

STONE AND TONBARRIERS

E. E. KOHLER & H. HEIMERL

Einführung

Prof. Dr. E.E. Kohler hinterließ neben zahlreichen Veröffentlichungen zur Geologie und Heimatgeschichte des Allgäus, zur Geschichte der Chemie und der Naturwissenschaften hauptsächlich einen breiten Fundus an wissenschaftlicher Literatur zu deponietechnisch-relevanten Themen. Viele seiner Arbeiten beschäftigen sich hier mit dem Material Ton bzw. mit den Tonmineralen als den Hauptkomponenten der Tone. Bestimmte Tone sind in der Summe ihrer Eigenschaften für den Deponiebau wie ganz allgemein für viele Zwecke der Umweltsicherung in idealer Weise geeignet.

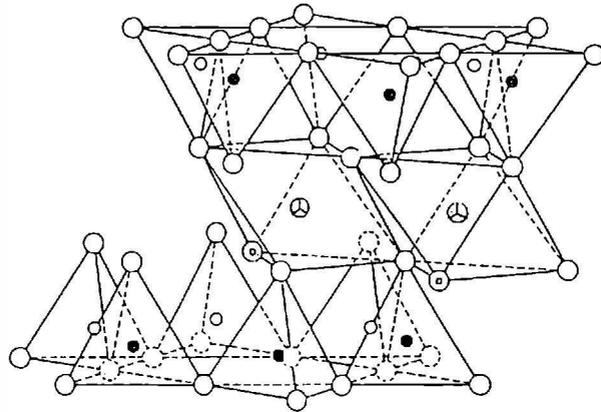
Im folgenden werden zwei Arbeiten Prof. Kohlers dargestellt, die diese Thematik zum Inhalt haben. Dabei wird zum einen mit einer kurzen Zusammenfassung über verschiedene Barrieretypen Bezug zu einem Vortrag Prof. Kohlers an der Boku Wien vom Frühjahr 1996 genommen. In diesem Zusammenhang wären auch die Beiträge in TONMINERALE UND TONE (KOHLER 1993) und im REGENSBURGER FORSCHUNGSMAGAZIN (KOHLER 1995) zu nennen. Darüberhinaus ist eine Arbeit vorgestellt, die am Beispiel der 12-Jahre alten bayerischen Hausmülldeponie „Aurach“ in Mittelfranken den hohen Wert von Tondichtungen aufzeigt. Dabei wurde eng mit der Landesgewerbeanstalt Bayern kooperiert, die parallel zu den geochemisch-mineralogischen Untersuchungen Prof. Kohlers geotechnische Untersuchungen am gleichen Material durchführte.

1 ALLGEMEINES ÜBER TONE UND BARRIERESYSTEME

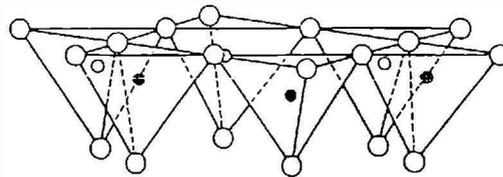
1.1 Wesentliches über Tone und Tonminerale

Es ist eine bedauerliche Tatsache, daß sich die Naturwissenschaften und die Technik immer noch nicht über den begrifflichen Inhalt der Bezeichnung TON geeinigt haben. Vom geowissenschaftlichen Standpunkt aus ist Ton zunächst nur ein Gesteinsname, hinter dem sich aber eine unendliche Vielfalt von Erscheinungsformen verbergen kann. Zwei besonders geartete bzw. hochwertige Tongesteine sind der BENTONIT und der KAOLIN. Beide Gesteine zeichnen sich durch hohe Tonmineralgehalte aus - so bildet das quellfähige Dreischichtsilikat MONTMORILLONIT den Hauptbestandteil des Gesteins BENTONIT, das nicht quellfähige Zweischichtsilikat KAOLINIT jenen des Gesteins KAOLIN.

Die für die Tone typischen Eigenschaften rühren hauptsächlich von den silikatischen Tonmineralen her, deren Erfassung und Beschreibung wegen ihrer Feinkörnigkeit sehr erschwert wird. Sowohl die Tone als auch die feinkörnigen Anteile der bindigen Lockergesteine bestehen hauptsächlich aus den blättchenförmigen silikatischen Tonmineralen - den Schichtsilikaten - Quarz, amorphen Beimengungen verschiedenster Natur und oftmals auch aus geringen Anteilen von organischem Material.



austauschbare Kationen
 nH_2O



- Si
- Al in Tetraederpositionen
- ⊗ Al, Mg oder Fe in Oktaederpos.
- ⊕ Hydroxyl
- Sauerstoff

Abb. 1: Prinzipielle Gerüststruktur eines Montmorillonits

Bei den eigentlichen Tonmineralen handelt es sich um pseudo-hexagonale Schichtsilikate mit einer Teilchengröße < 0.02 mm. Sie gehören hauptsächlich zum Typ der Hydroglimmer (Illit), den Gruppen Montmorillonit-Saponit (Smectit) sowie Kaolinit-Serpentin und gelegentlich zum Talk- und Glimmertypus sowie zur Chloritgruppe. Daneben gibt es Strukturen mit Wechsellagerung der Schichttypen, wozu eine große Anzahl von natürlich auftretenden Mineralen zu rechnen ist (KÖHLER 1995).

1.2 Tonbarrieren

Tonhaltige Erdstoffe bzw. bindige Böden werden seit alters her zur Schüttung von Flußdeichen und Staudämmen verwendet. Durch spezielle Techniken oder Vergütungsmaßnahmen lassen sich natürliche Ton-, Lehm- und Mergersedimente in technische Bauwerke einarbeiten, die allen Erfordernissen moderner Erd- und Wasserbautechnik entsprechen. Ihre höchste Vollendung bzw. Effektivität finden Tonbarrieren aber in der Natur selbst: Die Bildung der Grundwasservorräte, die Entstehung der Moore und zahlreicher Seen, die Erdöl- und Erdgasfelder der Erde und nicht zuletzt ein großer Teil der Minerallagerstätten – sie alle verdanken ihre Entstehung der abdichtenden Wirkung von natürlich entstandenen Tonschichten oder Gesteinsbänken mit tonigem Bindemittel in tieferliegenden oder oberflächennahen Bereichen der Sedimente.

Aufbauend auf den Erfahrungen mit der Abdichtungswirkung von Tonbarrieren im Erd- und Wasserbau werden in der Deponietechnik zunehmend Wege gesucht und auch gefunden, die natürlichen Eigenschaften der Tone bei der Einkapselung von anthropogenen Schadstoffen zu nutzen. Anders aber als im Erd- und Wasserbau herkömmlicher Art wird in der Deponietechnik das Medium WASSER durch eine komplex zusammengesetzte Flüssigkeit ersetzt, die nur schwer charakterisiert werden kann. Da Tone oder Tonminerale in der Regel als die besonders resistenten Rückstände der chemischen Gesteinsverwitterung anzusehen sind, werden sie

auch besonders widerstandsfähig gegenüber anthropogen entstandenen Verwitterungslösungen, nämlich den DEPONIESICKERWÄSSERN, sein (KÖHLER 1995).

1.2.1 Natürliche Tonbarrieren

Grundsätzlich kann jede natürliche Tonschicht im Untergrund eines Deponiestandortes als TONBARRIERE wirken. Entscheidend für die Effektivität einer Barriere wird primär die Homogenität und die Mächtigkeit des Tones bzw. der Tonschicht sein. Das Rückhaltevermögen einer natürlichen Tonschicht wird aber auch von hydrogeologischen und geotechnischen Faktoren abhängen, die immer standortabhängig sein werden. Die vordergründig sehr verlockende Anlage von Deponiebauwerken in aufgelassenen Ton- oder Lehmgruben, die sich als natürliche Tonbarrieren anbieten, wird nur dann sinnvoll sein, wenn die beiden Grundvoraussetzungen für eine derartige Nutzung, nämlich homogene Verteilung des schadstoffimmobilisierenden Tonmaterials und eine ausreichende Mächtigkeit desselben, zutreffend sind. Die Überprüfung der Homogenität einer natürlichen Deponieabdichtung hinsichtlich des Retardations- und Adsorptionsvermögens stellt mit Sicherheit den Geotechniker vor ähnlich große Probleme wie der Bau einer vollkommen neu konzipierten Deponieanlage.

1.2.2 Technische Tonbarrieren

Eine technisch präparierte Grubensohle aus anstehendem Ton oder Ziegellemm stellt bereits eine technische Tonbarriere dar. Ob eine derartig hergestellte Deponiebasisabdichtung allerdings alle Kriterien einer "technischen Barriere" erfüllt, muß bei jeder derartigen Deponie und für jedes Material gesondert bewertet werden. Bei der Herstellung von Barriersystemen aus TON oder tonhaltigen Erdstoffen verwendet man sowohl örtlich anstehendes als auch ortsfremdes Material. Zur Verbesserung der Abdichtungswirkung kann das Abdichtungsmaterial

mit chemischen STABILISATOREN vergütet, oder im Verbund mit anderen Barriersystemen, wie z.B. Kunststoffbahnen oder Asphaltsschichten, errichtet werden.

