

Synergie-Effekte bei der Adsorption anorganischer und organischer Schadstoffe an verschiedenen Tonmineralen in mineralischen Deponieabdichtungen

K. Onnich

Lehrstuhl für Geotechnik, Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, D-44780 Bochum

Kurzzusammenfassung

Durchströmen Deponiesickerwässer nach dem Ausfall vorhergeschalteter Barriereelemente die tonhaltige mineralische Abdichtungsschicht einer Deponie, so kommt es zu Wechselwirkungen der komplexen Inhaltsstoffe dieser Sickerwässer mit den sorptionsfähigen Bestandteilen der Dichtungsschichten, in der Regel Tonmineralien. In Laborexperimenten wurden Dichtungstone unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung mit Monolösungen und Gemischen anorganischer und organischer Prüfflüssigkeiten beaufschlagt. Dabei wurden einige bemerkenswerte Änderungen im Sorptionsverhalten der Dichtungstone festgestellt, die als Synergie-Effekte beschrieben werden. Es werden zum Teil beträchtliche Steigerungen des Rückhaltevermögens gegenüber mehreren Schadstoffen vorgestellt, die aus den spezifischen Materialeigenschaften der vorherrschenden Tonmineralien resultieren.

1. Die Bedeutung der "Sorption" in der Geotechnik

In naturwissenschaftlichen Ansätzen [VOIGT, 1990, WIENBERG, 1990] wird unter Sorption (i.B. Adsorption) die Anlagerung eines gelösten Stoffes (Adsorbat) an der Grenzfläche einer Lösung zu einem Feststoff (Adsorbent) verstanden. Grundsätzlich werden zwei Arten von Sorptionsmechanismen unterschieden, die sich hauptsächlich in ihrer Bindungsenergie und Bindungsart unterscheiden: die Chemisorption und die Physisorption. Zu den chemisch/physikalischen Faktoren, die die einzelnen Sorptionsprozesse steuern, zählen u.a.:

- Ionenpotential
- Ionenradius
- Elektronegativität
- pH-Wert
- Wasserlöslichkeit
- Molekülgröße
- Polarität und Polarisierbarkeit

Im Reaktionssystem Boden kommen folgende speziellen Einflußgrößen hinzu:

- Teilchengröße der Feststoffpartikel
- wirksame innere und äußere Oberfläche der Feststoffpartikel
- Art und Anzahl der Tonminerale und Begleitminerale
- Gehalt an organischen Bestandteilen (i.B. Huminstoffe)
- Porosität und Porengehalt im Boden

Für den im Deponiebau tätigen Geotechniker steht die Fragestellung nach den Gesetzen dieser komplexen mineralogisch-chemischen Wechselwirkungen von Tonmineralen und Sickerwasser im Hintergrund, vielmehr verlangt der Praktiker verlässliche Aussagen über die zu erwartende Größenordnung des Schadstoffrückhaltepotentials. Nicht zuletzt wegen fehlender geeigneter Bestimmungsmethoden verliert das Sorptionsvermögen von mineralischen Abdichtungen gegenüber ihrer abdichtenden Wirkung in der gegenwärtigen Diskussion an Bedeutung. Auch mit der hier vorgestellten Versuchsmethodik ist es nicht möglich, die einzelnen Sorptionsprozesse zu identifizieren und ihren jeweiligen Anteil an der gesamten Schadstoffrückhaltung zu bestimmen; vielmehr wird die gesamte sorbierte Schadstoffmenge als eine Einheit betrachtet. Daher wird "Sorption" in diesem Ansatz als Sammelbegriff für alle den Schadstofftransport behindernden Vorgänge im Abdichtungsmaterial verwendet. Dies sind insbesondere:

- Lösungsvorgänge
- Fällungserscheinungen
- Adsorption an Tonoberflächen und Begleitmineralen
- Ionenaustauschvorgänge
- Neubildung von Mineralphasen
- Chelat- und Komplexbildung

Obwohl von verschiedenen Arbeitsgruppen z.T. schon seit Jahrzehnten die Sorptionsmechanismen einzelner Schadstoffe an Tonen eingehend untersucht wurden, fehlen bislang systematische Untersuchungen von Gemischen verschiedener Schadstoffe mit ihren möglichen komplexen Wechselwirkungen und den daraus resultierenden Auswirkungen auf das Schadstoffrückhaltevermögen. Erst seit den Untersuchungen von STOCKMEYER & KRUSE [1991] treten Synergie-Effekte ins Blickfeld genauerer Untersuchungen.

