

4. Schlußbemerkung

Infolge der in Deponiebasisabdichtungen langsam ablaufenden Prozesse ist ihr Nachvollzug unter Laborbedingungen nur begrenzt möglich. Der zur Verfügung stehende zeitliche Rahmen reicht dabei meist nicht aus.

Durch eine zu kurze Versuchsdauer kann es jedoch zu folgenschweren Fehlinterpretationen des Verhaltens toniger Sedimente in Deponieabdichtungen kommen.

5. Literatur

- Ham, R. et al., 1979: Background Study on the Development of a Standard Leaching Test. United States Environmental Protection Agency (EPA) - 600/2-79-109, Ohio.
- Knaak, B., 1992: Tone als Barrieregesteine bei Mülldeponien; mineralogische und geochemische Untersuchungen an Tonen aus Mannersdorf, Göllersdorf und Hennersdorf. Diplomarbeit, Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Univ. f. Bodenkultur Wien.
- Ottner, F., 1991: Mineralogische und geochemische Untersuchungen an tonigen Barrieregesteinen von Deponieanlagen. Dissertation, Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Univ. f. Bodenkultur Wien.
- Schwaighofer, B., 1991: Geotechnische und geochemische Untersuchungen an mineralischen Basisabdichtungen von Mülldeponien. Wasserwirtschaft - Wasserversorgung - Deponieabdichtung, Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Wien.
- Wagner, J.F., 1992: Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponieabdichtungen. Ein Vergleich von Labor- und Geländestudien. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, H. 22, Karlsruhe.

Immobilisierung und Stabilisierung von Schwermetallen in Rauchgasreinigungsrückständen aus Müllverbrennungsanlagen mit Tonen

Adrian Plüss

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

Seit 1.1.93: Sieber Cassina + Partner AG, Ingenieure Geologen Planer,
Jurastr. 6, CH-4600 Olten.

Zusammenfassung

An zwei verschiedenen Rauchgasreinigungsrückständen (RGRR), einer Elektrofilterasche und einem Rückstand aus der weitergehenden Rauchgasreinigung wurden an ungewaschenem wie auch gewaschenem Rückstand mineralogische und geochemische Untersuchungen gemacht, um die Schwermetallfestphasen zu identifizieren. Mittels Mikrosondenanalysen und Elementverteilungsbildern konnten die Schwermetalle lokalisiert und identifiziert werden. Blei und Zink lagen einerseits an einer Matrix von Aluminosilikatgläsern und andererseits als kleine Partikel in Oxid- oder Hydroxidform vor.

Im weiteren wurde die Immobilisierung der Zink- und Bleiionen mittels Tonmineralien untersucht. Es zeigte sich, daß durch Tonzuschlag zu RGRR ein gutes Retentionsvermögen für Schwermetallionen aufgebaut werden konnte, wobei die Schwermetallionen an die Tonminerale adsorbiert wurden. Die Adsorption war dabei abhängig von der Kationenaustauschkapazität einerseits und der Menge an Tonzuschlag andererseits. Da der Einbau in die Deponie verdichtet erfolgen würde, um die Durchlässigkeit und damit Elution der Schwermetallionen möglichst klein zu halten, wurden auch Elutionsversuche an verdichteten Probekörpern vorgenommen. Die Resultate der Verdichtungseigenschaften zeigten, daß der RGRR nach dem Tonzuschlag optimal verdichtbar war, wobei Unterschiede im Wassergehalt und Trockenraumgewicht zwischen Montigel- und Opalinuston-Zuschlag festzustellen waren. Es konnte auch gezeigt werden, daß RGRR hohe Festigkeiten aufweisen, welche auch durch den Tonzuschlag kaum verschlechtert wurden. Ebenfalls erwies sich der mit Ton vergütete RGRR als wenig verformbar, wobei Unterschiede im Setzungsverhalten zwischen Montigel- und Opalinuston-Zuschlag festzustellen waren. Grundsätzlich kann für die Deponierung von ungewaschenen wie gewaschenen RGRR ausgegangen werden.

Summary

Two different types of fly ash, a filter-dust from an electrostatic precipitator and a fly ash from a flue gas cleaning system produced by the incineration of MSW (municipal solid waste) in Switzerland, both examined as received and after a washing process to leach soluble salts, have been studied by mineralogical and geochemical methods to identify mainly the heavy metal phases. A very good method to identify the heavy metals was developed by using X-ray image analysis techniques in an electron microprobe. X-ray element mapping and image analysis methods have shown that the heavy metals, especially lead, are present as: (1) individual, essentially pure small particles with diameters between 1-10 μm , as (2) pure, small areas within larger, heterogeneous glassy particles with diameters between 30-150 μm , and (3) disseminated in varying amounts within or on the surface of glassy particles and other aggregates. The bulk of the Pb and most of the heavy metals are associated with silicate glasses of varying composition. Semi-quantitative elemental analyses indicate that most of the heavy metals are present as oxides or hydroxides, rather than chlorides, sulfides, or carbonates.