Folgende Kriterien müssen beachtet werden:

OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN

Der Deponieinhalt soll durch die Oberflächenbarriere gegen eindringende Feuchtigkeit (z.B. Regenwasser, Tau, Schmelzwasser etc.) geschützt werden, andererseits sollen entstehende Deponiegase zurückgehalten werden, damit sie besonderen Sammlern zugeführt werden können. Über die chemische Wechselwirkung (z.B. Rückhaltevermögen) zwischen toxischen Bestandteilen der Deponiegase und den Tonbestandteilen herrscht noch weitgehend Unklarheit.

VERTIKALE BARRIERESYSTEME

Die auf der Basis von BENTONIT und WASSER oder ZEMENT und BENTONIT und WASSER (vergl. SCHWAIGHOFER et al. 1994) hergestellten vertikalen mineralischen Abdichtungen sind in ihrer Funktion den in geologischen Zeiträumen entstandenen Tonschichten sehr ähnlich. Entsprechendes gilt auch für die Mineralphasen derartiger Massen. Unabhängig vom Typ und der Herstellungsweise entsteht aus den Zement- und Bentonitzusätzen eine mikrokristalline silikatische Matrix aus Montmorillonit und hydratisierten Calcium-Aluminium-Hydrat- (CAH)- und/oder Calcium-Silicat-Hydrat- (CSH) Phasen sowie aus silikatischem und oxidischem Porenzement. Diese polymineralische Masse zeichnet sich durch ein hohes Maß an innerer Homogenität aus, d.h. das Mikrogefüge und der Porenraum sind ziemlich einheitlich beschaffen. Außerdem kommt es zwischen der synthetischen Dichtwandmasse und dem Nebengestein zu einer mehr oder weniger innigen "Verwachsung", was für die Barrierewirkung von Bedeutung sein kann.

HORIZONTALE BARRIERESYSTEME AN DER DEPONIEBASIS

Eine maximale Abdichtungswirkung bei allen mineralischen Abdichtungen wird dadurch erreicht, daß die Porenräume innerhalb der dichtend wirkenden Schicht reduziert oder möglichst gering gehalten werden. Gleichgültig, ob in der Basisabdichtung hochwertige Tone, Mischungen aus mergeligen oder lehmigen Böden mit Kiesen oder gar mit Zusätzen von Zement, Steinmehl, Bentonit oder chemischen Stabilisatoren verarbeitet werden - in jedem Fall muß berücksichtigt werden, daß nicht Regen- oder Grundwasser die Dauerbeständigkeit der horizontalen Barriere beeinflusst, sondern die "Chemikalie" DEPONIESICKERWASSER (KÖHLER 1995).

FORSCHUNGSPOTENTIALIA ÜBER BARRIERESYSTEME

Neben analytischen Fragestellungen und Problemen der Standorterkundungen könnten Fragen über Vergütungspotentiale von Tonen und Tongesteinen eine wesentliche Rolle in zukünftigen Arbeiten spielen. So kann das Problem der Austrocknung einer mineralischen Oberflächenabdichtung als nicht gelöst betrachtet werden. Hier könnte unter Umständen die Vernetzung der Tonmineralteilchen mit geringen Masseanteilen von kationischen, organischen Polymeren, mit speziell vorbehandelten Textilfasern oder dergleichen eine wesentliche Verbesserung erbringen. Gerade die Erforschung der Wechselwirkung organischer Verbindungen mit Tonmineralen in Abhängigkeit von Begleitphasen, auch zugemischte Begleitphasen wie Schlackenmaterial, und in Abhängigkeit vom Gegenionenbelag könnten noch interessante zukünftige Forschungsfelder erbringen.

2 UNTERSUCHUNG EINER CA. 12 JAHRE ALTEN BASISABDICHTUNG IN BAYERN

2.1 Einleitung und Problematik

Vor der Einführung der Kombinationsdichtung als Regelabdichtung für die Basis von Sonderabfall- und Siedlungsabfalldeponien durch TA Abfall und TA Siedlungsabfall in Deutschland wurden bei vielen Deponien einfache mineralische Abdichtungen ausgeführt. In Bayern war in der ersten behördlichen Anweisung für die Dicke der mineralischen Abdichtungsschicht 60 cm vorgeschrieben. Eine hervorragende Möglichkeit, den Qualitätsnachweis einer derartigen mineralischen Basisabdichtung unter Deponiebetriebsbedingungen zu führen, bot die Deponie „Im Dienstfeld“ bei der mittelfränkischen Ortschaft Aurach. Für die Sanierung des Sickerwassersammelsystems (KRESS 1994) war es erforderlich, an zwei Abschnitten¹, die in den Jahren 1979 und 1982 in Betrieb genommen wurden, die Basisabdichtung freizulegen. An diesen Stellen konnten dann in Absprache mit dem Zweckverband zur Abfallbeseitigung beim Landratsamt Ansbach Proben von der Landesgewerbeanstalt Bayern entnommen werden. Die wesentlichen bodenmechanischen und mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse wurden bei MÜLLNER (1995) sowie GARTUNG, MÜLLNER, HEIMERL & KOHLER (1996) vorgestellt. Diese Ergebnisse wurden an der Landesgewerbeanstalt unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Gartung, Dr.-Ing. Müllner, Dipl.-Geol. St. Eberlein, Dr. Kreuzer und Dipl.-Biol. St. Schmidt gewonnen.

Die mineralogisch-geochemischen Untersuchungsergebnisse wurden am Staatlichen Forschungsinstitut für Angewandte Mineralogie unter der Leitung von Prof. Dr. Kohler und Dr. Heimerl für die Landesgewerbeanstalt Bayern durchgeführt. In Fortführung der Untersuchungen von SCHNEIDER (1994) wurden dabei Mineralbestand, kolloidchemische Eigenschaften sowie Spuren- und Hauptelementgehalte analysiert. Zweck dieser Untersuchungen war

¹ Wird im folgenden als Abschnitt 1 und Abschnitt 2 bezeichnet.

es, konkrete Aussagen über das Rückhaltvermögen des ca. 12 Jahre alten Barrierematerials und über Spurenelementanomalien geogenen bzw. anthropogenen Ursprungs zu gewinnen. Alle Arbeiten der Bodenmechanik, Mikrobiologie sowie Geochemie und Mineralogie wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen gefördert und im entsprechenden Schlußbericht (LGA 1995) dargestellt.

2.2 Geotechnik/Mikrobiologie der Deponie „Aurach“

Temperaturverteilung im Deponiekörper

In den älteren Abschnitten, in denen die Deponie vor mehr als 10 Jahren befüllt wurde, liegen die Temperaturen im Deponiekörper zwischen 20° und 44°Celsius. Der 1985 in Betrieb genommene Deponieabschnitt weist im Kern des 20 m hohen Deponiekörpers noch Temperaturen bis 58°C auf. Bis zu 64°C wurden in dem jüngsten Abschnitt gemessen, der erst 1994 in Betrieb gegangen ist. Hier sind an der Basis Werte bis 53°C beobachtet worden.

Bodenmechanik

Die Flächendrainschicht aus gebrochenem Kalkstein der Korngröße 8/32 mm ist nach 15 Betriebsjahren noch intakt und funktionsfähig. Sie führt das Sickerwasser ab. Der Sickerwasserstrom besitzt eine Mächtigkeit von wenigen Millimetern und benetzt überall die Oberfläche der mineralischen Abdichtungsschicht.

Die Ergebnisse der umfangreichen bodenmechanischen Laborversuche an Proben aus der mineralischen Abdichtungsschicht wurden statistisch ausgewertet und mit den Daten, die im Zuge der Fremdüberwachung bei der Bauausführung gewonnen worden waren, verglichen. Es zeigt sich, daß die mineralische Dichtungsschicht gegenüber dem Einbauzustand dichter geworden ist. Die hydraulische Leitfähigkeit ist um bis zu zwei Zehnerpotenzen geringer geworden.

Der Wassergehalt liegt an der Oberfläche der Dichtung höher als beim Einbau. Innerhalb der Dichtungsschicht hat er sich seit dem Einbau nicht verändert. Eine Austrocknung ist an keiner Stelle beobachtet worden, obwohl die Temperaturen an der Basis der Deponie bis zu 53°C betragen haben. Im Rahmen üblicher statistischer Streuungen kann die Dichtung als homogen bezeichnet werden. Fehlstellen, Grenzen der einzelnen Einbaulagen, Risse oder offensichtliche Makroporen wurden, abgesehen von einzelnen Sandsteinbröckchen nicht beobachtet. Die Anforderungen der TA-Siedlungsabfall an die mineralische Komponente der Kombinationsdichtung werden erfüllt, obwohl in den Einbaukriterien vor zwölf bis 15 Jahren wesentlich geringere Qualitätsmerkmale festgelegt worden waren. Die Zeit, die Müllauflast und die sonstigen Einwirkungen haben zu einer Verbesserung der Abdichtungseigenschaften der Tonschicht geführt. Spuren einer eventuellen Durchsickerung wurden nicht festgestellt. Die mineralische Abdichtung erfüllt in vollem Umfang ihre Funktion.

