinerung und eine Abnahme der Durchlässigkeit festgestellt (HERMANN & BUCHER, 1990).

Lösungsprozesse

Alle Minerale lösen sich in der Reihenfolge zunehmender Beständigkeit auf. Komplexe Kristallgitter werden vergleichsweise langsamer gelöst als einfache Salze. Analog zur Ausfällung ist auch die Lösung entweder durch den Transport oder durch Oberflächenreaktionen bestimmt. Zur Bestimmung der Art der Lösung werden die gemessenen Lösungsraten und die molekulare Diffusion verglichen. Falls die Diffusion größere Werte als die gemessenen Lösungsraten ergibt, handelt es sich um oberflächenkontrollierte Lösung. Diese wird mit Hilfe des Elektronenmikroskops verifiziert, denn kristallographisch kontrollierte Ätzfiguren weisen auf oberflächenkontrollierte Lösung hin, während gerundete Kristalle auf transportkontrollierte hinweisen. BERNER (1978) zeigte, daß die Lösung in Wasser der häufig auftretenden Minerale Calcit, Feldspat und Quarz durch Oberflächenreaktionen kontrolliert ist.

In den meisten Fällen finden Lösung und Ausfällung gleichzeitig statt (Fig. 1). Sind beide Prozesse transportkontrolliert, so entstehen scharfe Übergänge zwischen angelöstem Partikel und ausgefallener Substanz. Umgekehrt entstehen bei oberflächenkontrollierten Prozessen diffuse Zonen.

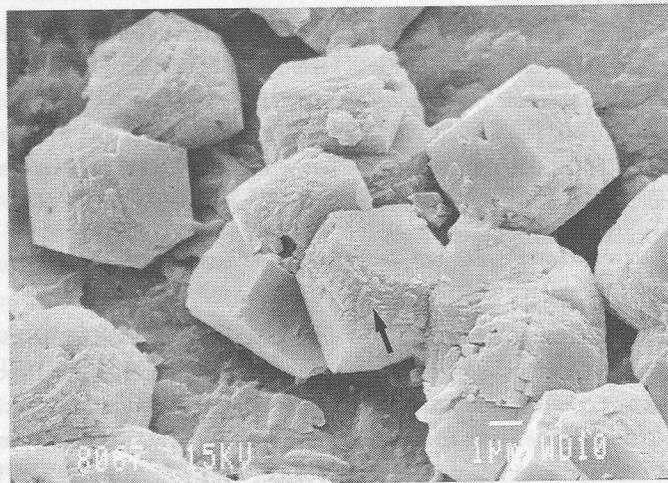


Fig.1: Die REM-Aufnahme von Sandstein in Kontakt mit Sickerwasser zeigt Mangankarbonat-Neubildungen in Makroporen. Ätzfiguren (Pfeil) weisen auf gleichzeitig stattfindende Lösung hin.

Temperaturbedingte Prozesse

Temperaturbedingte Prozesse sind Schrumpfen der Tone und Umwandlung der Smectite in Illite. Sie bewirken Versprödung, Ribbildung und Verlust der Adsorptions- und Quellsfähigkeit. In Deponien wurden infolge Hydrolysereaktionen und mikrobiellen Abbaus Temperaturen bis 90°C gemessen (LICHTENSTEIGER, 1992). Die Illitisierung der Smectite beginnt im Bereich von 80-100°C (EBERL, 1992). Experimentelle Untersuchungen (HAAS, in prep.) ergaben Hinweise auf geringere Wasseraufnahme und geringere Quellsfähigkeit der Tone nach Durchströmen mit Dampf.