The immobilization of heavy metals such as lead and zinc with different clay minerals was investigated. It has been found by leaching tests, that a clay addition gives a good retention of the heavy metal. The experiments have also shown that generally the higher the clay addition of a given clay to the fly ash, the higher the adsorption of heavy metals. Geotechnical tests were made to investigate the deformation and consolidation, as also the shearing strength of compacted fly ash-clay samples.

1. Einleitung

In der Schweiz werden jährlich ca. 2.8 Millionen t Siedlungsabfälle produziert, wovon rund 80% in Müllverbrennungsanlagen verbrannt und 20% in Deponien gebracht werden (BRUNNER & MÖNCH, 1986). Die aus der Verbrennung anfallenden 80000 Tonnen Rauchgasreinigungsrückstände (RGRR) sollen in Zukunft in Reststoffdeponien abgelagert werden, wobei die Auslaugung wasserlöslicher Chloride und Sulfate und unterschiedliche Mengen an Schwermetallen wie Cadmium, Zink, Blei und Quecksilber nicht mehr umweltbelastend sein sollen.

Die TVA (1991) sieht für die RGRR eine Vorbehandlung wie den Waschprozess vor, bei welchem eine Extraktion der leicht löslichen Bestandteile wie Salze erfolgt, oder die Anwendung von hydraulischen Bindemitteln wie Zement, durch welche die RGRR zu chemisch stabileren Reststoffen behandelt werden (PLÜSS & MADSEN, 1990 AGW, 1991). Die heutige Deponietechnik hat sich am Leitbild der schweizerischen Abfallwirtschaft zu orientieren. Um die gesetzlichen Anforderungen für Reststoffdeponien erfüllen zu können, ist ein System aus

drei Barrieren aufzubauen. Die erste Barriere stellt der einzubringende Abfall selbst dar, welcher so weit zu immobilisieren ist, daß ein Sickerwasser resultiert, welches direkt in ein Oberflächengewässer einleitbar ist. Die zweite Barriere stellt die Basisbarriere dar, welche so zu konfektionieren ist, daß sie für Schadstoffe eine möglichst geringe Durchlässigkeit ($k < 10^{-9}$ m/s) aufweist. Die dritte Barriere bildet der natürliche Untergrund, der mindestens teilweise ähnliche Eigenschaften wie die Basisabdichtung aufweisen soll.

2. Materialien

Als Versuchsmaterialien wurden zwei verschiedene Rauchgasreinigungsrückstände, eine Elektrofilterasche (EFA) aus der Müllverbrennungsanlage Winterthur, sowie ein Quasitrockenrückstand (QTR) aus der Müllverbrennungsanlage Zürich Josefstrasse untersucht. Die Rauchgasreinigungsrückstände wurden im ungewaschenen (frischen) Zustand wie auch im gewaschenen Zustand untersucht, wobei der Waschprozess aus einem Extrahieren von leichtlöslichen Salzen und Sulfaten besteht (ELEKTROWATT & GEBRÜDER SULZER AG, 1988). Die Kennwerte des für die bodenmechanischen Untersuchungen verwendeten RGRR sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Mineralogische und physikalische Daten der verwendeten Tone und Rauchgasreinigungsrückstände; Montigel (M) = Calcium-Bentonit aus Deutschland; Arizona (A) = Calcium-Bentonit aus Arizona, U.S.A.; Pfungen (Pf) = karbonat-reicher Ton aus der Schweiz; Opalit (Op) = kaolinitischer Ton (Opalinuston) aus der Schweiz. Korngrößenverteilungen für Montigel und Opalinuston aus SCHUSTER (1986), für Arizona Clay aus MÜLLER- VONMOOS et al. (1985); QTR(f) = frischer - und QTR(g) = gewaschener Quasitrockenrückstand (n.b. = nicht bestimmt); CEC = Kationenaustauschkapazität.

	Montigel	Opalit	Arizona	Pfungen	QTR frisch QTR(f)	QTR gewaschen QTR(g)
Gew. %	M	Op	A	Pf		
Montmorillonit	66	-	90	10	Portlandit	Portlandit
WL Illit/Montm	n.b.	20	-	-	Quarz	Quarz
Illit	-	15	-	5-10	Syngenit	Calcit
Chlorite	-	10	-	5	Sylvit	Ettringit
Kaolinite	2	10	-	5	Halit	Magnetit
Quarz	8.3	30	10	10-20	Calcit	-
Glimmer	12-15	-	-	-	Anhydrit	-
Feldspat	2-4	-	-	10	Magnetit	-
Karbonate	3.8	10	-	43	-	-
Akzessorien	2-3	5	-	< 5	-	-
organischer Kohlenstoff	0.03	-	-	-	-	-
CEC mmol/100g	62	12	120	10	-	-
BET-Oberfläche m ² /g	72	36	97	17	13	31
Raumgewicht γ _s kN/m ³	27.7	26.6	25.9	27.5	26.5	24.1
Wassergehalt %	17	2.7	n.b.	n.b.	2	80
> 63 μm	8.0	2.0	0.1	n.b.	13.0	14.0
< 20 μm	89.0	89.0	97.0	n.b.	87.0	86.0
< 2 μm	77.5	57.0	88.0	n.b.	15.2	15.1