2. Untersuchte Abdichtungstone

Im Zuge eines vom BMFT geförderten Forschungsprojektes wurden Langzeit-Diffusionsversuche unter stationären Randbedingungen mit charakteristischen anorganischen und organischen Prüfflüssigkeiten an einer Reihe mineralogisch unterschiedlich zusammengesetzter Dichtungstone durchgeführt. Die Versuchsauswertung belegte spezifische Synergie-Effekte an den unterschiedlichen Tonen, unabhängig vom jeweils vorherrschenden Tonmineral. Exemplarisch sollen im Folgenden zwei Materialien näher beschrieben werden.

Material 1 ist eine gemischtkörnige Trockendichtung auf Basis eines Bentonit-Sand-Gemisches, das aus qualitätskontrollierten, definierten mineralischen Grundstoffen homogen zusammengesetzt ist. Die Bentonitkomponente dieses kurz als Mineralgemisch bezeichneten Materials besteht aus Montigel F, einem großtechnisch zu Na-Bentonit aktivierten Ca-Bentonit aus niederbayerischen Vorkommen der Süd-Chemie AG. Bei Material 2 handelt es sich um einen natürlich anstehenden Kreideton von ausgeprägt plastischer, steifer bis halbfester Konsistenz. Das Material wurde der Tongrube Diekmann, Arpke bei Hannover, entnommen.

Die generelle Eignung als Abdichtungsmaterial für Deponien wurde anhand von geotechnischen Routineuntersuchungen nach DIN-Normen nachgewiesen. Dabei wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenverteilung
- Bestimmung des natürlichen Wassergehaltes
- Bestimmung der Zustandsgrenzen
- Bestimmung der Proctordichten und des opt. Wassergehaltes
- Wasserdurchlässigkeit

Die mineralogische Charakterisierung erfolgte semiquantitativ anhand von Pulverdiagrammen mittels Röntgendiffraktometrie.

Tabelle 1: Semiquantitativer Mineralbestand der Gesamtprobe

	Mineralgemisch	Diaton
Hauptgemengteile	Quarz	Quarz Glimmer/Illit Wechselagerungsmineral
Nebengemengteile	Na-Bentonit Glimmer	Kaolinit
Spuren	Dolomit Feldspat Kaolinit	Chlorit Calcit Gips Organische Substanz

Tabelle 2: Semiquantitativer Mineralbestand der Tonfraktion

	Mineralgemisch	Diaton
Hauptgemengteile	Na-Bentonit	Wechselagerung von Smektit und Illit
Nebengemengteile	Illit	Kaolinit
Spuren	Dolomit	Chlorit Calcit Organische Substanz

3. Untersuchungsprogramm und Methodik

Die Diffusionsversuche wurden mit einem neu entwickelten Versuchsgerät, dem sog. DKS-Permeameter durchgeführt. Dieses Meßinstrument ermöglicht die direkte Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit und der effektiven Diffusionskoeffizienten einzelner Schadstoffe im Boden an ungestörten Bodenproben. Entscheidend ist neben dem Ausschalten konvektiver Schadstofftransportmechanismen die Möglichkeit, eine vertikale Auflast auf die eingebaute Bodenprobe aufzubringen und diese damit in einen Spannungszustand zu versetzen, der die Randbedingungen unterhalb eines Deponiekörpers weitestgehend widerspiegelt. Eine ausführliche Beschreibung dieser Meßmethode findet sich in MANN [1992].