Simulation von Lösungs- und Ausfällungsprozessen

Ausfällung oder Lösung von Stoffen werden in Durchströmungsversuchen und Schüttelversuchen (Batchversuche) ermittelt. Mit den Schüttelversuchen von Gesteinsstücken (ca. 4x2x1cm) im Sickerwasser werden Klufflächen simuliert, welche in Kontakt mit Sickerwasser

stehen bis zur Erreichung eines Gleichgewichtes bezüglich Leitfähigkeit und pH. Die Konzentrationen ausgewählter Elemente in Lösung werden vor und nach dem Versuch gemessen. Da Ausfällung und Lösung stark von der Art und Konzentration des Sickerwassers abhängig sind, werden die in der Deponie anfallenden Sickerwässer verwendet. Synthetische Sickerwässer sind bei prozessorientierten Experimenten zu bevorzugen, weil ihre Zusammensetzung kontrollierbar und reproduzierbar ist. Mit Sickerwässern lassen sich Lösungsprozesse nicht getrennt von Ausfällungen untersuchen. Bei Tonen, organischen Stoffen und z.T. Eisenhydroxiden wirken zusätzlich Adsorption resp. Desorption.

Einfluß des Lösungsmittels und der Gasphase

Entsalztes Wasser wird oft als stärkstes Lösungsmittel betrachtet. Entsalztes Wasser wird daher häufig als Kontrollmöglichkeit für maximale Lösung eingesetzt. Aus Laborexperimenten geht hervor, daß Sickerwässer z.T. erheblich aggressiver sind als entsalztes Wasser (HAAS & NÜESCH in prep.). Von den verwendeten Sickerwässern (Tab.1) ist synthetisches Sickerwasser für Sandsteine am aggressivsten. Für Mergel hingegen ist das Deponiesickerwasser SW6 mit der höchsten Ionenfracht bezüglich Ca-Löslichkeit aggressiver. Entsalztes Wasser ergibt daher nicht immer die maximale Lösung.

Die Gas-Atmosphäre beeinflusst maßgebend Ausfällung und Lösung. Stickstoff als Gasphase bewirkt unter gewissen Bedingungen Ausfällung, unter anderen Lösung. Aus Na-Bentonit ist in synthetischem Sickerwasser unter CO₂-Atmosphäre zehnmal mehr Na in Lösung gegangen als unter Stickstoffatmosphäre.

Tab. 1: Für Schüttelversuche verwendete Sickerwässer.

Werte	SW 1	SW 51	SW 6	synth. SW
pH	6.8 - 6.9	7.2 - 7.4	6.8 - 7.2	7
mS/cm	0.9 - 1.2	10 - 16	20 - 29	25 (bei 24°C)
T°C	12 - 10	18 - 10	17 - 14	22 - 26
Ionen mg/l				
Ca	160	300	300	350
Mg	30	50	60	0
K	5	1200	2000	2000
Na	30	2300	4000	3500
Mn	0.7	150	400	355

Tonzerstörung

Tonminerale sind im allgemeinen gegenüber Auflösung inert. Allein die normalerweise detritische Entstehung der Tonminerale als Endprodukt eines Verwitterungsprozesses weist auf ihre natürlich hohe Resistenz gegen Auflösung hin. Es ist daher nicht erstaunlich, daß bisherige Arbeiten eine hohe Beständigkeit der Tonminerale gegenüber Prüfflüssigkeiten wie z.B Säuren

und Basen (OTTNER et al., 1991), organische Flüssigkeiten (z.B. QUIGLEY, 1992) oder hochkonzentrierte Schwermetallösungen (z.B. WAGNER, 1992) ergaben. Quellfähige Tonminerale sind aufgrund ihrer Temperaturempfindlichkeit und ihres Ionenaustauschverhaltens instabiler als nicht quellfähige. Innerhalb der quellenden Tonminerale scheint es aber Unterschiede zu geben. Corrensit z.B. erweist sich gegenüber Sickerwässern als erstaunlich stabil (SCHELLHORN, 1993). An Na-Bentonit wurden im Experiment mit synthetischem Sickerwasser Lösungserscheinungen (7 Gew.% innert 22 Tagen) festgestellt (HAAS & NÜESCH in prep).