Für die Elutions- und Adsorptionsversuche an unverdichteten Proben wurden Montigel (Bayern), Opalinuston (Schweiz), Arizona Clay (U.S.A.) und Pfungenerton (Schweiz) verwendet. Die bodenmechanischen Untersuchungen wurden an verdichteten Probekörpern von Montigel wie auch von Opalinuston durchgeführt. Die Mineralogie der verwendeten Tone, sowie deren physikalische Daten sind ebenfalls in Tabelle 1 zusammengestellt.

Beim Montigel handelt es sich um einen natürlichen Calcium-Bentonit (MÜLLER-VONMOOS & KAHR, 1982, 1983). Der Opalinuston stellt einen Verwitterungston dar (SCHUSTER, 1986). Der als brüchige Tonschiefer anstehende Ton wird nach dem Abbau getrocknet, gemahlen und anschließend abgepackt. Beim Arizona Clay handelt es sich um einen Ton, welcher fast ausschließlich aus dem Tonmineral Montmorillonit besteht. Er stammt aus Cheto/Arizona U.S.A.. Neben einem sehr hohen Montmorillonit-Anteil (90 Gew.%) ist wenig Quarz (10 Gew.%) vorhanden. Beim Pfungenerton handelt es sich um einen quartären Ton (Pleistozän).

3. Methoden

Identifikation der Schwermetallfestphasen

Zur Identifikation der Schwermetallfestphasen hat sich die Mikrosondenanalyse mittels Elementverteilungsbilder als sehr nützliche Methode erwiesen. Hierzu wurden die Proben in Araldit eingebettet und polierte Anschliffe angefertigt, mit Kohle bedampft und anschließend in einer Mikrosonde mit Röntgenstrahlen angeregt. Dabei wurden die Schwermetallpartikel zunächst mit Rückstrahlelektronenbildern (BSE-Bilder) lokalisiert (1), anschließend die qualitative Identifikation der Schwermetalle anhand energie- und wellendispersiver Spektroskopie bestimmt (2) und schließlich eine Zusammensetzung der Rauchgasreinigungspartikel anhand der Elementverteilungsbilder mit semiquantitativen Analysen vorgenommen (3). Für eine eingehende Beschreibung der Methodik wird auf PLÜSS & FERRELL (1991) verwiesen.

Adsorptionsverhalten des Zinkions an verschiedene Tone

Um das Auslaugverhalten von Rauchgasreinigungsrückständen (RGRR) und mit Ton gemischten RGRR zu testen, wurden Perkulationszellen (Durchflußzellen) verwendet. Der Vorteil der Perkulationszellen liegt darin, daß das Elutionsmittel die RGRR durchströmt und so das in Deponien mögliche Elutionsverhalten gut simuliert werden kann, wobei die Proben unverdichtet untersucht wurden. Es wurden 8 g unverdichtete RGRR eingebaut. Bei Tonzuschlag wurden Ton und RGRR vorher trocken im Achatmörser im gewünschten Gewichtsverhältnis eingewogen, während 10 Minuten gemischt, und anschließend ebenfalls unverdichtet in die Perkulationszelle eingebaut. Dann wurde mit einem Feststoff-Lösungsverhältnis von 1:10 sieben mal perkoliert. Die Schwermetalleluat wurden mit dem AAS bestimmt. Aus der Differenz der Elution von unvergütetem RGRR zu mit Ton vergütetem RGRR wurde die Adsorption berechnet.

Verdichtung

Die Probenherstellung bestand aus dem Mischvorgang von RGRR, Ton und Wasser, sowie dem Einbau der Mischung in die Versuchszellen. Bei den Verdichtungsversuchen handelt es sich um genormte Versuche der Bodenmechanik (SN 670 330b, 1989), aus denen jeweils die Proctorkurven eines Materials erhalten werden.

Verformung

Die Verformung von QTR-Ton-Mischungen wurde im Oedometer bestimmt. Die Funktionsweise des Oedometers besteht darin, daß die Bodenprobe in einem Zylinder, der seitliche Verformungen verhindert, durch einen Kolben stufenweise belastet wird und, unter Wahrung der Abflußmöglichkeit des Porenwassers durch poröse Filterplatten (beidseitige Drainage), die Verformung der Probe, respektive die Bewegung des Kolbens auf ca. 1/100 mm genau verfolgt

wird. Die RGRR-Ton-Mischungen wurden bei optimaler Proctordichte in den Oedometerring eingebaut. Die Steigerung der Laststufen erfolgte logarithmisch: $\sigma_1 = 4; 12.5; 25; 50; 100; 200; 400$ und 800 kN/m^2 .