Mikrobiologie

Auf der mineralischen Abdichtung befand sich eine durchgehende schwarzbraune, schleimige biologisch belebte Lage von mehr als einem Zentimeter Dicke, die nicht näher untersucht wurde. Alle mikrobiologisch analysierten Querschnitte der mineralischen Dichtungsschicht weisen die gleiche Tendenz auf. An der Oberseite liegen die Gesamtkeimzahlen mit 10^6 KBE/g (Kolonie bildende Einheiten pro Gramm Boden) in einer Größenordnung, die von Ackerböden bekannt ist. Mit der Tiefe nehmen die Keimzahlen um drei Zehnerpotenzen ab. In der unteren Hälfte der 60 Zentimeter dicken Dichtungsschicht werden Keimzahlen gemessen, wie sie in den „unbelebten Böden“ in der Natur vorkommen. Pathogene Keime treten in untergeordneter Größenordnung nur im oberen Bereich der Dichtungsschicht auf. In der Population der Mikroorganismen überwiegen bis in alle untersuchten Tiefen aerobe Bakterien. Anaerobe Bakterien kommen vor, ihre Keimzahlen liegen jedoch durchweg niedriger als diejenigen der aeroben Bakterien.

2.3 Untersuchungsmaterial und -methodik zur Geochemie/Mineralogie

2.3.1 Kurzbeschreibung des Probenmaterials

Die Deponie Aurach gründet im Übergangsbereich zwischen den Lehrberg-Schichten und dem Unteren Blasensandstein des Mittleren Keupers.

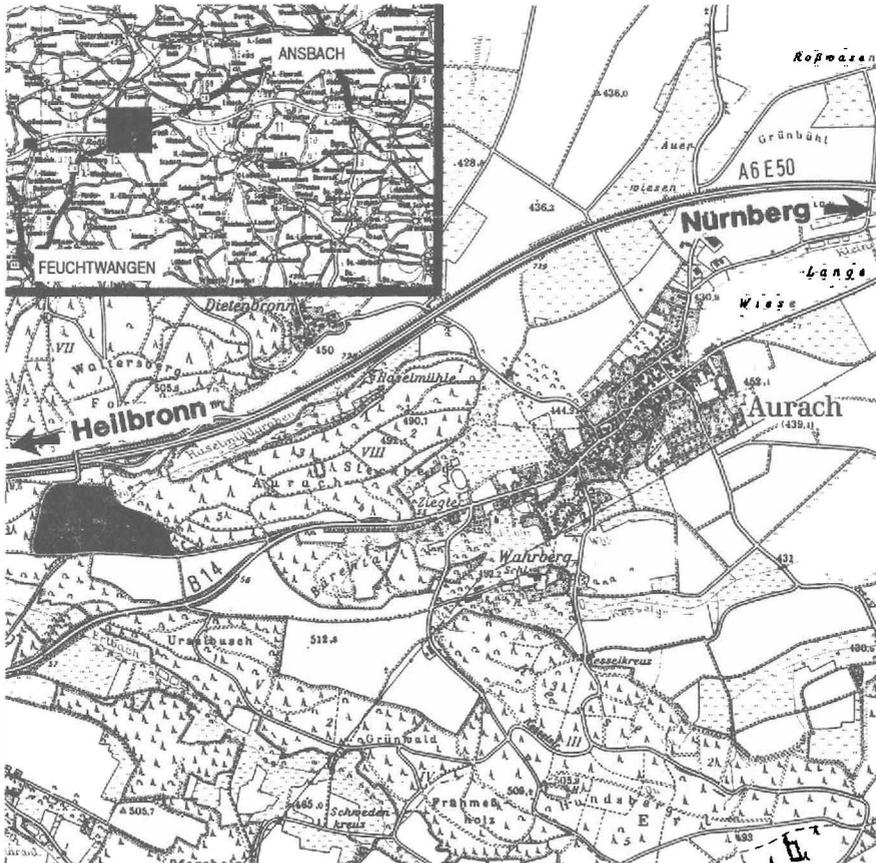
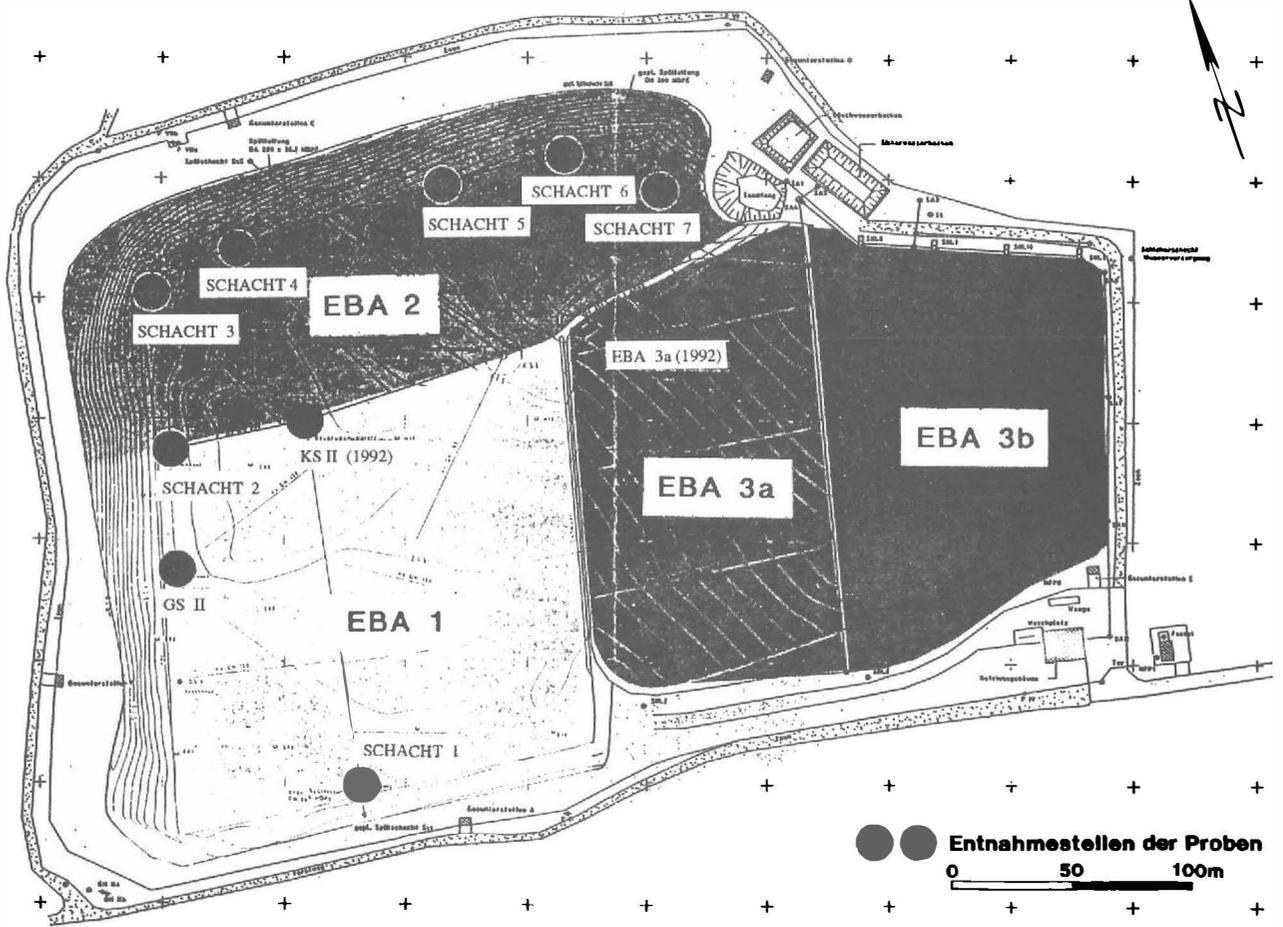


Abb. 2: Lageplan der Deponie „Aurach“

Im Einbauabschnitt 1 (EBA 1, siehe Abb. 3) wurde Material der Aufstandsfläche (= verwitterter Blasensandstein) eingebaut. Im Bauabschnitt 2 (siehe Abb. 3) wurde Ton aus naheliegender Tongrube verwendet. In der Tongrube wurden Lehrberg-Schichten abgebaut. In den untersuchten Proben des Barrierematerials ist keine klare Differenzierung zwischen dem verwitterten Blasensandstein und den Lehrberg-Schichten möglich. Der verwitterte Blasensandstein ist als grobkörnigeres Äquivalent zu den Tonen anzusprechen, es besteht aber hohe geochemische Ähnlichkeit. Daher können unabhängig vom Einlagerungsbereich die hier vorliegenden Proben der mineralischen Barriere entsprechend den Kornverteilungen als stark toniger Schluff bis stark schluffiger/schwach toniger Sand klassifiziert werden und im folgenden gemeinsam behandelt werden (MÜLLNER 1995).