Karbonatlösung

Die Langzeitwirkung karbonathaltiger Tone, z.B. Mergel, ist gegenüber Sickerwässern durch deren Karbonatgehalt gefährdet, da Karbonate leicht in Lösung gehen. Die Karbonatlöslichkeit nimmt mit dem Salzgehalt der Sickerwässer zu und steigt mit zunehmendem CO_2 -Partialdruck und sinkender Temperatur (ELLIS, 1963).

Hohe NaCl-Gehalte in der Lösung bewirken bei hohen Temperaturen eine stärkere Calcitlösung als eine massive Erhöhung des CO_2 -Partialdruckes. Mit zunehmendem NaCl-Gehalt im Sickerwasser nimmt die Ca-Lösung aus dem Gestein zu (Fig. 2). D.h. stark salzhaltige Sickerwässer sind bezüglich Karbonatlösung bedeutend aggressiver als salzarme.

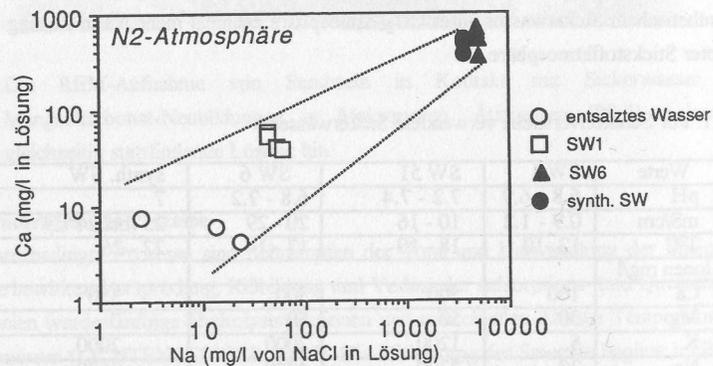


Fig. 2: Ca-Löslichkeit in Funktion des Salzgehaltes der Lösung. Salzreiche Sickerwässer sind Ca-aggressiver.

Eine Abnahme des CO_2 -Partialdruckes bewirkt eine Erhöhung des pH in Lösung. Aus einer Calcit-gesättigten Lösung wird dadurch Calcit (CaCO_3) ausgefällt (Fig. 3). Calcit-Ausfällung wird auch durch eine Zunahme der Temperatur bewirkt.

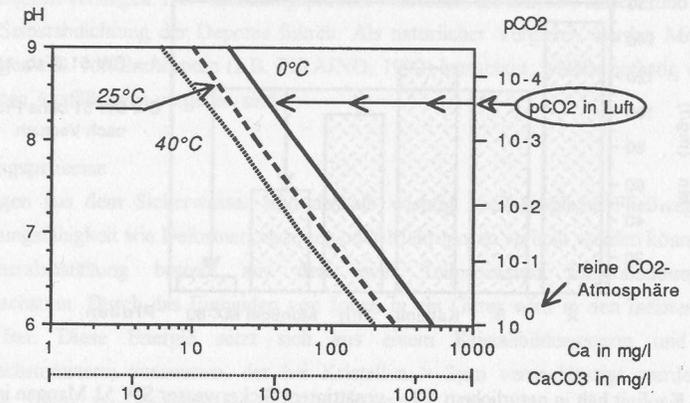


Fig. 3: Ca- bzw. Calcit-Löslichkeit in mg/l in Funktion von pH und pCO_2 des entsalzten Wassers (mod. nach ENGELHARDT, 1973).