Festigkeit

Um die Scherfestigkeit beschreiben zu können, ist ein Bruchkriterium notwendig, mit dessen Hilfe die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen ausgewertet und dargestellt werden können. Als Schergerät wurde ein GEONOR-Ringscherapparat verwendet, welcher durch Rotation einen unbeschränkten Scherweg erlaubt (BISHOP et al., 1971). Die Funktionsweise des Gerätes besteht darin, daß die Probe nach erfolgter Konsolidation drainiert zum Bruch gebracht wird. Der Schervorgang wird dann fortgesetzt, bis die resultierenden Schubspannungen einen konstanten Wert erreichten (MÜLLER-VONMOOS & LOKEN, 1989).

4. Resultate und Diskussion

Charakterisierung der Schwermetallfestphasen

Die Resultate der durchgeführten Untersuchungen können am besten am Beispiel von Blei illustriert werden. Blei war neben Zink eines der am meisten auftretenden Schwermetalle in allen Proben und ist auch von umweltbedeutender Relevanz. Blei konnte in folgenden Partikeln identifiziert werden: (1) als individuelle, vor allem kleine Partikel mit einer Korngröße von $1-10 \mu\text{m}$; (2) als reine kleine Partikel in größeren, sehr heterogen zusammengesetzten Partikeln mit einer Korngröße bis zu $200 \mu\text{m}$; (3) verteilt in unterschiedlichen Mengen innerhalb oder auf der Oberfläche von glasartigen Partikeln oder andern Aggregaten. Bei den Schwermetallfestphasen konnte unterschieden werden zwischen solchen, die an einer Glasmatrix gebunden waren und solchen, welche als individuelle, vor allem kleine Partikel vorhanden waren.

Ein Beispiel (Probe EFA,f) einer Bleiausscheidung innerhalb eines Glaspartikels ist im BSE-Bild (Rückstrahlelektronenbild) der Abbildung 1a) und im Elementverteilungsbild in der Abbildung 1b) dargestellt.

Auf der Photographie ist ein gut gerundetes Partikel sichtbar, welches anhand der unterschiedlichen Bildintensitäten in verschiedene Subregionen mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung unterteilt werden kann. Bei der deutlich sichtbaren dunkelgrauen Zone (A, Abb. 1a) handelt es sich um reines Silizium oder Siliziumoxid (Abb. 1a). Die größte Fläche des Partikels wird durch die hellgraue Farbe dargestellt (B, Abb. 1a), bei welcher es sich um einen Si-, Na-, K-, Ca-, P-, und Zn-reichen Bereich handelt. Phosphor und Zink scheinen vor allem in der oberen Region des Partikels angereichert zu sein. Eisen konnte ebenfalls an einigen kleinen Stellen erkannt werden (Abb. 1b), scheint aber am häufigsten im grau-weißen Bereich bei der Phosphorregion enthalten zu sein (C, Abb. 1b). Der in der Mitte des Partikels auftretende helle

Bereich stellt Blei dar (D). Das Elementverteilungsbild in Abbildung 1b) zeigt zunächst Schwefel und Chlorid in derselben Region wie Blei. Im abgebildeten Glaspartikel scheinen auch einige Hohlräume vorhanden zu sein (dunkle, schwarze Bereiche), welche darauf hindeuten, daß während der Heiz- und Abkühlphase verschiedene kleinere Glaspartikel miteinander verschmolzen wurden. Titan ist ebenfalls vereinzelt vorhanden (Abb. 1b). Innerhalb der Bleizone der Abbildung 1b) wurde eine semi-quantitative energiedispersive Analyse durchgeführt. Dabei wurde für Bleioxid ein Wert von $93.7 \text{ Gew.}\%$ bestimmt. Es konnte kein Chlorid und kein Schwefel gemessen werden. Ebenfalls ist für Blei eine Hydroxidphase möglich, weil der Gewichtsunterschied zwischen der Oxid- und der Hydroxidphase sehr klein ist und mit semi-quantitativer Analyse nicht bestimmt werden kann. Neben den matrix-gebundenen Schwermetallfestphasen konnten auch solche identifiziert werden, welche an keiner Glasphase gebunden vorlagen. Die semi-quantitativen energiedispersiven Messungen dieser Partikel ergaben, daß es sich vorwiegend um Oxide handelt, jedoch auch ein Eisenchloridteilchen bestimmt wurde. Für eine genauere Beschreibung wird auf PLÜSS & FERRELL (1991), sowie PLÜSS (1992) verwiesen.

