

8. LITERATUR

- BMFT-Abschlußbericht (1988): Teilvorhaben Nr.1: 1/440385 A3
"Vertikale Ausbreitung von Grund- und Sickerwässern im Deponiebereich Georgswerder" (in Vorbereitung).
- BRUNS, J. (1986): Tektonik und Geotechnik des Glimmertons im Hamburger Raum.- Diss. Univ. Hamburg, 126 p., 53 fig., Hamburg.
- BUSSE, R.; KADNER, M.R.; KAUSCH, F. & WÜSTENHAGEN, K. (1985): Geotechnische Untersuchungen im Bereich der Mülldeponie Georgswerder.- Ber. 5. Nat. Tag. Ing.-Geol., 33-43, 1 Abb., 1 Tab.; Kiel.
- GEYH, M.A. & MICHEL, G. (1982): Isotopical differentiation of groundwater of different hydrogeological origin.- J. Hydrology, 59, 161-171; Amsterdam.
- HINTZE, B. (1985): Geochemie umweltrelevanter Schwermetalle in den vorindustriellen Schlickablagerungen des Elbe-Unterlaufes.- Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 2.

TONMINERALOGISCHE, CHEMISCHE UND BODENPHYSIKALISCHE VERÄNDERUNGEN IN EINER TON-VERSUCHSFLÄCHE AN DER BASIS DER DEPONIE GELDERN-PONT

Clay Mineralogical, Chemical and Physical Changes in a Basal Clay Liner Test Area of the Geldern-Pont Waste Deposit

W. ECHLE¹, M. CEVRIM¹, H. DÜLLMANN²

¹Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre
der RWTH Aachen

Wüllnerstr. 2, 5100 Aachen

²Geotechnisches Büro Dr.-Ing. H. Düllmann
Höfchensweg 12a, 5100 Aachen

KURZFASSUNG

Untersuchungen an der Basisabdichtung einer Ton-Versuchsfläche auf der Deponie Geldern-Pont zeigen nach 8-jährigem Betrieb tiefenabhängige Veränderungen des Stoffbestandes in der oberen Hälfte der Tonbarriere: Unter Sickerwassereinfluß erfolgte eine deutliche Reduzierung des ursprünglich hohen Smectitanteils infolge Bildung von Wechsellagerungen und durch Illitisierung, sowie eine partielle Auflösung des karbonatischen Bindemittels. Diese hydrochemischen und mineralogischen Stoffumsätze bewirken eine signifikante Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften der Dichtung.

ABSTRACT

In the compacted basal clay liner of the test field of waste deposit Geldern-Pont mineralogical and chemical changes depending on depth took place in the upper half of the clay barrier during 8 years of operation: Caused by leachate percolation the formerly high smectite content has decreased by formation of mixed layers and by illitisation. The carbonate cement is partially dissolved also. These hydrochemical and mineralogical reactions aroused significant changing of the geotechnical properties in the upper part of the compacted clay liner.

1. EINLEITUNG

Beim Bau der Zentraldeponie Geldern-Pont durch den Kreis Kleve (Niederrhein) in den Jahren 1977/78 wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens "Vergleichende Untersuchungen über das Langzeitverhalten von Basisabdichtungen unter praxisbezogenen Bedingungen" 10 Versuchsfelder von je 50 x 20 m mit verschiedenem Abdichtungsmaterial angelegt. Nach Herstellung der Versuchsfelder erfolgte die Überschüttung mit Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen analog zur übrigen Deponie. Die Kontrolldränagen zeigten bald starken Wasseranfall, der bei allen Feldern nur sehr langsam abnahm. Die Abflussmengen waren von Feld zu Feld sehr unterschiedlich, insgesamt jedoch gering im Verhältnis zu den Wassermengen der Hauptdränagen. Da die Ursachen trotz umfangreicher Modellversuche und theoretischer Überlegungen nicht eindeutig geklärt werden konnten, wurden 1986, also nach 8-jährigem Betrieb, 4 Testflächen freigelegt. Damit konnte das Gesamtsystem dieser Versuchsfelder untersucht werden.

Die Schadensanalyse der Versuchsfelder mit mineralischen Basisabdichtungen - "Bergematerialfeld" und "Tonfeld" - wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft (MURL) des Landes NRW vom Geotechnischen Büro

Dr. Düllmann, Aachen durchgeführt. Die mineralogischen, speziell tonmineralogischen und chemischen Untersuchungen an der Basisabdichtung im Tonfeld erfolgten am Institut für Mineralogie und Lagerstättenlehre der RWTH Aachen. Über die Ergebnisse wird im Folgenden berichtet.