Die Ermittlung der am Boden sorbierten Schadstoffmengen erfolgt mittels chemischer Analyse und anschließenden Vergleichsrechnungen mit dem an der Ruhr-Universität entwickelten Finite-Differenzen-Rechenprogramm MIGRAT [ausführliche Dokumentation in WIEMER, 1993].

Für jedes Abdichtungsmaterial wurden so schadstoffspezifische Kennwerte ermittelt, die reproduzierbare Aussagen zur Größenordnung ihres Schadstoffrückhaltevermögens ermöglichen; zusätzlich wurden die Ergebnisse dieser Langzeit-Diffusionsversuche anhand modifizierter Batch-Versuche überprüft.

In einer ersten Versuchsphase wurden die einzelnen Probekörper mit Monolösungen der einzelnen Schadstoffe beaufschlagt; die Dauer eines Diffusionsversuches richtete sich nach Typ und Konzentration der Schadstofflösung. Im Allgemeinen lag die Versuchsdauer zwischen acht Wochen und vier Monaten. Als Schadstofflösungen wurden im anorganischen Versuchsprogramm gut bis sehr gut lösliche Salze der Kationen Blei, Zink, Kalium und Ammonium in unterschiedlichen Konzentrationen eingesetzt. Als organische Prüflösungen wurden ein organisches Säuregemisch (Braunschweiger Prüflösung [REUTER, 1988]) sowie wäßrige Lösungen von Anilin und Trichlorethen eingesetzt. In einer weiteren Versuchsphase wurden die Abdichtungsmaterialien Mischungen dieser anorganischen und organischen Prüflösungen sowie einem künstlichen Sickerwasser, das aus den Einzelkomponenten zusammengesetzt ist, ausgesetzt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zusammensetzung des künstlichen Sickerwassers

Anorganische Salzlösungen	Organische Säuremischung	Organische Lösungen
[0,2 Mol] Zinknitrat	[0,05 Mol] Essigsäure	2% Anilininlösung
[0,2 Mol] Kaliumnitrat	[0,05 Mol] Natriumcitrat	2% Trichlorethenlösung
[0,2 Mol] Ammoniumnitrat	[0,02 Mol] Glycin [0,003 Mol] Salicylsäure	

4. Beobachtungen an der gemischtkörnigen Trockendichtung (Mineralgemisch)

Kofällung des Bleis mit Zink

Unter den pH-Bedingungen an der Grenzfläche der äußerst hoch konzentrierten Schadstofflösung zur Tonoberfläche (pH = 8,5) werden die Schwermetalle nach Überschreiten des Löslichkeitsproduktes als Hydroxid ausgefällt [LINDSAY, 1979]. Die in der Abb. 1 gezeigte Zunahme der Bleisorption bei Anwesenheit von Zinkkationen in der Schadstofflösung legt den Verdacht nahe, daß es zu einer Kofällung kommt, indem sich Schichten von Blei- und Zinkhydroxid abwechseln. Da diese Reaktionen sehr schnell ablaufen, läßt sich dieser Reaktionsmechanismus jedoch nicht explizit anhand der Emissionskurven beweisen. Neben der Fällung der Schwermetalle finden zusätzlich an den Bentonitoberflächen Ionenaustauschreaktionen mit dem Natrium der Zwischenschichten statt. Dafür spricht die unerwartet deutliche Zunahme der hydraulischen Durchlässigkeit des Mineralgemisches nach Versuchsende. Offensichtlich bewirkt der Eintauch der zweiwertigen Kationen eine Kontraktion des Bentonits, die eine Erhöhung des durchflußwirksamen Porenraumes nach sich zieht. Ein apparativer Fehler kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden, da eine nachweisbare Erhöhung der Durchlässigkeit generell nur bei Schwermetallbelegung festgestellt werden konnte, nicht aber bei den Versuchen mit den einwertigen Kationen (Abb. 2).