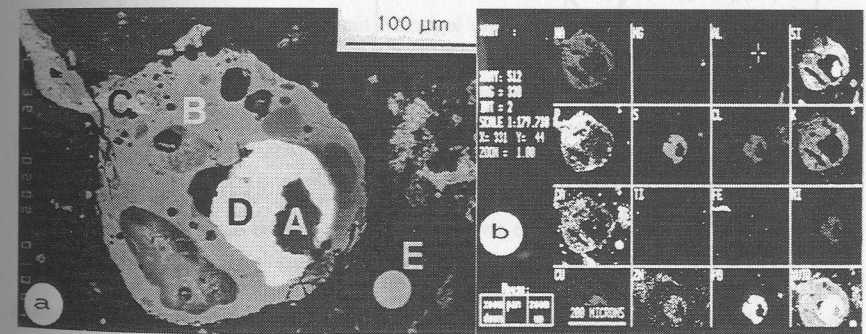


Abb. 1: a) BSE-Bild eines Schwermetallpartikels, welches Blei enthält. Die mit Buchstaben bezeichneten Bereiche sind im Text erklärt. b) Elementverteilungsbild des in Abb. (a) dargestellten RGRR-Partikels. NA (Natrium), MG (Magnesium), AL (Aluminium), SI (Silicium), P (Phosphor), S (Schwefel), CL (Chlorid), K (Kalium), CA (Calcium), TI (Titan), FE (Eisen), NI (Nickel), CU (Kupfer), ZN (Zink), PB (Blei), und XVID (Video Bild).

Adsorption von Zink

Die Adsorption von Zink an die Tone wird einerseits beeinflusst durch die Kationenaustauschkapazität. Bei gleichem Tonzuschlag zeigten die 4 verschiedenen Tone generell mit größerer Kationenaustauschkapazität ein höheres Adsorptionsvermögen, welches für Pfungenerton bei

28%, für Opalinuston bei 28%, für Arizona Clay bei 48% und für Montigel bei 57% lag, wobei diese Werte den gemittelten Wert über 7 Perkolationszyklen darstellen (Abb. 2a). Andererseits spielte die Tonquantität für die Adsorption von Zink eine Rolle. Beim Montigel konnte die Adsorption für Zink mit zunehmendem Tongehalt von 57% über 70% auf 79% gesteigert werden (Abb. 2b).

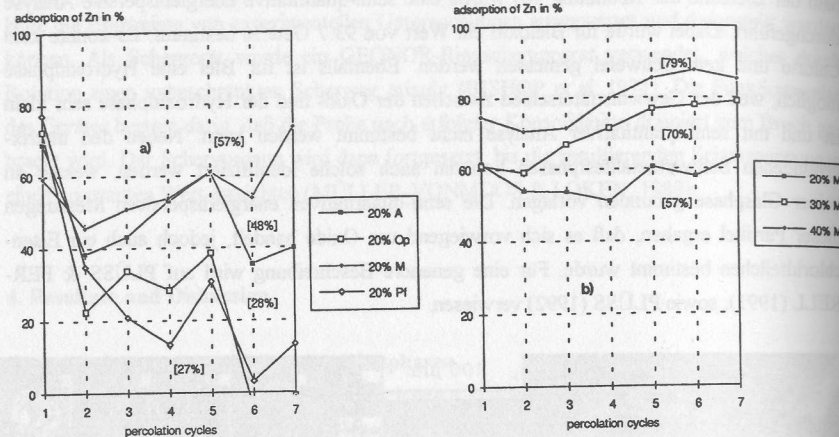


Abb. 2: Adsorption von Zink an a) Arizona Clay, Montigel, Opalinuston und Pfungenerton bei gleicher Tonquantität b) Montigel bei unterschiedlicher Tonquantität, in Funktion der Perkolationszyklen.

Verdichtung

In diesem Kapitel wurde untersucht, inwieweit das Einbringen von Montigel und Opalinuston die Verdichtungseigenschaften der RGR beeinflusst. Abb. 3a) stellt die Proctorkurve von QTR(f) dar, aus welcher ein optimaler Wassergehalt von $w_{opt} = 35\%$ und ein optimales Trockenraumgewicht γ_{dopt} von 10.7 kN/m^3 entnommen werden kann. Bei QTR(g) vergrößert sich w_{opt} auf 97% , während γ_{dopt} auf 7.0 kN/m^3 verkleinert wird. Höhere γ_d können bei größerer Verdichtungsenergie (Modified) erzielt werden. Die gemessenen Durchlässigkeiten liegen für QTR(f) bei $1.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ und für QTR(g) bei $1.5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. Bei Proctor-Modified-Verdichtungsenergie konnten die Durchlässigkeiten bei QTR(f) und QTR(g) um den Faktor 10 verkleinert werden (siehe Abb. 3a).