Lösungsaktiver Kaolinit

Unter experimentellen Bedingungen hält Kaolinit alle gemessenen Elemente in Lösung (d.h. es erfolgt keine Adsorption) und bewirkt damit genau das Gegenteil, das man sich von Tonmineralien durch Adsorption erhofft (HAAS & NÜESCH, in Prep.). Die vergleichsweise zu quellfähigen Tonen kleine Gesamtoberfläche von Kaolinit ($<30\text{m}^2/\text{g}$) erklärt wohl die fehlende Adsorption der gemessenen Elemente. Da aber im Blindversuch ohne Probe spontan Elemente ausfallen, wird dem Kaolinit eine Eigenschaft zugeschrieben, welche aktiv Elemente in Lösung behält. Kaolinit hält in natürlichem, CO_2 -gesättigtem Sickerwasser SW 51 z.B. Mangan in Lösung (Fig. 4). Für die Deponietechnik wären aber Stoffe interessant, welche die Ausfällung aktiv fördern.

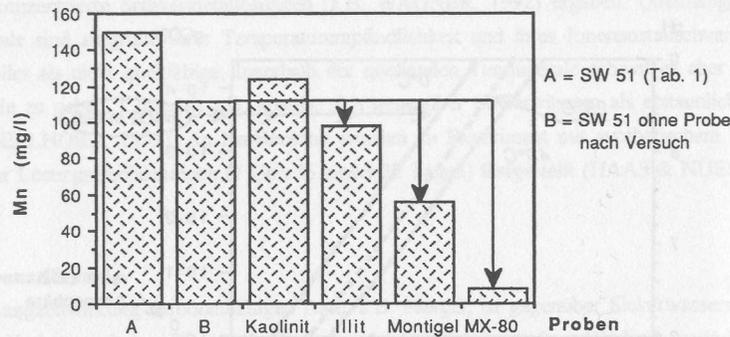


Fig. 4: Kaolinit hält in natürlichem, CO₂-gesättigtem Sickerwasser SW 51 Mangan in Lösung.

Adsorption

Tone, insbesondere organophile Tone resp. deren organische Kationen, können durch Adsorption organische Verbindungen und Schwermetalle aus dem Sickerwasser entziehen (STOCKMEYER & KRUSE, 1991). Dabei wurden bei organophilen Tonen synergetische Effekte zwischen Schwermetallen und organischen Substanzen beobachtet.

Die Adsorption von Schwermetallen an Tonminerale bewirkt einen stärkeren Zusammenhalt der Silikatschichten mit einer Verringerung des Quellvermögens (WAGNER, 1988). Das eingeschränkte Quellvermögen ist beispielsweise bei Blei und Zink irreversibel und es wurden leichte Tonmineralveränderungen festgestellt. Gelöste Schwermetalle führen auch zu einer erhöhten Elektrolytkonzentration in der Porenlösung und die Entstehung von Synäresissen ist denkbar.

Durch die Adsorption sind die umweltbelastenden Stoffe prinzipiell nicht zerstört und es besteht die Gefahr, daß sie durch erneuten Ionenaustausch wieder in Lösung gehen.

4. Schließung von Transportwegen

Der Ausbreitung von Schadstoffen entgegenwirkende Prozesse werden als Heilungsprozesse bezeichnet. Es gibt die Fähigkeit der Selbstheilung von z.B. Trockenrissen und chemisch induzierten Rissen durch die reversiblen Prozesse der Bruchentstehung.

Die Interaktion von Sickerwasser mit dem Barrierenmaterial kann Ausfällungen aus dem Sickerwasser bewirken. Solche Neubildungen sind Mineralausfällungen z.B. von Schwermetalloxichloriden und -karbonaten (WAGNER, 1988). Diese können Makroporen

durch Zuwachsen verkleinern resp. Mikroporen verstopfen, und bisherige Transportwege würden langsam versiegen. Der Ausfällungsprozess verbessert die Barriere laufend und es kann zu einer Selbstabdichtung der Deponie führen. Als natürlicher Vergleich werden Mineralanreicherungen z.B. von Erzkörpern (z.B. PIRAJNO, 1992) betrachtet, welche hartartig von verschiedensten Ausfällungen umgeben sind.