Die Tone der Lehrberg-Schichten sind in einer lagunären Seichtwasserlandschaft entstanden. Durch die hohe Verdunstung unter dem warmen Klima bildeten sich teilweise Gipsflöze oder Gipslinsen aus. Die Tongesteine sind bisweilen inhomogen, da sie durch Gips bzw. Gipsbänke unterbrochen sind. Die Möglichkeit der Existenz von Gipslinsen im Barrierematerial ist daher grundsätzlich gegeben. Die Tone der Lehrbergsschichten besitzen erfahrungsgemäß mittlere Gehalte an Korngröße $< 2 \mu\text{m}$ um 50%. Sie enthalten Quarz um 20 - 30% und Illit/Glimmer in der Größenordnung von ca. 40 - 60%. In den verwitterten Blasensandsteinen sind die Ton- und damit Tonmineralgehalte zugunsten höherer Schluff-/Sand- und damit Quarz-/Feldspatgehalte verringert.

Abb. 3: Lageplan der Entnahmestellen der Deponie „Aurach“



In den Tonen der Lehrberg-Schichten lassen sich zum Teil hohe Eisengehalte nachweisen. Dieses Eisen ist zum Teil als Eisen(III)oxid (bzw. Eisen(III)hydroxokomplex), besonders Hämatit, ausgebildet und sitzt vermutlich zum anderen Teil in den Oktaederlücken der Tonminerale. Die Tone der Lehrbergsschichten enthalten zudem Chlorit bis etwa 20% und keinen Kaolinit. Smectite können in Wechsellagerung mit Illit in geringen Gehalten vorhanden sein. Die Gehalte der Karbonatminerale sind schwankend von 0 bis 60%. Dolomit kommt als häufiges Karbonatmineral vor. Mit Hilfe der schwankenden Gehalte an Dolomit kann dieses Mineral zur Überprüfung der Homogenität herangezogen werden. Die Eisen(III)oxide, Karbonate und Chlorite können als Bindemittel ausgebildet sein (HEIMERL, KOHLER, BILLINO & SANTL 1994; SANTL 1995).

Mit zunehmendem Karbonat- und Gipsgehalt sinken die Kationenaustauschkapazität (KAK) und die spezifische Oberfläche. Daher werden die zusammenfassenden Indikatoren zur letztendlich exakten Beschreibung der Homogenität die kolloidchemische Eigenschaften sein.

2.3.2 Untersuchungsmethodik

Die Untersuchungsmethodik gliedert sich in die Teilgebiete Kolloid- und Oberflächenchemie, Mineralogie und Analytik der Spurenelemente. Die Oberflächen werden anhand der Adsorption von Stickstoff und der Kationenaustauschkapazität (KAK) charakterisiert. Durch die Stickstoffadsorption nach BRUNAUER, EMMETT & TELLER (1938) wird die äußere (BET-) Oberfläche² bestimmt.

Nach MEHLICH wird die negative Festladung pro Masseinheit, die sogenannte Kationenaustauschkapazität, analysiert. Aus der Kationenaustauschkapazität kann bei Berücksichtigung der äußeren Oberfläche der Smectitgehalt berechnet werden, wie bei HEIMERL (1995) dargestellt. Überdies kann mit diesem Verfahren die

² Aus präparativen Gründen muß vor der BET-Bestimmung das karbonatische Bindemittel entfernt werden.

Gesamtoberfläche ermittelt werden. Hierbei müssen bestimmte Voraussetzungen über die Flächenladungsdichten getroffen werden. Die Festladungsdichten der inneren Oberflächen der Smectite in Wechsellagerungen werden zu ca. $0,0019 \text{ mval/m}^2$ angenommen und die Festladungsdichten der äußeren Oberflächen der Tonminerale werden zu ca. $0,003 \text{ mval/m}^2$ postuliert. Diese Voraussetzungen sind für die Keupertone Nordbayerns gut erfüllt, wie Untersuchungen von HEIMERL (1995) zeigen.

Die untersuchten Gesteinsproben werden auch über die Röntgenphasenanalyse untersucht. Die Smectite der Lehrbergsschichten sind Bestandteil von Wechsellagerungen wie von HEIMERL, KOHLER, BILLINO & SANTL (1994) sowie anderen Autoren gezeigt wurde. Die Smectite dieser Wechsellagerungen weiten weder mit Ethylenglykol noch mit Glycerin charakteristisch auf.

Die Analyse der Karbonatgehalte ist wesentlicher Bestandteil der mineralogischen Charakterisierung. Die Karbonate besitzen Bindemittelfunktion, werden durch Säuren und Komplexbildner gelöst, fallen im Alkalischen wieder aus und können Schwermetalle binden. Eine quantitative Differenzierung zwischen dem leichter löslichen Kalzit und dem schwerer löslichen Dolomit bietet sich bei hohen Karbonatgehalten an. Ansonsten genügt die Angabe des Gesamtkarbonatgehaltes, der nach Scheibler-Finkener bestimmt wird (HEIMERL 1995), und die qualitative Angabe der Karbonatminerale aus den Pulveraufnahmen der Röntgenphasenanalytik.

Für geotechnische und geochemische Fragestellungen erscheint zudem auch die Angabe des organischen Kohlenstoffgehaltes notwendig. Der organische Kohlenstoff wird nach der Oxidation mit Chromschwefelsäure photometrisch anhand der äquivalenten Cr(III)-Konzentration bestimmt. Da in den Proben keine weiteren oxidierbaren Bestandteile wie Pyrit und Siderit vorhanden sind, werden exakte Werte gemessen (HEIMERL, KOHLER & RADLINGER 1994).

Die Spurenelemente und die Hauptelemente werden durch Röntgenfluoreszenz (RFA) bzw. durch spektroskopische

Nachweismethoden in Kombination mit chemischen Aufschlüssen bestimmt. Alle Elementgehalte in den Proben werden auf Anomalien und Kontaminationen untersucht. Korrelationen zu kolloidchemischen Kenngrößen und mineralogischen Gehalten unterstützen derartige Untersuchungen. Zur quantitativen Bestimmung einiger Spurenelemente wird auch die Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) eingesetzt.

Die mit der RFA bestimmten Spurenelemente besitzen eine Nachweisgrenze von 10 ppm, die mit der RFA bestimmten Hauptelemente besitzen eine Nachweisgrenze von 0,01%. Alle Untersuchungsergebnisse werden insbesondere auf mögliche Kontaminationspfade hin interpretiert (z.B. mit Hilfe der Korrelationsanalysen).

2.4 Meßergebnisse zur Kolloidchemie und Mineralogie

Die Meßergebnisse zur Kolloidchemie sind in der Tabelle 1 und zur Mineralogie in der Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 1: Meßergebnisse zur Kolloidchemie

Entnahmestelle	Labornummer	Tiefe [m]	äußere Oberfl. [m²/g]	KAK [mval/100g]	Gesamtoberfl. [m²/g]
Schacht 3, Schurf 1/1	3615-A	0,05 - 0,10	54	17	59
Schacht 3, Schurf 1/1	3615-B	0,10 - 0,15	60	21	76
Schacht 3, Schurf 1/1	3615-C	0,15 - 0,20	53	21	80
Schacht 3, Schurf 1/1	3615-D	0,20 - 0,25	62	20	69
Schacht 3, Schurf 1/1	3615-E	0,25 - 0,30	26	16	69
Schacht 3, Schurf ½	3619-A	0,35 - 0,45	28	19	84
Schacht 3, Schurf ½	3619-B	0,45 - 0,55	25	20	91
Graben, Schurf 3	3154	0,05 - 0,15	52	19	70
Graben, Schurf 3	3155	0,15 - 0,25	59	22	82
Graben, Schurf 3	3156	0,25 - 0,30	53	22	85
Graben, Schurf 3	3161	0,40 - 0,50	14	13	60
Graben, Schurf 3	3162	0,50 - 0,60	9	11	53
Graben, Schurf 3	3163	0,50 - 0,65	23	16	71
Schacht 1, Schurf 1	3195	0,10 - 0,20	28	20	89
Schacht 1, Schurf 1	3196	0,20 - 0,30	23	18	81
Schacht 1, Schurf 1	3197	0,30 - 0,35	13	14	66
Schacht 2, Schurf 1	3678-A	0,05 - 0,10	35	19	81
Schacht 2, Schurf 1	3678-B	0,10 - 0,15	36	19	79
Schacht 2, Schurf 1	3678-C	0,15 - 0,20	36	19	79
Schacht 2, Schurf 1	3678-D	0,20 - 0,25	32	19	81
GS II, Schurf 2	3709	0,10 - 0,15	37	19	80
GS II, Schurf 2	3709	0,30 - 0,35	38	19	78
GS II, Schurf 2	3709	0,35 - 0,40	40	19	77
GS II, Schurf 2	3709	0,40 - 0,45	36	22	95