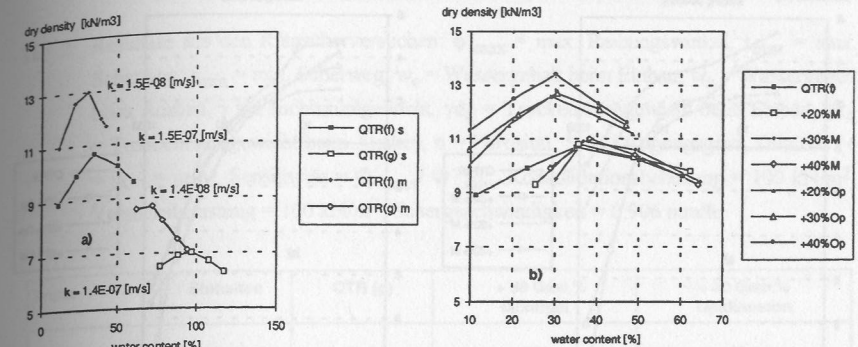


Abb. 3: Proctorkurven für a) QTR (f) zur Ermittlung des optimalen Wassergehalts w_{opt} und optimalen Trockenraumgewichts γ_{dopt} , s = Standard-, und m = modified-Verdichtungsenergie b) QTR (f) nach Tonzuslag.

Die Resultate der Mischungen der mit Montigel und Opalinuston durchgeführten Verdichtungsversuche sind in Abbildung 3b) dargestellt. Während sich beim Montigelzuslag von 20-, über 30-, auf 40 Gew.-%-Zuslag das γ_d kaum erhöhte (von 10.7 kN/m^3 auf 11.1 kN/m^3), nahm dieses bei 20-, über 30-, und zu 40 Gew.-% Opalinustonzuslag deutlich von 10.7 kN/m^3 auf 13.4 kN/m^3 zu. Auch erhöhte sich w_{opt} beim Montigelzuslag leicht von 35% auf 40% , während er beim Opalinustonzuslag von 35% auf 30% leicht erniedrigt wurde. Dieser Sachverhalt ist dadurch zu erklären, daß Montigel etwa denselben optimalen Wassergehalt wie QTR(f) von etwa 35% hatte, während Opalinuston einen tieferen w_{opt} von 17% aufwies.

Verformung

Die Resultate der Oedometerversuche für QTR(f) wie auch für 20-, 30- und 40 Gew.-% Montigel- resp. Opalinustonzuslag sind in Abbildung 4 dargestellt. Wie aus der Kurve in Abbildung 4a) entnommen werden kann, tritt bei QTR(f) bei einer Auflast von 4 kN/m^2 eine Quellung auf, welche ca. 2.6% der Probenhöhe ausmacht. Die Quellung war eine Folge der Gipsbildung. Durch den Montigelzuslag verstärkte sich die Quellung der Probenkörper. So wurde bei 20 Gew.-% Montigelzuslag und einer Auflast von 4 kN/m^2 eine Quellung von 4.2% , bei 30 Gew.-% Montigelzuslag eine solche von 5.2% festgestellt. Die Einbauprobenhöhe wurde bei einer Auflast von 300 kN/m^2 durch Konsolidation wieder erreicht.

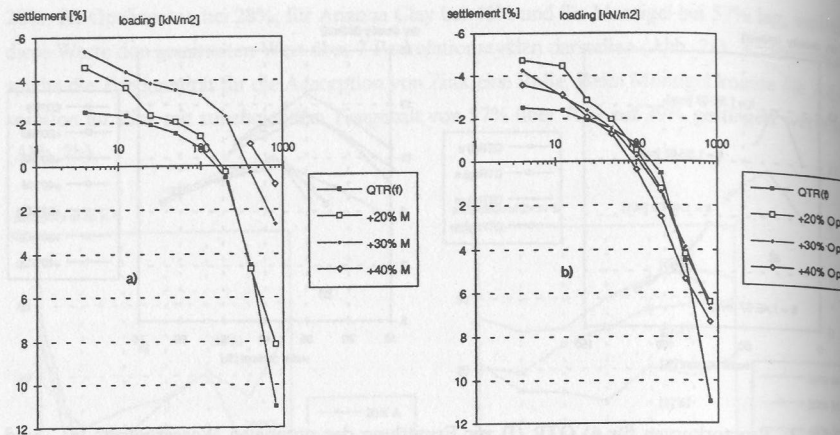


Abb. 4: Verformung (Setzung) von QTR(f), welcher mit a) 20-, 30-, und 40 Gew.% Montigel und b) 20-, 30-, und 40 Gew.% Opalinuston vergütet wurde, in Funktion der Laststufe.

Beim Opalinustonzuschlag zeigte sich bei kleinen Laststufen ein ähnliches Verhalten (Abb. 4b). Die durch den Anhydrit hervorgerufene Quellung wurde durch die Quellung der Tonmineralien noch unterstützt. Im Gegensatz zur Montigel-Mischung erreichte die QTR-Opalinuston-Mischung bei einem 30 Gew.-%-Zuschlag bereits bei 50 kN/m² die Hebung, welche ohne Ton durch den Anhydrit hervorgerufen wurde. Bei höheren Laststufen wurden Setzungen verzeichnet.