2. UNTERSUCHUNGSMATERIAL

Die 60 cm starke Basisabdichtung des Tonfeldes der Deponie Geldern-Pont wurde zweilagig aus Reuver Ton aufgebracht (Abb. 1). Im Randwallbereich nimmt die Mächtigkeit kontinuierlich ab.

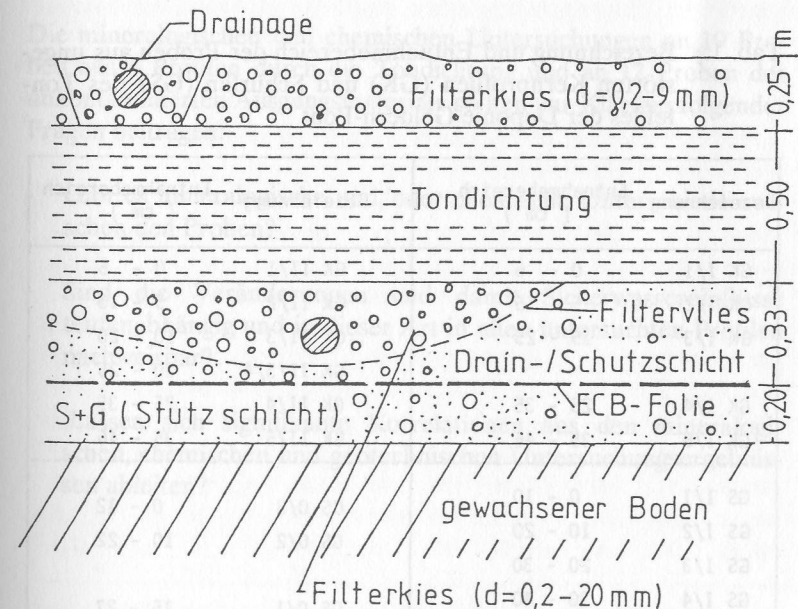


Abb. 1: Aufbau der mineralischen Basisabdichtung im Tonfeld der Deponie Geldern-Pont

Die für die mineralogisch-geochemischen und geotechnischen Untersuchungen nach 8-jährigem Deponiebetrieb 1986 entnommenen Tonproben (Tab. 1) stammen aus 2 Schürfen (GS I und GS 0) und 2 Kernprofilen (GK I und GK II). Sie erfassen jeweils die gesamte Mächtigkeit der zweilagigen Tondichtung.

Der für die Basisabdichtung des Versuchsfeldes Geldern-Pont verwendete pliozäne Reuverton wird in mehreren Tongruben in der Niederrheinischen Bucht gewonnen. Es handelt sich dabei um einen schwach sandigen schluffigen Ton mit wechselnden Humus- und Braunkohlebeimengungen.

In der Tongrube Genholt bei Brüggen wurden dem Reuverton in einer Gesamtmächtigkeit von etwa 2,5 m 12 Proben entnommen und als unkontaminiertes Ausgangsmaterial in die mineralogisch-geochemischen Untersuchungen einbezogen.

Tab. 1: Bezeichnung und Entnahmebereich der Proben aus ungestörten Kernprofilen (GK) und Schürfen (GS) des Tonfeldes der Deponie Geldern-Pont

Bezeichnung	Entnahmebereich (cm)	Bezeichnung	Entnahmebereich (cm)
GK I/1	0 - 5	GK II/1	0 - 5
GK I/2	5 - 15	GK II/2	5 - 10
GK I/3	15 - 25	GK II/3	10 - 20
		GK II/3/4	20 - 25
GK I/4	25 - 35	GK II/4	25 - 35
GK I/5	35 - 46	GK II/5	35 - 46
GS I/1	0 - 10	GS 0/3	0 - 12
GS I/2	10 - 20	GS 0/2	10 - 22
GS I/3	20 - 30		
GS I/4	30 - 40	GS 0/1	15 - 27
GS I/5	40 - 50		

3. UNTERSUCHUNGSMETHODIK UND ZIELE

Nach Trocknung bei 40° und Dispergierung (ohne Entfernung des möglichen Bindemittels) wurde die Kornverteilung durch kombinierte Sieb- und Sedimentationsanalyse ermittelt.