Bildung eines Elektronen-Akzeptor-Komplexes

Im künstlichen Sickerwasser wird eine erhöhte Zinksorption beobachtet (Abb. 3). Denkbar ist die Ausbildung eines tetraedrisch koordinierten Zink-Anilino-Komplexes (Tetraanilinozink) durch eine Anlagerung der Anilinmoleküle an das als Elektronenakzeptor dienenden Zinkkation. Hierbei werden die 4s- und 4p-Orbitale des Zinks aufgefüllt, da dessen 3d-Orbitale bereits voll besetzt sind. Dieser "outer-orbital-Komplex" wird über die Ausbildung von van-der-Waals-Bindungen (Physisorption) im Mineralgemisch zurückgehalten. Der hohe lipophile Charakter des Komplexes unterstützt die Sorption an der Tonoberfläche zusätzlich; ähnliche Prozesse wurden von WIENBERG [1990] allgemein für hydrophobe organische Moleküle beschrieben.

Organophilierung des Bentonits

Desweiteren bewirkt die Anlagerung des Anilins an den Tonoberflächen eine Organophilierung des Bentonits. Nach Versuchsende konnte eine intensive kirschrote Verfärbung des Tones beobachtet werden, die sich möglicherweise auf eine koordinative Bindung zwischen dem freien Elektronenpaar des Anilins und den leeren d-Orbitalen der Siliziumatome des Tonmineralgerüsts zurückführen läßt. Hierbei würde sich eine sehr stabile

Elektronenrückbindung ausbilden, die für die Farbänderung verantwortlich ist und zu einer starken Fixierung des Anilins im Mineralgemisch führt.

Unter den pH-Bedingungen des künstlichen Sickerwassers (pH = 4,5 - 5) wird ein Teil der organischen Base Anilin protoniert und bildet das Aniliniumion. Nach

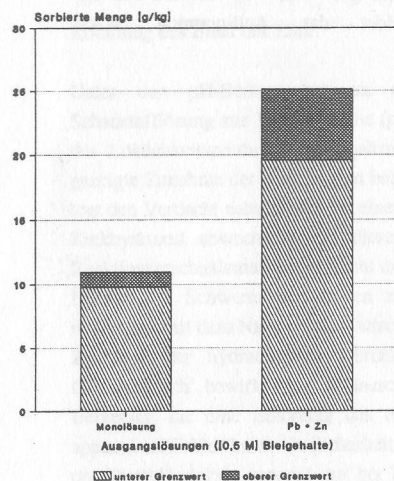


Abb. 1: Sorption von Blei am Mineralgemisch bei Anwesenheit konkurrierender Kationen.

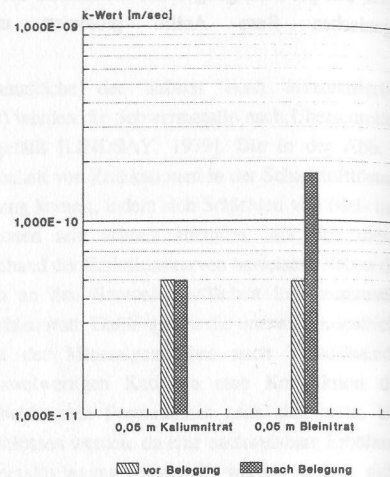


Abb. 2: Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit des Mineralgemisches nach Belegung mit [0,05 Mol] Salzlösungen.

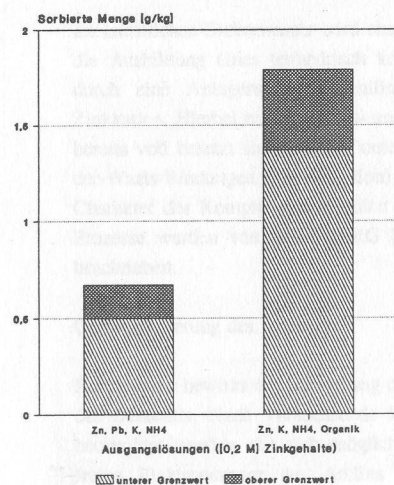


Abb. 3: Steigerung der Zinkadsorption am Mineralgemisch bei Anwesenheit organischer Schadstoffe.