Ausfällungsprozesse

Ausfällungen aus dem Sickerwasser sind deshalb wichtig, weil mögliche Fließwege ohne Selbstheilungsfähigkeit wie Deformationszonen oder Makroporen verheilt werden könnten. Die Mineralausfällung besteht aus den zwei Teilprozessen Mineralbildung und Mineralwachstum. Durch das Einbinden von Ionen in ein Gitter wird in den meisten Fällen Energie frei. Diese Energie setzt sich aus einem Kristallbildungsterm und einem Kristallwachstumsterm zusammen, der bei Kristallen > 2µm vernachlässigt werden kann (BERNER, 1980). Der Kristallbildungsterm beschreibt die Bildung von submikroskopischen Mineralkernen im nm-Bereich, welche die Wiederauflösung überstanden haben und spontan wachsen können. In Sedimenten ist die Keimbildung durch generelles Vorhandensein von Keimen meistens heterogen. Die Rate der Keimbildung ist stark von der Konzentration der Lösung abhängig und beeinflusst zusammen mit dem Kristallwachstum die Kristallgröße der Ausfällung. Bei einer hohen Übersättigung in der Lösung (z.B. Sickerwasser) ist die Keimbildung rasch, aber die Keime haben zu wenig Zeit, um zu wachsen und es resultieren kleinste Kristalle, welche in Poren Überzüge bilden. Bei geringeren Konzentrationen der gelösten Stoffe ist die Keimbildung vergleichsweise langsam und es bilden sich wenige, dafür große Kristalle, welche in die Poren hineinwachsen. Das Kristallwachstum wird bestimmt vom Nachschub der Ionen, von Oberflächenreaktionen wie Adsorption, Ionenaustausch, Dehydratation etc. und vom Wegführen von Reaktionsprodukten, welche bei der Kristallisation übrigbleiben. Der Ionentransport erfolgt advektiv oder diffusiv und ist in Schüttelexperimenten (Batchversuche) erhöht gegenüber stehenden Lösungen. Bei Kristallwachstum, welches nur durch Oberflächenreaktionen kontrolliert wird, ist die Bindung der Ionen an die Oberfläche so langsam, daß die Transportart unwichtig ist. Die molekulare Diffusion stellt einen Grenzwert dar, bei welchem der Fluß des Porenwassers stagniert. Langsamere Wachstumsraten werden durch Oberflächenreaktionen bestimmt, schnellere durch Durchströmung mit Porenwasser. Das Wachstum von beispielsweise Bleisulfat ist sowohl transport- als auch oberflächenkontrolliert (BERNER, 1980)

5. Schlußfolgerungen

Heilungs- und Zerstörungsprozesse durch Sickerwässer in Deponiebarrieren können gleichzeitig erfolgen. Dies ist z.B. sichtbar an Neubildungen von Mangankarbonat aus Sickerwasser mit Ätzfiguren, welche auf Lösungserscheinungen hinweisen. Gesamthaft gesehen überwogen in Schüttelversuchen an Sandsteinen, Mergeln und Tonen die Lösungsprozesse infolge Interaktion mit Sickerwässern. Bei Durchströmungsversuchen hingegen überwogen Ausfällungen. Daher ist bei bestehenden Transportwegen (z.B. Rissen) nicht mit einem langsamen Versiegen bis zur Selbstabdichtung durch Ausfällungen von austretenden Sickerwässern zu rechnen. Hingegen könnte eine intakte Barriere infolge Durchströmung mit Sickerwässern durch Ausfällungen undurchlässiger werden.

Sickerwässer mit hoher Ionenfracht sind bezüglich Karbonat in den Sandsteinen und Mergeln aggressiver als solche geringer Ionenfracht. Dieses Phänomen wird auf den bedeutend höheren NaCl-Gehalt der Sickerwässer mit hoher Ionenfracht zurückgeführt, welcher auf den Aggressivitätsgrad des Sickerwassers einen stärkeren Einfluß ausübt als die vorhandene Gasatmosphäre. Änderungen in der Zusammensetzung des Sickerwassers, wie z.B. Zunahme der Salzkonzentration oder Erhöhung des CO₂-Partialdruckes, verstärken Lösungsvorgänge und erlauben daher keine langfristigen Aussagen. Der Versuch bei der Anlage neuer Deponien, lösliche Salze aus dem Deponiegut vor dessen Ablagerung zu entfernen, scheint daher vernünftig, wenn man die Aggressivität der später austretenden Sickerwässer reduzieren will.