Der Mineralbestand wurde auf röntgenographischem Wege bestimmt (SIEMENS K 810, D 500, $\text{Cu}_{K\alpha}$ -Strahlung). Dabei wurden Gesamtproben und vornehmlich die Feinschluff- und Tonfraktionen untersucht. Die Texturpräparate der Kornfraktionen $< 0,6 \mu\text{m}$ ϕ sind in unbehandeltem und glykolisiertem Zustand sowie nach unterschiedlicher Kationenbelegung (Mg^{2+} , K^+) und auch nach Erhitzung geröntgt worden. Die chemische Zusammensetzung (Haupt- und Spurenelemente) wurde quantitativ mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (PHILLIPS PW 1400) ermittelt.

Die mineralogischen und chemischen Untersuchungen an 19 Proben aus 4 Profilen durch die Tondichtung und an 12 Proben des unkontaminierten Ausgangsmaterials sollten zur Klärung folgender Fragen beitragen:

- Gibt es mineralogische und/oder chemische Unterschiede zwischen den Proben?
- Sind die Veränderungen und damit Sickerwassereinflüsse teufenabhängig und in dieser Art in allen untersuchten Profilen nachweisbar?
- Lassen sich signifikante Korrelationen aus den mineralogischen, chemischen und geotechnischen Untersuchungsergebnissen ableiten?

4. ERGEBNISSE

4.1 Mineralbestand der Tonproben

Gesamtproben

Die Untersuchungen der Gesamtproben zeigen am Beispiel der Schurfprofile GS I und GS 0, daß der eingebaute Ton zu etwa einem Drittel aus Quarz und zu zwei Dritteln aus Schichtsilikaten, vornehmlich Tonmineralen besteht (Tab. 2). Daneben sind meist geringe Anteile an Feldspäten und Karbonaten vorhanden.

Ausnahmen bilden zwei der drei unter einer Dichtungsbahn im Randwallbereich entnommenen Proben von Schurf GS 0 mit deutlichem Sideritgehalt (GS 02) bzw. leicht erhöhtem Quarzanteil (GS 03). Die Tonproben aus Schurf GS I zeigen bei fast konstanten Quarz- und Chloritgehalten schon deutliche Hinweise auf sukzessive Veränderungen des Mineralspektrums im Profilverlauf.

Tab. 2: Röntgenographisch ermittelter Mineralbestand der Tonproben aus den Schurfprofilen GS 0 und GS I der Deponie Geldern-Pont

Probe	Q	KF	P	C	S/I	K	Sm	WL	A	Sd	pH
GS 03	45	<5	+	10	20	10	<5	<5	<5	<5	6,4
GS 02	30	<5	+	10	20	15	5	+		15	7,0
GS 01	35	<5	+	15	25	15	5	+	+	+	6,7
GS I1	35	<5	+	10	25	15	5	5	+		7,4
GS I2	30	+	5	15	20	10	10	<5	<5	5	7,7
GS I3	35	5	+	15	20	10	10	+	<5	<5	7,5
GS I4	30	<5	<5	15	20	5-10	15	+	5	+	7,5
GS I5	35	5	+	15	25	5	15	+	+		7,1

Q = Quarz
 KF = Kalifeldspat
 P = Plagioklas
 C = Chlorit
 S/I = Sericit/Illit
 K = Kaolinit
 Sm = Smectit
 WL = Wechsellagerungen (unregelmäßig)
 A = Ankerit
 Sd = Siderit
 + = sehr wenig

Feinschluff- und Tonfraktionen

Die Kornfraktion < 6 µm φ zeichnet sich durch erwartete niedrigere Quarzgehalte (etwa 20%) und entsprechend erhöhte Tonmineralanteile aus (Tab. 3). Da in diesem Korngrößenbereich nur geringe

Tab. 3: Röntgenographisch ermittelter Mineralbestand der Fraktion 6,3 - 0 µm φ in Proben der Kern- (GK) und Schurfprofile (GS) aus der Deponie Geldern-Pont