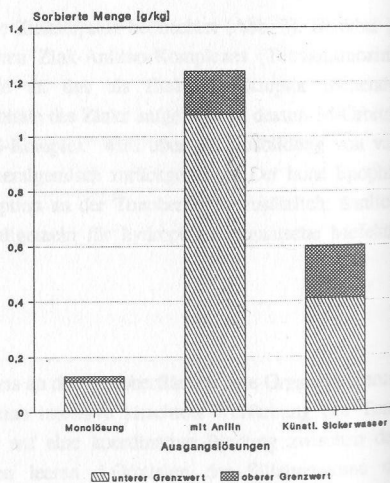


Abb. 4: Steigerung der Essigsäureadsorption am Mineralgemisch bei Anwesenheit von Anilin.

LAGALY [1993] kann dieses Kation in den Schichtzwischenräumen des Bentonits eingetauscht werden, es kann sogar eine bevorzugte Adsorption des Säure-Basepaars Aniliniumion + Anilin stattfinden. Durch die Entstehung dieses (Organo-) Anilin-Bentonits wird die Rückhaltung weiterer organischer Schadstoffe der Prüfflüssigkeit deutlich erhöht. In Abb. 4 ist die Zunahme der Essigsäuresorption bei ausschließlicher Anwesenheit von Anilin deutlich zu erkennen. Im künstlichen Sickerwasser dagegen ist diese Zunahme nicht so markant, da zum einen weniger Anilin durch die Bildung des Zink-Anilino-Komplexes zur Ionenaustauschreaktion mit dem Bentonit zur Verfügung steht, zum anderen die übrigen Inhaltsstoffe dieses Sickerwassers eine starke Konkurrenz für die Essigsäure darstellen.

5. Beobachtungen am Diaton

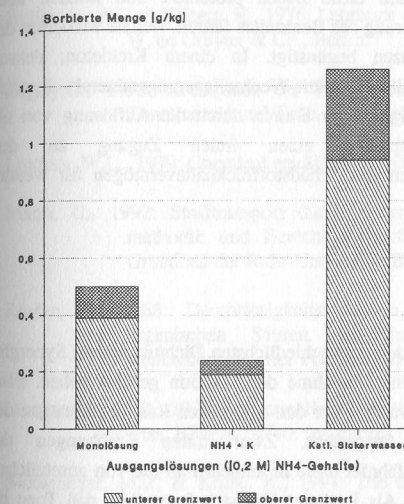


Abb. 5: Sorption von Ammonium am Diaton bei Anwesenheit konkurrierender Kationen.

Die Abbildung 5 zeigt die Veränderungen bei der Ammoniumsorption am Diaton. Das Rückhaltevermögen gegenüber diesem einwertigen Ion ist relativ gering; erwartungsgemäß halbiert sich die sorbierte Menge, wenn eine adäquate Schadstoffmenge von Kaliumionen in der Prüfflüssigkeit vorhanden ist. Die Koinzidenz des chemisch/physikalischen Verhaltens von Kalium und Ammonium ist allgemein bekannt und liegt in der Ähnlichkeit des Ionenpotentials bei Übereinstimmung von Ionenradius und Wertigkeit begründet. Anders ist es beim künstlichen Sickerwasser. Der korrodierende Angriff der Essigsäure auf die als Verkittungssubstanz dienenden Karbonatphasen des Kreidetons

ermöglicht eine Aktivierung der zunächst nicht zugänglichen Smektitlagen des Illit-/Smektit-Wechselagerungsminerals. An den Oberflächen des nunmehr reaktionsfähigen Smektit kann ein Ionenaustausch mit dem Ammonium stattfinden und bewirkt eine Steigerung des Sorptionsvermögens. Dies geschieht vor dem Hintergrund gleichzeitig ablaufender Prozesse durch die Anlagerung des Anilins und der übrigen im künstlichen Sickerwasser vorhandenen konkurrierenden Kationen.