Entsalztes Wasser stellt bei Experimenten im Labor bezüglich der gemessenen Elemente nicht das Aggressivitätsmaximum der möglichen Lösungen dar. Sickerwässer mit hoher Ionenfracht lösen mengenmässig aus denselben Gesteinen mehr heraus. Daher kann entsalztes Wasser nicht als Kontrollmöglichkeit für Lösung eingesetzt werden.

6. Literaturverzeichnis

- Berner, R.A., 1978: Rate control of mineral dissolution under earth surface conditions, *Am. J. Sci.*, **288**, 1235-1252.
- Berner, R.A., 1980: Early Diagenesis. A Theoretical Approach. Princeton Series in Geochemistry. (edited by H.D. Holland). Princeton University Press, 1-241.
- Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R., 1992, (editors): Landfilling of waste: Leachate. Elsevier Applied Science, 520 pp.
- Daniel, D.E. 1984: Predicting Hydraulic Conductivity of two prototype clay liners. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, **110** (2), 285-300.
- Eberl, D.D., 1992: Three zones for illite formation during burial diagenesis and metamorphism. *American Society of Agronomy, 84th Annual Meeting, Minneapolis November 1-6, 368.*
- Echle, W., Cevrim, M., Düllmann, H., 1988: Tonmineralogische, chemische und bodenphysikalische Veränderungen in einer Ton-Versuchsfläche an der Basis der Deponie Geldern-Pont. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, **4**, 99-121.
- Eisbacher, H.G. 1991: Einführung in die Tektonik. Enke Verlag, 1-305.
- Ellis, A.J., 1963: The solubility of calcite in sodium chloride solutions at high temperatures. *Am. J. Sci.*, **261**, 259-267.
- Engelhardt, W., 1973: Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen. *Sediment-Petrologie, Teil III*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1-378.
- Füchtbauer, H., 1988: Sediment und Sedimentgesteine. *Sediment-Petrologie, Teil II*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1-1141.
- Hermanns, R., Bucher, F., 1990: Sicherung von Altlasten durch vertikale künstliche Barrieren. *Z. dt. geol. Ges.*, **141**, 348-353.
- Lichtensteiger, Th., 1992: Langzeitverhalten von Schlacken in Deponien. VDI-Bildungswerk Verein Deutscher Ingenieure. Seminar 43-76 Schlackeaufbereitung, -verwertung und -entsorgung. 16. und 17. März 1992, München.
- Madsen, F.T., Mitchell, J.K., 1989: Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination. *Mitt. des Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich*, **135**, 1-67.
- Mitchell, J.K., 1976: Fundamentals of soil behavior. John Wiley and Sons, New York, 1-422
- Nüesch, R., 1991: Cataclastic flow of clay - A risk on the safety of waste deposits? *Proceedings of 7th International Congress of Rock Mechanics*, 35-39.
- Ottner, F., Schwaighofer, B., Müller, H.W., 1991: Dichtungs- und Adsorptionseigenschaften toniger Sedimente der niederösterreichischen Molassezone und des Wienerbeckens. *Mitt. Inst. Bodenforschung und Baugeologie Univ. Wien*, **1**, 79-106.
- Peters, T., 1993: Chemical and physical changes in the subsoil of three waste landfills. *Waste Management & Research*, **11**, 17-25.
- Pirajno, F., 1992: Hydrothermal mineral deposits. Principles and fundamental concepts for the exploration geologist. Springer Verlag, 1-709.
- Quigley, R.M., 1992: Organic liquid interactions with water-wet barrier clays. In subsurface contamination by immiscible fluids, Weyer (ed.), Balkema, Rotterdam, 49-56.
- Savidis, S., Mallwitz, K., 1993: Selbstheilungsvermögen mineralischer Dichtmassen hinsichtlich Durchlässigkeit in gestörten Dichtschichten / Dichtungssystemen an Deponien. In BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme, BAM, 95-108.