Probe	Q	F	Sm	ML	Ch	I	K	A/D	Sd
GK I/1	25	+	+	15	10	30	20		(+)
2	20	+	5	15	10	25	20		(+)
3	15-20	+	30	5	10	20	15	+	+
4	20	+	20	5	10	25	20	(+)	(+)
5	25	+	30	5	10	15	15	(+)	(+)
GK II/1	20	+	+	15	10	30	20		
2	15-20	+	5	15	10	20	20		(+)
3	25	+	20	5	10	20-25	20	?(+)	(+)
3/4	15-20	+	20	5	15	15-20	20	?(+)	+
4	25	+	30-35	+	10	15-20	15	+	+
5	25	+	30	+	10	15-20	15	(+)	?(+)
GS 0/3	20-25	+	5	5	10	35	20	?	?
2	25	+	10	+	10	30	15	(+)	+
1	20	5	15	+	15	25	15	?	(+)
GS I/1	20-25	+	5	15	10	30	20		
2	20	+	20	5	15	20	15	?	(+)
3	20	5	25	+	10	20	15	(+)	(+)
4	20	+	30	+	10	20-25	15	(+)	(+)
5	20	+	30	+	10	25	10	(+)	(+)

Q = Quarz
 F = Feldspat
 Sm = Smectit
 ML = Mixed Layers (unregelmäßig)
 Ch = Chlorit
 I = Illit
 K = Kaolinit
 A/D = Ankerit/Dolomit
 Sd = Siderit
 + = sehr wenig
 (+) = Spur
 ? = vermutet

Mengen Siderit vorliegen, können auch die Proben von Schurf GS 0 mit den übrigen Proben verglichen werden. Auffällig ist in allen Profilen ein gleichartiger teufenabhängiger Wechsel im Tonmineralspektrum, der insbesondere im Illit-, Smectit- und Mixed Layer-Gehalt zu erkennen ist (Abb. 2). Diese Entwicklung ist am stärksten in den Feinfraktionen ausgeprägt und wird dort beschrieben. Die nach oben deutlich abnehmenden Karbonatphasen sind hauptsächlich Ankerit und Siderit. In einigen Proben aus GS I lassen die Röntgendaten auch das Vorkommen von Mg-Fe-Calcit vermuten.

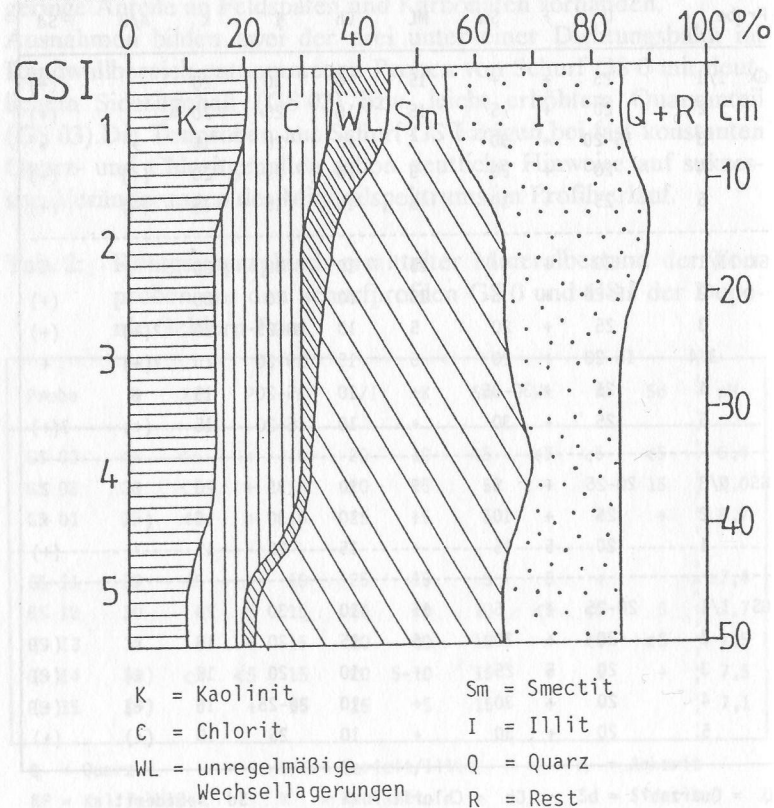


Abb. 2: Teufenabhängige Änderung des Mineralbestandes in der Tonfraktion der Schurfproben GSI aus der Deponie Geldern-Pont