Tabelle 2: Meßergebnisse zur Mineralogie

Labornummer	Smectite [%]	Illit/Glimmer [%]	Karbonate [%]	Organik [%]
3615-A	< 1	52 - 59	2.4 (Dolomit)	0,1
3615-B	2	52 - 59	1.7 (Dolomit)	0,3
3615-C	4	57 - 64	2.1 (Dolomit)	0,5
3615-D	< 1	53 - 60	1.1 (Dolomit)	0,3
3615-E	6	50 - 57	2.4 (Dolomit)	0,3
3619-A	8	49 - 55	1.8 (Dolomit)	0,3
3619-B	9	58 - 66	1.1 (Dolomit)	0,3
3154	3	54 - 61		0,2
3155	3	51 - 58		0,2
3156	4	53 - 60	0.8 (Dolomit)	0,1
3161	6	39 - 44	0.5 (Dolomit)	0,4
3162	6	37 - 42	0.6 (Dolomit)	0,3
3163	7	42 - 47	1.3 (Dolomit)	0,3
3195	8	49 - 55		0,2
3196	8	43 - 49		0,2
3197	7	44 - 50	2.8 (Dolomit)	0,1
3678-A	6	53 - 60	5,0 (Kalzit)	0,3
3678-B	6	53 - 60	4,0 (Kalzit)	0,4
3678-C	6	48 - 54	2,6 (Kalzit)	0,3
3678-D	7	51 - 58	2,7 (Kalzit)	0,3
3709	6	54 - 61	2,1 (Kalzit)	0,3
3709	6	48 - 54	4,9 (Kalzit/Dolomit)	0,2
3709	5	48 - 54	3,6 (Kalzit)	0,3
3709	8	49 - 55	6,1 (Kalzit)	0,8

Auf der Grundlage der Röntgendiagramme kann ein relativ homogener Chloritgehalt angenommen werden, der für alle Proben zwischen 5 bis 20 % liegt. Die höchsten Gehalte mit maximal 20% besitzen dabei die Proben aus dem Schacht 2, Labornummer 3709 (höchstes Niveau am GS II) und 3615-A bis 3615-E (Schacht 3, Schurf 1/1). Mittlere Gehalte besitzen die Proben 3619-A und 3619-B (Schacht 3, Schurf 1/2). Geringe Gehalte von maximal 5 bis 10% sind in den Proben 3154 bis 3156 (Graben) und 3195 bis 3197 (Schacht 1) zu finden. Nennenswerte Gipsgehalte waren in keiner einzigen Probe nachzuweisen. Im wesentlichen gehen die restlichen Mineralkomponenten in allen Proben auf Fe(III)oxide und -hydroxokomplexe (ca. 1 - 8%), insbesondere Hämatit, der allerdings röntgenographisch nicht nachgewiesen wurde, geringe Gehalte an Feldspat und mittlere Gehalte an Quarz (ca. 20 - 40%) zurück.

2.5 Diskussion und Interpretation

2.5.1 Bewertung der Größenordnungen der Spurenelementkonzentrationen

Alle Proben werden zunächst bezüglich ihrer Gehalte interpretiert. Dabei werden die Proben mit 11 weiteren mesozoischen und tertiären nordbayerischen Tonstandards verglichen. Einer dieser Standards ist ein Ton der Lehrberg-Schichten.

Tabelle 3_ Spurenelementgehalte in den untersuchten Tonproben

Element	Gehalte in den untersuchten Proben [ppm]	Gehalte in den Standards [ppm]	Gehalte im Tonstandard der Lehrberg-Schichten
Au (Gold)	0,002 - 0,009	0,002 - 0,004	0,002
Be (Beryllium)	1 - 5	2 - 5	5
B (Bor)	17 - 131	17 - 149	116
V (Vanadin)	36 - 98	82 - 177	82
Cr (Chrom)	27 - 110	53 - 100	75
Co (Cobalt)	5,7 - 17	5,6 - 24,0	12,0
Ni (Nickel)	17 - 60	32 - 87	40
Cu (Kupfer)	4,9 - 20,6	5,2 - 47,5	8,7
Zn (Zink)	65,3 - 246	36,8 - 56900	100
Ge (Germanium)	10	< 10 - 13	13
As (Arsen)	6 - 54	1 - 30	16
Se (Selen)	1	< 1	< 1
Br (Brom)	3,0 - 5,5	1,8 - 4,1	2,4
Mo (Molybdän)	< 2 - 4	2 - 3	< 2
Ag (Silber)	< 0,2 - 0,4	< 0,2 - 0,8	< 0,2
Ce (Cadmium)	< 1	1 - 2	< 1
Sb (Antimon)	0,3 - 1,4	0,3 - 2,5	1,4
Cs (Cäsium)	4,4 - 13,2	6,4 - 32,0	23,1
La (Lanthan)	26,9 - 64,3	20,3 - 52,0	37,7
Ce (Cer)	51 - 123	39 - 98	72
Nd (Neodym)	22 - 52	21 - 43	30
Sm (Samarium)	3,95 - 9,83	3,20 - 7,52	5,74
Eu (Europium)	0,65 - 1,30	0,80 - 1,45	1,19
Tb (Terbium)	0,5 - 1,2	0,4 - 0,9	0,7

Tabelle 3: Spurenelementgehalte in den untersuchten Tonproben

Element	Gehalte in den untersuchten Proben [ppm]	Gehalte in den Standards [ppm]	Gehalte im Tonstandard der Lehrberg-Schichten
Yb (Ytterbium)	1,70 - 3,35	1,12 - 2,93	2,26
Ta (Tantal)	0,5 - 1,4	0,5 - 1,7	1,4
W (Wolfram)	1 - 3	1 - 4	2
Ir (Iridium)	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Pb (Blei)	< 2 - 13	: 2 - 499	39
Th (Thorium)	9,7 - 26,0	5,9 - 16,0	14,0
U (Uran)	2,5 - 4,7	2,1 - 6,6	3,9
TiO ₂	367 - 776	499 - 1220	770
Rb (Rubidium)	111 - 183	110 - 229	219
Sr (Strontium)	67 - 118	74 - 220	220
Y (Yttrium)	25 - 48	20 - 35	31
Nb (Niob)	11 - 158	< 10 - 28	20
Ba (Barium)	436 - 758	361 - 830	530
Sc (Scandium)	4,05 - 14,5	9,40 - 14,4	12,5
Zr (Zirkon)	170 - 304	80 - 244	244

Bei Vergleich der gemessenen Konzentrationen mit geogenen Konzentrationen ist in keinem Fall eine signifikante Auffälligkeit festzustellen. Das Leitelement Bor, ein erster Indikator für Kontaminationen, liegt vollkommen im Bereich geogener Konzentrationen. Ebenso ist anhand der geringen Konzentrationen des hochmobilen Brom, das vermutlich als Bromid vorliegt, zu erkennen, daß die untersuchten Proben kaum mit schadstoffbelasteten Deponiesickerwässern in Berührung gekommen sind. Dies deckt sich mit den Bestimmungen des organischen Kohlenstoffgehaltes. Der organische Kohlenstoffgehalt ist in allen untersuchten Proben ähnlich und in seinem Gesamtgehalt in jeder Probe in völliger Übereinstimmung mit geogenen Konzentrationen. Die Vermutung, daß allein geogene, aber keine anthropogene Ursachen für Schwermetallgehalte festzustellen ist, wird im folgenden anhand von Korrelationsanalysen weiter überprüft.

2.5.2 Korrelationsanalysen

Die lineare Korrelationsanalyse³ geht davon aus, daß die Konzentrationsverhältnisse chemisch sehr ähnlicher Elemente in derselben Schicht immer konstant sind. Darüberhinaus ist auch eine negative lineare Korrelation möglich. Dies bedeutet, daß die Zunahme des einen Elements linear mit der Abnahme des anderen gekoppelt ist. Korrelationsanalysen sind kein Selbstzweck, sondern müssen immer geochemisch interpretiert werden.

Um die grundsätzliche Einsetzbarkeit von Korrelationsanalysen zu überprüfen, werden an den untersuchten Proben die Konzentrationsverhältnisse von den chemisch und geochemisch sehr

³ Zur Korrelation wird die sogenannte lineare Korrelationsanalyse eingesetzt. Bei der linearen Korrelationsanalyse handelt es sich um ein mathematisches Verfahren, bei dem ein Parameter als Funktion eines anderen Parameters ausgedrückt wird. Es wird der Gehalt an Spurenelement in einer Probe bestimmt (y-Wert oder Funktionswert) und gegen den Gehalt einer bestimmten mineralogischen Phase (x-Wert) oder eines anderen Elements aufgetragen. Dies wird für möglichst viele Proben derselben geologischen Schicht getan. Durch die einzelnen Punkte wird algebraisch oder geometrisch eine Best-Gerade gefittet. Je weiter die Punkte von dieser Geraden abweichen, desto näher liegt der berechnete Korrelationskoeffizient bei Null. Von Interesse sind aber solche Korrelationen, deren Korrelationskoeffizient + 1 oder - 1 beträgt. Dann besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Gehalt an einem Spurenelement (y-Wert) und dem x-Wert.