Festigkeit

Der Einfluß des Tonzuschlages auf die Scherfestigkeit von RGR wurde an QTR(g) durchgeführt. Dabei wurde untersucht, welche Reibungswinkel nach einem Tonzuschlag von 30 Gew.% Montigel, respektive 30 Gew.% Opalinuston zu QTR zu erwarten sind. Die Resultate aus den Ringscherversuchen an QTR(g), wie an Proben mit 30 Gew.% Montigel, resp. 30 Gew.% Opalinuston, sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Für QTR(g) wurde ein maximaler Reibungswinkel $\phi'_{\max}$ von 43,0° bestimmt. Der minimale Reibungswinkel $\phi'_{\min}$ betrug 40,2°. Der im Gegensatz zum Einbau leicht geringere Wassergehalt nach dem Ausbau der Probe deutet auf Drainage von überschüssigem Wasser hin. Das Trockenraumgewicht nach dem Ausbau betrug $\gamma_{dE} = 6,2 \text{ kN/m}^3$. Für QTR(g) welcher mit 30 Gew.% Montigel vergütet wurde, wurde $\phi'_{\max}$ mit 33,1° und der $\phi'_{\min}$ mit 30,9° bestimmt. Für QTR(g) welcher mit 30 Gew.% Opalinuston vergütet wurde, wurde ein $\phi'_{\max}$ von 39,1° und ein $\phi'_{\min}$ von 34,4° bestimmt.

Tab. 2: Resultate aus den Ringscherversuchen: $\phi'_{\max} = \max.$ Reibungswinkel, $s_{\max} = \max.$ Scherweg, $s_{\min} = \min.$ Scherweg, $w_e =$ Wassergehalt beim Einbau, $w_a =$ Wassergehalt beim Ausbau, $\gamma =$ Feuchtraumgewicht, $\gamma_{dE} =$ Trockenraumgewicht beim Einbau, $\gamma_{dA} =$ Trockenraumgewicht beim Ausbau, $n =$ Porosität, $S_r =$ Sättigungsgrad, Dilatanz (+ = ja, - = nein), Sensitivität = $\Phi'_{\max} / \Phi'_{\min}$. Konsolidationsbelastung = 100 kN/m², Versuchsbelastung = 100 kN/m², Schergeschwindigkeit = 0.906 mm/h.

Probe	Einheiten	QTR (g)	+ 30 Gew.% Montigel	+ 30 Gew.% Opalinuston
$\phi'_{\max}$	[Grad]	43.0	33.1	39.1
$\phi'_{\min}$	[Grad]	40.2	30.9	34.4
$s_{\max}$	[mm]	20.6	8.3	5.8
$s_{\min}$	[mm]	128.1	70.6	64.5
w_e	[%]	108.7	103.1	79.9
w_a	[%]	101.1	92.0	75.5
γ	[kN/m ³]	12.4	12.4	13.1
γ_{dE}	[kN/m ³]	5.9	6.1	7.3
γ_{dA}	[kN/m ³]	6.2	6.5	7.5
n	[%]	75.3	74.8	69.0
S_r	[%]	86.1	83.9	81.6
Dilatanz		+	-	-
Sensitivität		1.09	1.08	1.19

Daß der mit Calciumbentonit vergütete QTR einen kleineren Reibungswinkel als das unvergütete Material erreichte, war infolge des Tonzuschlages und damit Zugabe von Feinanteil zu erwarten. Jedoch liegt der Reibungswinkel immer noch sehr hoch, was dadurch zu erklären ist, daß auch bei 30 Gew.% Bentonitzuschlag noch kein matrixgestütztes Gefüge vorhanden ist, sodaß für die Scherfestigkeit vor allem der Reibungswinkel des Quasitrockenrückstandes die maßgebende Größe darstellt. Die tieferen $\phi'_{\max}$ und $\phi'_{\min}$ im Vergleich zum QTR können dadurch erklärt werden, daß sich während des Schervorganges die Bentonitplättchen besser einregeln ließen, was mit der stärkeren Volumenabnahme erklärt werden kann.

Im Vergleich zum Montigelzuschlag zeigte der mit Opalinuston vergütete QTR(g) einen deutlicheren Abfall von $\phi'_{\max}$ zu $\phi'_{\min}$, was damit zusammenhängen könnte, daß die im Opalinuston vorhandenen Kaolinit- und Illitplättchen infolge der Korn-zu-Korn-Reibung einen deutlicheren Bruchmechanismus hervorriefen, während sich die beim Montigel vorhandenen Montmorillonitplättchen in Fläche zu Fläche anordneten, wodurch eher ein

Gleiten der Teilchen aneinander entstand und damit der Abfall zur Restscherfestigkeit weniger deutlich ausfiel.

Durch die 30 Gew.% Tonzugabe und damit deutliche Verschiebung der Korngröße von der Silt- in die Tonfraktion müßte mit einer sichtbaren Änderung im bodenmechanischen Verhalten gerechnet werden, denn die Tone verhalten sich im Gegensatz zu den RGRR plastisch, wodurch tiefere Scherfestigkeiten zu erwarten sind. Beim 30 Gew.% Opalinuston-, vor allem aber beim 30 Gew.% Montigelzuschlag sind immer noch hohe Reibungswinkel vorhanden, welche zeigen, daß der bodenmechanische Charakter der Proben durch die RGRR-Struktur bestimmt wird.