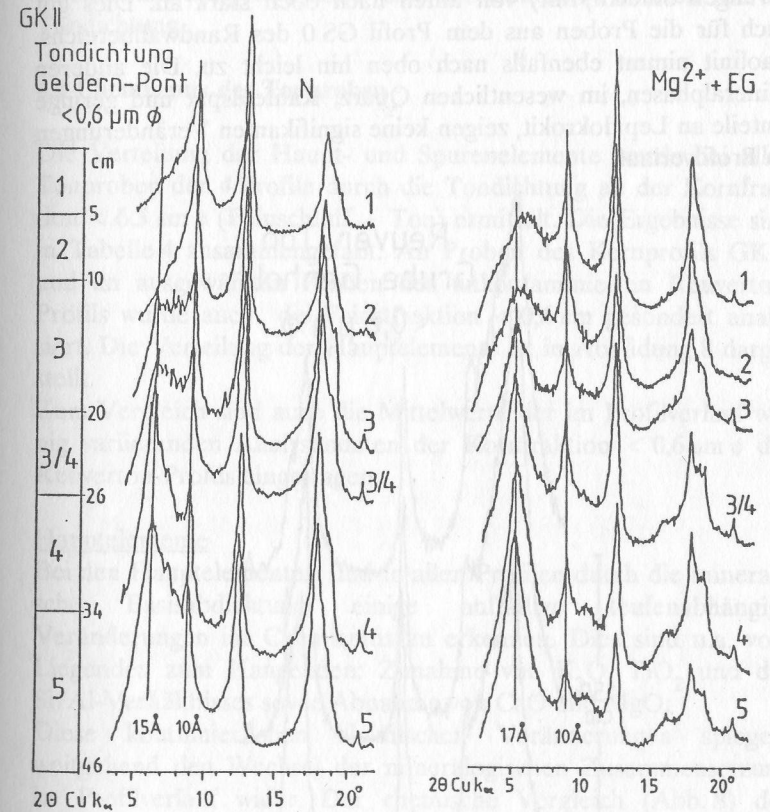


Abb. 3: Röntgendiffraktogramme der Fraktion $<0,6 \mu\text{m}$ am Beispiel des Kernprofils GK II durch die Tondichtung der Deponie Geldern-Pont. N: Naturzustand; Mg^{2+} + EG: Vorbehandlung mit Mg^{2+} und Ethylenglykol

Mittel- und Feintonfraktion

Am deutlichsten sind die teufenabhängigen tonmineralogischen Veränderungen in der Feinstfraktion ($<0,6 \mu\text{m } \phi$) ausgeprägt (Abb. 3). Auf Kosten der Smectitanteile steigen die Gehalte an Illit und auch an Mixed Layers (vorwiegend unregelmäßige Wechsellaagerungen Smectit/Illit) von unten nach oben stark an. Dies gilt auch für die Proben aus dem Profil GS 0 des Randwallbereichs. Kaolinit nimmt ebenfalls nach oben hin leicht zu. Die anderen Mineralphasen, im wesentlichen Quarz, Kalifeldspat und geringe Anteile an Lepidokrokit, zeigen keine signifikanten Veränderungen im Profilverlauf.

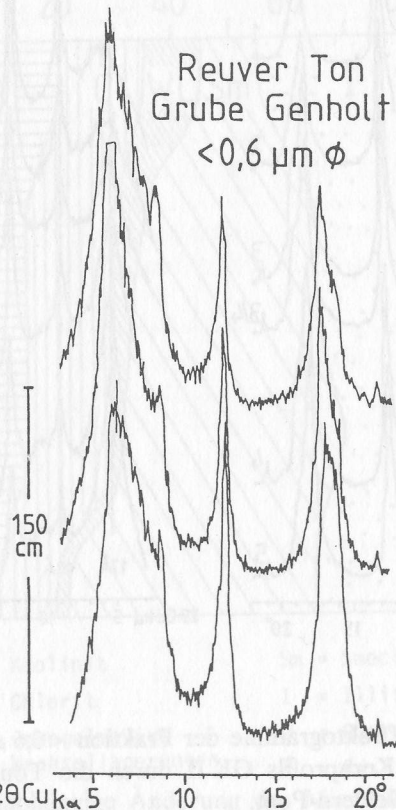


Abb. 4: Röntgendiffraktogramme der Fraktion $<0,6 \mu\text{m } \phi$ ausgewählter Proben des Reuverton - Profils in Genholt

Die ebenfalls an der Feinstfraktion durchgeführten röntgenographischen Untersuchungen an der Probenserie GH aus dem Anstehenden der Reuverton-Grube Genholt zeigen eine relativ konstante tonmineralogische Zusammensetzung dieses Ausgangsmaterials (Abb. 4). Es besteht zu etwa je einem Drittel aus Smectit, Illit und Kaolinit und entspricht damit dem unbeeinflussten unteren Teil der Tondichtung.