ähnlichen seltenen Erdmetallen, Samarium und Neodym, untersucht. Samarium und Neodym sind zwei Metalle, die unter geochemischen Bedingungen dreiwertig als Nd^{3+} bzw. Sm^{3+} vorliegen. Es ergeben sich folgende Zusammenhänge:

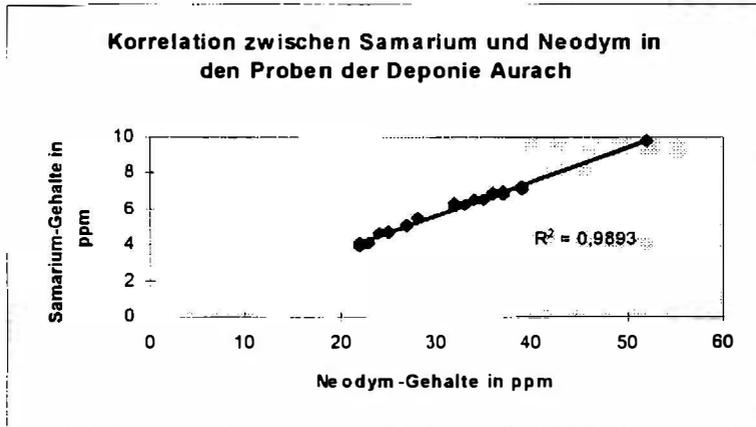


Abb. 4: Korrelation zwischen Samarium und Neodym in den Proben der Deponie Aurach

Für die Korrelation zwischen Samarium und Neodym ergibt sich unter Berücksichtigung aller 24 untersuchten Proben für das Quadrat des Korrelationskoeffizienten⁴ tatsächlich ein Wert von 0.9893. Die geochemische Ähnlichkeit läßt sich für die untersuchten Proben damit durch eine mathematisch lineare Beziehung beschreiben.

2.5.3 Der Zusammenhang zwischen Chrom und Arsen

Die lineare Korrelationsanalyse ergibt für Chrom- und Arsengehalte einen weniger eindeutigen Zusammenhang, wie für Samarium und Neodym. Auffällig ist aber, daß von den untersuchten 24 Proben sich

⁴ Das Quadrat des Korrelationskoeffizienten ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, einen Punkt auf einer Korrelationsgerade anzutreffen. Ein Wert von 0,9893 bezeichnet dabei eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit.

in jeweils denselben Proben der höchste Chrom- und Arsengehalt (Probe 3619 B) bzw. der niedrigste Chrom- und Arsengehalt (Probe 3197) befinden:

Tabelle 4: Spannweite der Chrom- und Arsengehalte

Probe/Entnahmetiefe	Chrom in ppm	Arsen in ppm
3619 B/0,45 - 0,55 m	110	54
3197/0,30 - 0,35 m	27	3

Grundsätzlich bieten sich für obigen Befund zwei Erklärungsmöglichkeiten an. Zum einen könnte unter dem Einfluß anthropogener Sickerwässer der Arsen- und Chromgehalt an einigen Stellen geringfügig erhöht sein. Da aber Chrom und Arsen wegen einer relativ geringen Mobilität in eisenhaltigen Schichten niemals an der Spitze einer Kontaminationsfront eines Multikomponenten-Sickerwassers stehen und die charakteristischen sonstigen Spurenelemente und Leitelemente nur geogene Konzentrationen besitzen, ist ein anthropogener Einfluß auszuschließen. Auch kann das gemeinsame sehr geringe Vorkommen von Chrom und Arsen in der Probe 3197 nur geogen erklärt werden.

Als zweite Erklärungsmöglichkeit bietet sich an, daß Chrom und Arsen in chemisch und geochemisch ähnlicher Form in den hier untersuchten Tonen vorkommen. Chrom liegt in der Erdkruste vor allem als dreiwertiges Chrom vor - als Cr^{3+} . Im schwach alkalischen (karbonatgepufferten) und schwach bis stark oxidierenden Milieu kommt Chrom auch als sechswertiges Chrom vor als Chromat CrO_4^{2-} . Für die chemische Stabilität des Chrom(VI) genügen im schwach alkalischen Milieu bereits Redoxpotentiale um 0,4 V (PERELMAN 1972).

Insbesondere in Tonen mit hohem Fe(III)oxidgehalt kann mit Chromaten gerechnet werden. Zum einen dürfte hier lokal an und in

den Eisenoxiden ein hohes Redoxpotential herrschen, zum anderen wird hier vermutlich auch eine gute Adsorption an die Oberfläche und auch Einbau ins Eisen(III)oxidgitter stattfinden. In den untersuchten Proben ist ein hoher Chromgehalt auch mit hohen Eisengehalten korreliert.

Arsen kommt in der Natur in sehr unterschiedlicher Form vor. Am häufigsten liegt Arsen in sulfidischer oder oxidischer Bindung vor. In oxidischer Bindung findet sich Arsen vor allem als Arsenit (AsO_3^{3-} oder HAsO_3^{2-}) in der Oxidationsstufe +3 oder als Arsenat (AsO_4^{3-} oder HAsO_4^{2-}) in der Oxidationsstufe +5 zusammen mit Eisenoxidmineralien.

Eine Erklärung für die relative Ähnlichkeit von Chrom und Arsen müßte schwach oxidierendes und schwach alkalisches Milieu voraussetzen. Da nahezu alle Proben karbonatgepuffert sind, kann auch für alle Proben schwach-alkalisches Milieu angenommen werden. Hier läge dann Chrom als Chromat und Arsen als Arsenat vor. Beide Spezies sind sich relativ ähnlich. In der Wertigkeitsstufe +3 im sauer-reduzierenden Milieu sind Chrom und Arsen, wie dargestellt, sehr verschieden, da hier Chrom als Kation und Arsen als Anion (Arsenit) gebunden wären. Eine gemeinsame Anreicherung oder Abreicherung, wie beobachtet, wäre dann unwahrscheinlich. Ein längerer Einfluß saurer, reduzierender Sickerwässer in der geogenen wie anthropogenen „Vergangenheit“ ist daher für die Postulierung des Arsenats und Chromats ausgeschlossen⁵

Falls Chrom als Cr(VI) und As(V) als Arsenat vorliegen, müßte das vorhandene Eisen als Fe(III) und zum Teil zumindest in oxidischer Bindungsform vorliegen.

Die Stichhaltigkeit der Argumentation muß anhand der Hauptelemente weiter erläutert werden, da sie ja das Milieu bestimmen.

⁵ Aus dem unabhängigen mikrobiologischen Untersuchungsprogramm wird ein ähnliches Ergebnis erhalten. In der Population der Mikroorganismen überwiegen bis in alle untersuchten Tiefen aerobe Bakterien.

2.5.4 Eisengehalte

Wenn Chrom als Chromat und Arsen als Arsenat vorliegen, muß Eisen als dreiwertiges Eisen, Fe(III), vorliegen. Dreiwertiges Eisen könnte in den untersuchten Proben vor allem in Tonmineralien und als Eisen(III)oxid bzw. -hydroxid gebunden werden.

In den untersuchten Proben befinden sich ca. 40-65% glimmerartige Tonminerale, maximal 20% Chlorit und 0- 10% Smectite. Diese Tonminerale können Eisen(III) binden.

Wenn aber Eisen vor allem oxidisch als Eisen(III)oxid bzw. -hydroxid vorliegt, müssen Cobalt und Eisen vor allem bei geringen Karbonatgehalten wie hier - sehr gut korreliert sein. Denn CoOOH und FeOOH besitzen nahezu identische Ionenradien (PATCHINEELAM 1975). Wenn Eisen dagegen als dreiwertiges Eisen in Tonmineralien gebunden wäre, müßte das Eisen vor allem in den Oktaederlücken sitzen. Das Eisen müßte dann eine ähnlichen Korrelationskoeffizienten zu Cobalt Co^{2+} , Nickel Ni^{2+} und anderen Ionen besitzen, die ebenfalls in den Oktaederlücken sitzen.

Bei Betrachtung der Zusammenhänge an den Proben werden folgende Ergebnisse erhalten:

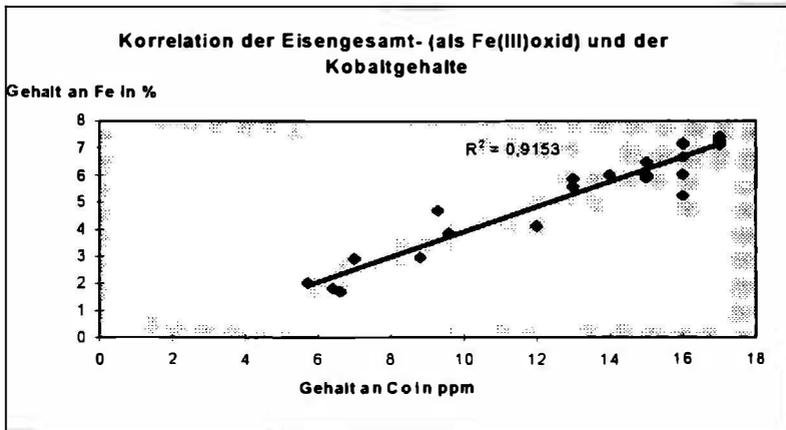


Abb. 5: Korrelation von Eisen und Cobalt

Das Quadrat des Korrelationskoeffizienten zwischen Cobalt und Eisen beträgt 0.9153. Diese sehr deutliche Korrelation läßt vermuten, daß Cobalt wegen des identischen Ionendurchmessers des Hydroxokomplexes in den Eisenhydroxokomplexen gebunden wird. Eisen muß daher vor allem als Fe(III) in oxidischer Bindungsform vorliegen. Die Korrelation zum Nickel, Kupfer und den anderen Ionen ergibt daher erwartungsgemäß wesentlich weniger eindeutige Zusammenhänge.