- Schellhorn, M., 1993: Experimentelle Untersuchungen der mineralogischen Veränderungen von Tonmineralien nach Kontakt mit Deponiesickerwässern in Hinblick auf das Langzeitverhalten von Deponiebasisabdichtungen, Dissertation TU Clausthal, 1-111.
- Stockmeyer, M.R., Kruse, K., 1991: Adsorption of zinc and nickel ions and phenol and diethylketone by bentonites of different organophilicities. *Clay Minerals*, **26**, 431-434.
- Wagner, J.-F., 1988: Mineralveränderungen bei der Migration von Schwermetalllösungen durch Tongesteine. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, **4**, 47-62.
- Wagner, J.-F., 1992: Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponieabdichtungen - Ein Vergleich von Labor und Geländestudien. *Habilitationsschrift*, TH Karlsruhe.

Charakterisierung von Allophan und Imogolit in Tonen

T. Höding *) und M. Störr **)

- *) Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Stahnsdorfer Damm 77,
D-14532 Kleinmachnow
- **) D-17406 Ostklüne / Usedom

1. Einleitung

Imogolite, wie auch Allophane und verwandte nichtkristalline und parakristalline Aluminosilikate, sind häufige Bestandteile von Böden, die ihren Ursprung in vulkanischen Aschen haben. Ihr Vorhandensein kann sich merklich auf die Verwendbarkeit dieser Böden bzw. der Tonrohstoffe auswirken, die in solchen Gebieten gewonnen werden. Sie bewirken bei landwirtschaftlicher Bodennutzung eine Ertragsminderung, bei der Nutzung für die Baumaterialgewinnung üben sie einen meist negativen Einfluß auf die technologischen Parameter z.B. der Ziegel aus (SUDO & SHIMODA, 1978). Deshalb sollte vor einer wirtschaftlichen Verwendung eine Aussage über den Gehalt an derartigen Komponenten getroffen werden.

Der Nachweis besonders von Imogolit ist auch bedeutsam zur Aufklärung von Genese und Verwitterungsprozessen der jeweiligen Sedimente.

Der analytische Nachweis von Imogolit gestaltet sich jedoch sehr schwierig, schon beginnend bei der Gewinnung der Tonfraktion $< 2 \mu\text{m}$ mit der Zerstörung der organischen Bestandteile und der Trennung kristalliner und amorpher anorganischer Komponenten. Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie erbringen meist keine eindeutigen Ergebnisse. Zwar zeigen die Diffraktogramme imogolitreicher Proben zwei breite diffuse Maxima bei ca. 17-18 Å und 8 Å (VIOLANTE & WILSON, 1983), doch treten diese Merkmale bei Vorhandensein größerer Anteile von kristallinen Bestandteilen und damit nur geringen Imogolitanteilen nicht mehr deutlich hervor. Eindeutig sind Imogolite aufgrund ihrer charakteristischen Morphologie elektronenmikroskopisch nachweisbar (WADA, 1987).

Eine weitere Nachweismöglichkeit ist durch die Anwendung der Infrarotspektroskopie gegeben. Diese Methode macht über den qualitativen Nachweis hinaus auch semiquantitative Aussagen sowie Einschätzungen des Si-Al-Ordnungszustandes der amorphen bzw. parakristallinen Bestandteile einer Probe möglich (HÖDING, 1991).

Im folgenden werden IR-Untersuchungen ausgewählter Allophan- und Imogolitproben beschrieben.