4.2 Chemismus der Tonproben

Die Verteilung der Haupt- und Spurenelemente wurde bei allen Tonproben der 4 Profile durch die Tondichtung an der Kornfraktion $< 6,3 \mu\text{m } \phi$ (Feinschluff + Ton) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefaßt. An Proben des Kernprofils GK II und an ausgewählten Proben des unkontaminierten Reuverton-Profiles wurde auch die Feinstfraktion $< 0,6 \mu\text{m } \phi$ gesondert analysiert. Die Verteilung der Hauptelemente ist in Abbildung 8 dargestellt.

Zum Vergleich sind auch die Mittelwerte der im Profilverlauf wenig variierenden Analysendaten der Kornfraktion $< 0,6 \mu\text{m } \phi$ des Reuverton-Profiles eingetragen.

Hauptelemente

Bei den Hauptelementen sind in allen Profilen durch die mineralische Basisabdichtung einige auffällige teufenabhängige Veränderungen im Chemismus zu erkennen. Dies sind u.a. vom Liegenden zum Hangenden: Zunahme von K_2O , TiO_2 und des Si/Al-Verhältnisses sowie Abnahme von CaO und MgO.

Diese kontinuierlichen chemischen Veränderungen spiegeln weitgehend den Wechsel der mineralogischen Zusammensetzung im Profilverlauf wider. Der chemische Vergleich (Abb. 8) der Kornfraktionen $< 0,6 \mu\text{m } \phi$ von Proben aus Profil GK II und dem Ausgangsmaterial (Genholt) zeigt u.a., daß die Zunahme von K_2O von 2,7 auf 3,5% und die Abnahme von CaO von 1,5 auf 0,7% deponiebedingt sein müssen. In allen Profilen durch die Tondichtung weisen daher die unteren Bereiche recht große chemische Ähnlichkeit mit dem Ausgangsmaterial auf. Eine vergleichende Diskussion erfolgt im Kapitel 5.

Tab. 4: Chemische Zusammensetzung der Korngrößenfraktion <6,3 µm φ von Proben der untersuchten Profile durch die tonige Basisabichtung der Deponie Geldern-Pont

a: Hauptelemente (Gew.-%)														b: Spurenelemente (ppm)									
Probe	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^x	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	GV	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Ba	V	Cr					
GK I/1	54.57	1.11	23.05	5.34	.04	.82	1.68	3.31	.08	10.4	38	108	25	61	27	414	242	130					
2	56.12	1.10	23.32	4.59	.03	.64	1.64	3.22	.07	9.8	25	112	31	65	31	428	222	121					
3	55.42	.77	21.03	6.47	.06	1.42	2.51	2.81	.08	8.5	18	105	22	62	27	327	133	114					
4	55.72	.90	22.02	6.01	.05	1.03	2.17	2.94	.09	9.2	20	103	18	66	26	352	134	121					
5	55.84	.79	21.82	5.84	.04	1.30	2.40	2.76	.06	8.4	13	117	21	68	27	360	136	124					
GK II/1	54.54	1.08	22.88	4.89	.04	.86	1.67	3.26	.07	10.7	19	102	4	57	26	349	134	111					
2	54.37	1.10	23.46	4.90	.04	.57	1.58	3.20	.08	10.6	29	129	28	71	32	421	234	125					
3	55.18	.89	22.31	5.75	.05	.98	2.22	2.94	.08	9.6	34	117	35	68	22	329	210	124					
3/4	56.03	.87	21.44	6.24	.07	1.03	2.12	2.78	.08	9.4	19	93	11	57	26	311	128	113					
4	54.98	.79	21.25	6.14	.06	1.34	2.31	2.76	.08	8.9	20	105	21	70	27	340	128	116					
5	55.77	.81	22.09	4.73	.03	1.15	2.23	2.73	.06	8.4	22	118	25	94	31	324	126	112					
GS 0/3	58.56	1.24	24.38	3.67	.05	.60	1.44	3.39	.07	6.3	27	188	22	58	22	488	147	125					
2	59.19	1.31	21.77	4.74	.08	.59	1.50	3.22	.08	7.6	18	148	31	61	31	523	130	117					
1	54.76	.97	22.64	5.31	.04	1.02	1.82	2.92	.07	10.5	30	120	36	72	26	420	144	131					
GS I/1	58.09	.91	21.29	5.38	.05	.78	2.24	3.17	.07	8.15	29	126	46	76	26	449	153	125					
2	57.78	.76	20.27	6.37	.06	1.23	2.37	2.78	.08	8.14	42	133	45	69	23	358	124	119					
3	63.03	.80	18.54	4.11	.02	1.10	1.89	2.49	.08	8.14	34	470	48	90	27	347	112	106					
4	58.57	.80	22.30	4.80	.03	1.13	2.21	2.67	.07	7.34	50	570	45	106	27	347	134	134					
5	60.11	.79	21.23	4.75	.03	1.05	2.35	2.93	.07	6.72	20	108	31	72	22	360	132	119					