Dennoch bleibt festzustellen, daß auch eine gewisse Korrelation zwischen den Glimmergehalten und den Eisengehalten existiert.

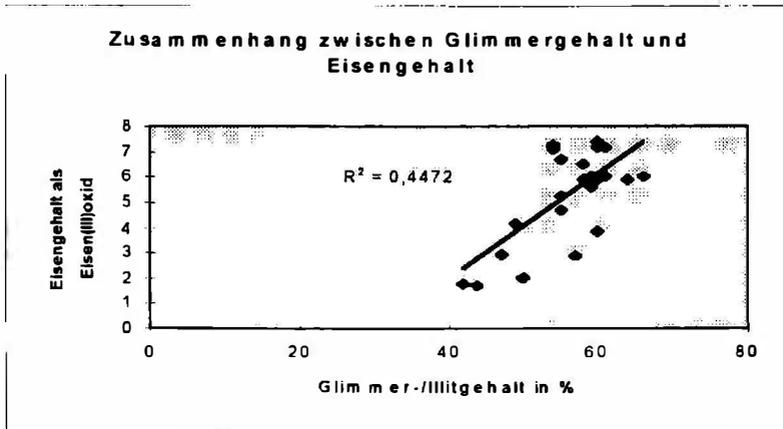


Abb. 6: Korrelation zwischen Glimmer-/Illitgehalt und Eisengehalt

Die Korrelation zwischen den glimmerartigen Tonmineralen und den Eisengehalten ist aber insgesamt nicht sehr deutlich. Die mittelmäßige Korrelation läßt sich dadurch erklären, daß die Eisen(III)hydroxokomplexe als Bindemittel für die Tonminerale wirken. Tonminerale wirken durch ihre hohen spezifischen Oberflächen als Kristallisationskeime für Eisen(III)hydroxokomplexe. Auch ein kolloidaler Transport des Fe(III) wird durch die Anwesenheit der Tonminerale erschwert. Beides führt zur Anreicherung von Eisen(III)hydroxokomplexen, hat aber nichts mit einer Bindung in Oktaederlücken zu tun. Bestärkt wird die Vermutung der Anwesenheit der Eisen(III)hydroxokomplexe durch die zum Teil sehr hohen Eisengehalte. Die Eisengehalte machen in der Gesamtprobe bis zu 7,42% (als Eisen(III)oxid berechnet) aus. Umgerechnet auf den Illit-/Glimmergehalt würden sich bis zu 10% an Gewichtsanteil für Eisen (berechnet als Eisen(III)oxid) in diesen Tonmineralien ergeben. Illite besitzen in der Regel aber maximal 5% Eisen (als Eisen(III)oxid berechnet), Glimmer deutlich weniger. Die erwähnten hohen Eisengehalte können unter den glimmerartigen Tonmineralen nur vom Glaukonit erreicht werden. Da die glimmerartigen Tonminerale der Lehrberger Schichten aber im wesentlichen Illite und keine Glaukonite sind, müssen andere Bindungsformen als die Oktaederlücken der Tonminerale beteiligt

sein. Auch ist der Chloritgehalt zu gering, um die hohen Eisengehalte zu erklären. Darüberhinaus zeigt sich, daß auch Proben mit relativ hohem Chloritgehalt (ca. 20% in der Probe 3615 E) nur relativ geringen Eisengehalt (2.91% als Eisen(III)oxid berechnet in der Probe 3615 E) besitzen. Die Probe 3615 B besitzt mit ähnlichem Chloritgehalt wie die Probe 3615 E einen wesentlich höheren Eisengehalt von 6.02%. Chlorit- und Eisengehalte scheinen in den untersuchten Proben weitgehend unabhängig voneinander zu sein.

Zudem sollte nicht unerwähnt bleiben, daß an einer Standardprobe der Lehrberger Schichten pseudoamorphe Eisen(III)oxide nach MEHRA/JACKSON extrahiert werden konnten. Auch weist die rote Farbe der Tone auf das Vorhandensein der Eisen(III)oxide hin. Darüberhinaus sind die Arsengehalte im wesentlichen nur durch das Vorhandensein von Eisen(III)oxiden erklärbar, wie bereits dargestellt. Als letztes Argument sei angeführt, daß das Fehlen von Pyrit und Siderit bei gleichzeitig relativ hohen Eisengehalten als weiteres Indiz für das Vorliegen von Eisen(III)oxiden gewertet werden kann. Daß ein röntgenographischer Nachweis nicht exakt möglich ist, liegt vermutlich an der geringen Kristallinität der Eisen(III)hydroxokomplexe. Eisen(III)hydroxokomplexe sollten für den röntgenographischen Nachweis in den Proben mit mindestens 10 % vorliegen. Diese Gehalte werden aber in den Proben nicht erreicht.

Insgesamt ergibt sich ein Bild, das die postulierten Milieuverhältnisse aus den Chrom- und Arsenanalysen bestätigt. Die gesamten Proben scheinen schwach oxidierendem Milieu ausgesetzt zu sein, ein Kontakt mit anthropogenen, sauer-reduzierenden d. h. organisch belasteten Sickerwässern kann mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Eisen liegt in dreiwertiger Form zu einem wesentlichen Teil als Fe(III)hydroxokomplex vor.

2.6 Schlußfolgerungen

Nach der Diskussion des Milieus, der oxidischen Bindemittel und der Spurenelemente, sollten kurz die Adsorptionsfähigkeit, chemische Stabilität, bodenmechanische Stabilität und Hinweise über potentielle Kontaminationspfade aus den Hauptelementen erörtert werden.

Besser, als mit den üblichen Korngrößenanalysen, werden die Größe spezifischer Oberflächen mit der Angabe der äußeren Oberfläche nach BRUNAUER, EMMETT & TELLER (1938) und der Gesamtoberfläche nach HEIMERL (1995) beschrieben. Aus der Differenz dieser beiden Größen folgt der Smectitgehalt. Die äußere Oberfläche liegt in den untersuchten Proben durchschnittlich zwischen 30-50 m²/g. Der geringste Wert beträgt 9 m²/g, der höchste 62 m²/g. Dies sind Werte, die für Tone absolut üblich sind, wie Untersuchungen von HEIMERL, KOHLER, BILLINO & SANTL (1994) an Tonen Nordbayerns und der Oberen Süßwassermolasse beweisen. Die Gesamtoberfläche der Proben liegt bei 59-95 m²/g. Diese relativ geringen Gesamtoberflächenwerte weisen auf relativ geringe Smectitgehalte hin, die zwischen 0-10% der Gesamtprobe liegen. Diese Smectite zeigen keine charakteristischen Schichtaufweitungen mit Ethylenglykol, besitzen relativ hohe Schichtladungen und liegen in Wechsellagerungen mit den Illiten vor. Zur Schadstoffbindung ist die innere Oberfläche dieser relativ hochgeladenen Smectite nur begrenzt einsetzbar. Das Schadstoffbindevermögen der Gesamtprobe ist sehr zufriedenstellend, wie die bestimmten Kationenaustauschkapazitäten, die bei 11-22 mval/100g liegen, und die Tonmineralgehalte beweisen. Die Anwesenheit der Kalzite und Dolomite in geringen Gehalten wirkt sich sicherlich positiv auf die Bindung von Schwermetallionen aus. Karbonate führen zu Karbonat- und Hydroxokomplexen, die sehr gut an Tonmineraloberflächen adsorbiert werden. Oxidische Bindemittel können auch Anionen anthropogen Ursprungs fixieren, das Milieu der Porenraumlösungen und die Mineraloberflächen scheinen für eine Schadstoff-Fixierung geradezu ideal. Ein chemischer Angriff der Mineralbestandteile muß nur bei sehr langdauernden und extremen Sickerwasserangriffen anthropogenen Ursprungs befürchtet werden.