6. Zusammenfassung

Bei der Auswertung von Langzeit-Diffusionsversuchen wurde das Rückhaltevermögen verschiedener Tone gegenüber unterschiedlichen anorganischen und organischen Schadstoffen bestimmt. Die Untersuchungen belegen, daß das generell vorhandene Schadstoff-rückhaltevermögen mineralischer Abdichtungen durch Synergie-Effekte verstärkt wird, wenn diese mit Mischungen gleicher oder unterschiedlicher Schadstoffgruppen beaufschlagt werden. Das Studium des mineralogischen Aufbaus der Dichtungstone ermöglicht eine Interpretation dieser Beobachtungen. Die Sorption von Schwermetallen wird durch das alkische Milieu eines Bentonit-Sand-Gemisches begünstigt. Die hierbei stattfindende Fällung von Schwermetallhydroxiden begleitet Ionenaustauschreaktionen mit den austauschbaren Zwischenschichtkationen. Eine Verstärkung der Schwermetallsorption wird durch die Gegenwart von organischen Basen wie Anilin ermöglicht, indem sich Elektronen-Akzeptor-Komplexe bilden. Im sauren Milieu werden diese Basen protoniert und können über Ionenaustauschprozesse zu einer Organophilierung des Bentonites führen, welche wiederum die Rückhaltung weiterer organischer Substanzen begünstigt. In einem Kreidetone, dessen Tonfraktion hauptsächlich aus einem Illit-/Smektit-Wechselagerungsmineral besteht, ermöglicht erst der korrodierende Angriff organischer Säuren durch die Auflösung von als Verkittungsmaterial dienenden Karbonatphasen einen freien Zugang zu den Smektitoberflächen. In der Folge erhöht sich das Schadstoffrückhaltevermögen für weitere Sickerwasserinhaltsstoffe.

7. Schlußbemerkung

In einer Vielzahl von Versuchen wurden bei den unterschiedlichsten Dichtungstonen Synergie-Effekte beobachtet, die ausschließlich zu einer Zunahme der Sorption geführt haben. Eine Desorption von eingelagerten Schadstoffen wurde unter den naturnahen Randbedingungen der DKS-Permeameter-Untersuchungen nicht festgestellt. Zwar traten Erhöhungen der hydraulischen Durchlässigkeit auf, jedoch gefährdet diese in keinem Fall die von gesetzlichen Richtlinien geforderte Mindestdichtwirkung. Als Resümee läßt sich feststellen, daß Tone im Deponiebau eine wichtige Rolle nicht nur als Abdichtungsmedium übernehmen können, sondern daß sie als sorbierender Werkstoff aufgrund ihrer spezifischen Materialeigenschaften auch gegenüber komplexen Sickerwässern einen Beitrag zum Barrierenkonzept leisten. Ein Verzicht auf das Sorptionsvermögen als Kriterium mineralischer Abdichtungsschichten sollte daher nicht leichtfertig in Kauf genommen werden.

8. Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung für die Förderung des BMFT-Forschungsvorhabens "Versuche und Berechnungen zum Schadstofftransport durch mineralische Abdichtungen und daraus resultierende Materialentwicklungen", in dessen Rahmen die vorgestellten Untersuchungsergebnisse entstanden. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jessberger sei persönlich für die Unterstützung bei der Bearbeitung und die Denkanstöße zu den geotechnischen Fragestellungen gedankt. Die tonmineralogischen Untersuchungen wurden am Staatlichen Forschungsinstitut für Angewandte Mineralogie in Regensburg durchgeführt, dessen Mitarbeitern dafür herzlich gedankt sei.