5. Folgerungen

Die mineralogische Charakterisierung der Schwermetallfestphasen in Rauchgasreinigungsrückständen zeigte, daß diese eine sehr komplexe Zusammensetzung besitzen. Die Schwermetalle liegen in unterschiedlichen Festphasen vor und müssen differenziert betrachtet werden. Da ein Großteil der Schwermetalle an einer glasartigen Matrix gebunden vorlag, ist es naheliegend, daß der Aufbau der Matrix einen nicht unwesentlichen Einfluß auf das Verhalten der Schwermetallauslaugung hat, da mit dem chemisch-physikalischen Verhalten der Matrix auch das Verhalten der Schwermetalle bestimmt wird.

Im weiteren konnte gezeigt werden, daß Tone, welche Rauchgasreinigungsrückständen aus Müllverbrennungsanlagen beigemischt wurden, ein gutes Rückhaltevermögen für eluierende Schwermetalle bewirkten. Es konnte gezeigt werden, daß die Qualität der Sickerwasserkonzentration konfektionierbar ist, wobei Art und Menge eines Tones, sowie die Verdichtungsenergie die wichtigen Parameter darstellen.

Ein großer Vorteil bei der Anwendung dieser Methode liegt in der Anwendbarkeit auf Rauchgasreinigungsrückstände unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung. Gerade dieser Umstand macht bei den Immobilisierungsvarianten "Zement" und "Tieftemperaturverglasung" Schwierigkeiten, da die Rezepturen den sich dauernd ändernden Zusammensetzungen der RGRR angepaßt werden müssen. Bei der "Tonimmobilisierung" spielt dieser Sachverhalt keine große Rolle. Für den Einbau in die Deponie ist allein der optimale Wassergehalt der RGRR-Ton-Mischung zwingend, da bei zu hohen Wassergehalten die Verarbeitbarkeit des Materials zu Schwierigkeiten führt.

6. Literatur

- AGW-Bericht-Auftraggebergemeinschaft für das Projekt IMRA, 1991: Immobilisierung von Rauchgasreinigungsrückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen. Schlußbericht, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Walchetur, Zürich, 365 pp..
- Brunner, P.H., Mönch, H., 1986: The Flux of Metals through MSW Incineration. *Waste Man. and Res.*, **4**, 105-119.
- Bishop, A.W., Green, G.E. Garga, V.K. Andersen, A., Brown, J.D., 1971: A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Géotech.*, **21**, 273-328.
- Elektrowatt & Gebrüder Sulzer AG, 1988: Aufbereitung und Verfestigung von Rückständen der Rauchgasreinigung aus Kehrichtverbrennungsanlagen, Interner Bericht, Winterthur, Switzerland, 162pp..
- Müller-Vonmoos, M., Loken, T., 1989: The shearing behaviour of clays. *Applied Clay Science*, **4**, 125-141.
- Müller-Vonmoos, M. Honold, P., Kahr, G., 1985: Das Scherverhalten reiner Tone. *Mitt. Inst. Grundbau Bodenmechanik, ETH Zürich*, Nr. 128.
- Müller-Vonmoos, M., Kahr, G., 1982: Bereitstellung von Bentoniten für Laboruntersuchungen. Nagra NTB 82-04, *Mitt. Inst. Grundbau Bodenmechanik, ETH Zürich*, 1982.
- Plüss, A., Ferrell, Jr., R.E., 1991: Characterization of Lead and Other Heavy Metals in Fly Ash from Municipal Waste Incinerators. *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, Vol. **8**, Nr. 4, 275-292.
- Plüss, A., Madsen, F.T., 1990: Die Verfestigung und Immobilisierung von Rauchgasreinigungsrückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen auf der Basis von Zement-Literaturstudie. *Mitt. Inst. Grundbau Bodenmechanik, ETH Zürich*, Nr. 138.
- Plüss, A., 1992: Charakterisierung von Rauchgasreinigungsrückständen aus Kehrichtverbrennungsanlagen und deren Immobilisierung mit Tonmineralien. *Diss.*, Nr. 9824, *ETH Zürich*.
- Schuster, P., 1986: Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von Silt-Sand-Mischungen, die mit quellfähigem Ton vergütet wurden. *Mitt. Inst. Grundbau Bodenmechanik, ETH Zürich*, Nr. 131.
- SN 670 330 b, 1989: Schweizer Norm: Verdichtung nach AASHO. *Vereinigung schweizerischer Straßenfachleute*, Nov. 1989.
- TVA, 1991: Technische Verordnung über Abfälle. 10. Dezember 1990, Herausgegeben vom Eidgenössischen Departement des Innern.