Da der Ton Karbonate enthält, die durch saure Sickerwässer eventuell gelöst werden zumindest die Kalzite, ist eine weitere Porenraumverdichtung und Verringerung der Durchlässigkeit durch Karbonatspezies, die in tieferliegende Bereiche migrieren und dort ausfallen, anzunehmen. In diesem Zusammenhang seien auch die Untersuchungen von HEIMERL, KOHLER, BILLINO & SANTL (1994) sowie die Diplomarbeit von SANTL (1995) erwähnt. Die Autoren stellen fest, daß aus Kalzit Schwermetallkarbonate wie Zinkkarbonat beim Migrieren schwermetallbelasteter, saurer Sickerwässer gebildet werden können. Dies bedeutet, daß die Kalzitlösung sofort von einer Fällung begleitet wird. Eine Lösung des Dolomits bzw. eine analoge Umfällung findet viel weniger statt. Insgesamt droht für die geologische Barriere der Deponie „Aurach“ bei ausreichender Mächtigkeit unter der Voraussetzung der Repräsentativität der untersuchten Proben durch Karbonatlösung keine Gefahr.

Insgesamt dürfte das Material wegen seiner geringen organischen Gehalte, wegen seiner relativ geringen Smectitgehalte, die noch dazu in Wechsellagerungen vorliegen, und wegen seiner karbonatischen und oxidischen Bindemittel auch aus bodenmechanischer Sicht bei Vergleich mit anderen Tonen eher günstige Eigenschaften besitzen.

Abschließend sollen noch eine kurze Diskussion der Homogenität und einer eventuell bereits vorhandenen Kontamination gegeben werden: Wie bereits ausführlich erörtert, muß eine Kontamination des untersuchten Probematerials ausgeschlossen werden. Eine letzte Bestätigung dieser Aussage kann anhand des Hauptelements Natrium gegeben werden. Natriumionen werden im Untergrund wenig gebunden und sind mobil. Erhöhte Natriumgehalte sind in allen realen Deponiesickerwässern zu finden. Aber bei Vergleich der 24 untersuchten Proben untereinander ist kein signifikanter Ausreißer zu entdecken. Die Na_2O -Gehalte reichen von 0.20 bis 0.66%. Und dies sind weder von der Höhe noch von der Spannweite her Konzentrationen, die eine Kontamination denkbar erscheinen lassen. Darüberhinaus läßt sich an diesen Werten bereits eine relativ geringe

Heterogenität des Probematerials erkennen. Das Probematerial ist homogen bezüglich seiner kolloidchemischen Eigenschaften, seines mineralogischen Aufbaus wie seiner Elementgehalte. Einzig die Proben 3161, 3162, 3163 und 3197 fallen mit relativ geringen äußeren Oberflächen, Gesamtoberflächen und einer relativ geringen KAK von 11-16 mval/100g etwas aus dem Rahmen. Die Schwankungsbreite ist letzten Endes sehr gering und empfiehlt das Material geradezu als Barriere. Ist doch dieses Kriterium eines der Haupterfordernisse eines sicheren Deponieuntergrundes.

Letztlich zeigen die Untersuchungsergebnisse wie hervorragend Tonbarrieren ihre Funktion erfüllen. Ob als Träger für die schadstoffimmobilisierende Belebtschlammschicht oder als eigene Schadstoffbarriere. Tone weisen in der Summe aus geotechnischen, mineralogischen und kolloidchemischen Eigenschaften vor allem dann hervorragende Eigenschaften auf, wenn Sie nicht monomineralisch sondern eher als entfestigtes Multiphasengemenge vorliegen (vergl. SCHWAIGHOFER, FRÖSCHL & JAROS 1995).

3. Literaturverzeichnis

- BRUNAUER, S., EMMETT, P.H. & E. TELLER (1938): Adsorption of gases in multimolecular layers. J. Am. Chem. Soc. 60, 309-319.
- GARTUNG, E., MÜLLNER, B. & H. HEIMERL (1996): Untersuchungen an der mineralischen Basisabdichtung der Siedlungsabfalldeponie Aurach nach mehr als zehnjährigem Betrieb. In: Seminar Deponien und Altlasten; Kurzfassungen der Seminarvorträge 24. u. 25 Januar 1996, hrsg. von Prof. Dr.-Ing. Wittke, Aachen.
- GARTUNG, E., MÜLLNER, B., HEIMERL, H. & E. E. KOHLER (1996): Die mineralische Basisabdichtung der Siedlungsabfalldeponie Aurach nach mehr als zwölfjährigem Betrieb. In: Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien,

- 1996, 12. Nürnberger Deponieseminar, hrsg. V H. Prühs & B. Müllner, Eigenverlag LGA, S. 321-340.
- HEIMERL, H. (1995): Methodenoptimierung zur Analyse der Schadstoffmobilität in tonigen Deponiedichtungsmaterialien, Diss., Regensburg.
- HEIMERL, H., KOHLER, E. E. & P RADLINGER (1994): Vergleichende geochemische Untersuchungen zur Optimierung anerkannter sedimentpetrographischer und chemischer Verfahren zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, BMFT-Projekt Nr. 1460506 AO Projekt GC 3, Abschlußbericht, unveröffentlicht, Hannover.
- HEIMERL, H., KOHLER, E. E., BILLINO, B. & W SANTL (1994): Die Beschreibung der potentiellen Schadstoffmobilität an Proben der Oberen Süßwassermolasse und Nordbayerns mit Hilfe tonmineralogischer und kolloidchemischer Verfahren. In: Veröffentlichungen der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe 1995, hrsg. v. Prof. Dr. E. E. Kohler, S. 10-19., Regensburg.
- KOHLER, E. E. (1985): Möglichkeiten der Beeinträchtigung der Wirksamkeit mineralischer Deponiebasisabdichtungen durch organische Lösungen, Fortschr. d. Deponietechnik, 15, S. 109-120, Berlin.
- KOHLER, E. E. (1986): Untersuchungen zur mineralogischen Beständigkeit von mineralischen Dichtungsmaterialien in Deponiebasisabdichtungen, Fortschr. d. Deponietechnik, 3, S. 75-88, Berlin.
- KOHLER, E. E. (1995): Tonminerale als "Helfer der Menschheit", Blick in die Wissenschaft Forschungsmagazin der Universität Regensburg, Heft 6, 4. Jg. 1995, S. 18-25.
- KOHLER, E. E. & G. MORTEANI (1984): Bewertung des Tonbarrierenkonzeptes unter besonderer Berücksichtigung der Permeabilität und den chemischen Reaktionen zwischen Tonmineralen und organischen Lösungen, UBA Forschungsbericht Nr. 10203409/02, 163 S., Berlin.

- KOHLER, E. E., EHRLICHER, U. & E. USTRICH (1989): Mineralogische Anforderungen an Tondichtungsschichten zur Minimierung der Durchlässigkeit für organische Schadstoffe in kontaminierten Standorten und Deponien, Forschungsbericht des UBA 10203409/02.
- KOHLER, E. E. & M. MÜLLER-VONMOOS (1993): Geotechnik und Entsorgung. In: Jasmund, K. & G. Lagaly G.(1993): Tonminerale und Tone, Darmstadt.
- KRESS, D. (1994): Sanierung des Sickerwassersammelsystems der Deponie im Dienstfeld, Veröffentl. der LGA, Heft 72, S. 325-330, Nürnberg.
- LGA-GRUNDBAUINSTITUT (1995): Schlußbericht zu Vorhaben E21 des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, Nürnberg, unveröffentlicht.
- MÜLLNER, B. (1995): Geotechnische, biologische und mineralogisch-chemische Untersuchungen an der Basisabdichtung der Deponie „Im Dienstfeld“ Veröffentl. der LGA, Heft 74, S. 93-114, Nürnberg.
- PATCHINEELAM, S. R. (1975): Untersuchungen über die Hauptbindungsarten und die Mobilisierbarkeit von Schwermetallen in fluviatilen Sedimenten, Diss., Heidelberg.
- PERELMAN, A. I. (1972): Geochemie epigenetischer Prozesse, Übersetzung aus dem Russischen, Berlin.
- SANTL, W (1995): Ausgewählte Tone in Nordbayern und ihre Bewertung zur Eignung als Deponieabdichtungsmaterial mit Hilfe mineralogischer und geochemischer Untersuchungen, Dipl.-arbeit, unveröffentlicht, Regensburg.
- SCHNEIDER, G. (1994): Untersuchungen an älteren feinkornmineralischen Dichtungsschichten von Hausmülldeponien in Bayern und sich daraus ergebende Folgerungen für Deponiedichtungen und geologische Barrieren, In: Veröffentl. der LGA, Heft 72, Nürnberg.
- SCHWAIGHOFER, B., KNAAK, B., SOYOYE, H., OTTNER, F., FRÖSCHL, H. & H. W MÜLLER (1994): Langzeitbeständigkeit von Zement-Bentonit-Dichtwandmassen. In: Veröffentlichungen der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe 1995, hrsg. v. Prof. Dr. E. E. Kohler, S. 123-132, Regensburg.

SCHWAIGHOFER, B., FRÖSCHL, H. & M. JAROS (1995): Tone
als geologische Barrieren bei Mülldeponien, hrsg. v.
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft
Wasserwirtschaftskataster, 149 S., Wien.

Autor:
Dr.rer.nat.Dipl.-Chem. Harald Heimerl
Gerhardingerstr. 11
D-93059 Regensburg