9. Literatur

- Holleman, A.F. & Wiberg, E., 1976: Lehrbuch der anorganischen Chemie. 81-90. Aufl. Verlag W. de Gruyter & Co., Berlin.
- Lagaly, G., 1993: Reaktionen der Tonminerale. In: Jasmund, K. & Lagaly G. (Hrsg.): Tonminerale und Tone. Steinkopff Verlag, Darmstadt, s. 138 f.
- Lindsay, W.L., 1979: Chemical equilibria in soils. John Wiley & Sons, New York.
- Mann, U., 1992: Stofftransport durch mineralische Deponiebasisabdichtungen: Versuchsmethodik und Berechnungsverfahren. Diss. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 19.
- Reuter, E., 1988: Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 26.
- Stockmeyer, M.R., 1992: Organophile Bentonite als Komponente in Deponiebarriersystemen. Diss. ETH Nr. 9740. Institut für Geotechnik, ETH Zürich.
- Stockmeyer, M.R. & Kruse, K., 1991: The adsorption of heavy metals and organic water pollutants by bentonites of various organophilic covering. Clay Minerals 26, s. 431-434.
- Volgt, H.J., 1990: Hydrogeochemie. Springer-Verlag, Leipzig.
- Wagner, J.F., 1992: Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponieabdichtungen - ein Vergleich von Labor- und Geländestudien. Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Bd. 22.

Wiemer, U., 1993: Erstellung eines Finite-Differenzen-Rechenprogrammes zur Bestimmung von Sorptionsparametern aus DKS-Permeameterversuchen. Unveröff. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum.

Wienberg, R., 1990: Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. Teil 1 u. 2. AbfallwirtschaftsJournal s. 222-230 und s. 306-314.

FORSCHUNGSVERBUNDVORHABEN "METHODEN ZUR ERKUNDUNG UND BESCHREIBUNG DES UNTERGRUNDES VON DEPONIEREN UND ALTLASTEN"

N. TADJERPISHEH

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR),
Stilleweg 2, D-30655 Hannover

Kurzfassung

Es werden das Forschungsverbundvorhaben "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten" sowie einige Ergebnisse von in dem Verbundvorhaben durchgeführten Projekten des Fachbereichs "Geochemie" vorgestellt.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als Projektleitung dieses Verbundvorhabens erarbeitet zur Zeit auf der Grundlage der Forschungsarbeiten ein aus 6 Bänden bestehendes Werk mit dem vorläufigen Titel "Methodenhandbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten". Es wird auf Zielsetzung sowie Zielgruppen eingegangen. Im Detail wird der Band "Tonmineralogie und Bodenphysik" vorgestellt.

1 Forschungsverbundvorhaben: "Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten"

Bei einem Abfallaufkommen von derzeit mehr als 300 Mio. Tonnen pro Jahr in Deutschland wird deutlich, daß Deponien auch in Zukunft unverzichtbar sind. Die Kapazitäten der zur Zeit im Betrieb befindlichen Deponien reichen langfristig nicht aus, so daß neue Deponiestandorte gefunden werden müssen.

Mangels fehlender oder ungenügender geowissenschaftlicher Voruntersuchungen der Standorte bei der Ablagerung von Abfällen sind in den zurückliegenden Jahren aus Altdeponierungen (Altdeponien) Altlasten geworden. Die Zahl der Verdachtsflächen wird bundesweit auf ca. 180.000 geschätzt. Untersuchungen zeigen, daß das von der Schadstoffausbreitung im Untergrund ausgehende Gefährdungspotential weit größer ist, als bisher angenommen.

Der geologische Untergrund von Deponien und Altlasten wird als letzte und wichtigste Barriere (geologische Barriere) zur Behinderung und Minderung des Austrags von Schadstoffen aus den Deponien und Altlasten in die Umwelt angesehen. Die TA Siedlungsabfall stellt folgende Anforderungen an die geologische Barriere:

Sie soll aus natürlich anstehenden schwach durchlässigen Locker- bzw. Festgesteinen mit mehreren Metern Mächtigkeit und hohem Schadstoffrückhaltepotential bestehen.