GV = Glühverlust

x = Gesamtisen

Na: nicht nachgewiesen

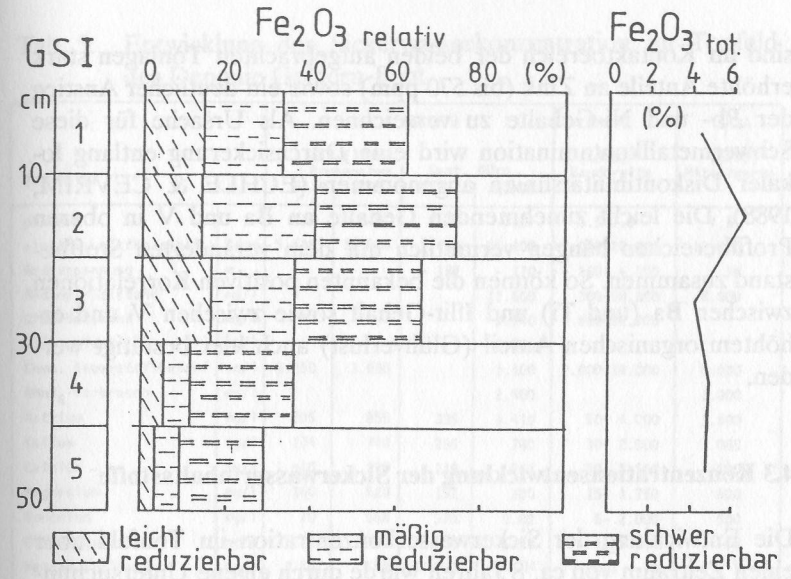


Abb. 5: Gesamtgehalte und relative Verteilung nach sequentieller Extraktion (ECHLE & CEVRIM, 1987; modifiziert nach SHUMAN; 1985) der leicht-, mäßig- und schwerreduzierbaren Anteile von Eisen in der Kornfraktion <6,3 µm φ von Tonproben des Profils GS I aus der Deponie Geldern-Pont.

Auch die Eisengehalte zeigen eine tiefenabhängige Entwicklung, die vermutlich durch Lösungs- und Verlagerungsprozesse gesteuert wird. So kann die leichte Abnahme an der Oberkante durch Auswaschung von Ankerit oder Siderit bedingt sein. Das dadurch oder durch Reduktion an der Deponiebasis freigesetzte Eisen wird zunehmend in die Tiefe verlagert. Die für das Profil GS I in Abbildung 5 dargestellte Verteilung der leicht- bis schwerreduzierbaren Fe-Anteile verdeutlicht den Einfluß dieser Stoffumsätze in der oberen Hälfte der Tondichtung.

Spurenelemente

Die analysierten Spurenelemente liegen in den untersuchten Fraktionen der Profile im Bereich "normaler" Tone. Nur im Profil GS I

sind im Kontaktbereich der beiden aufgetragenen Tonlagen stark erhöhte Anteile an Zink (bis 570 ppm) sowie ein deutlicher Anstieg der Pb- und Ni-Gehalte zu verzeichnen. Als Ursache für diese Schwermetallkontamination wird eine Durchsickerung entlang lokaler Diskontinuitätslinien angenommen (ECHLE & CEVRIM, 1988). Die leicht zunehmenden Gehalte an Ba und V in oberen Profilvereichen hängen vermutlich mit dem veränderten Stoffbestand zusammen. So können die bekannten positiven Korrelationen zwischen Ba (und Ti) und Illit-Gehalt sowie zwischen V und erhöhtem organischen Anteil (Glühverlust) auch hier bestätigt werden.

4.3 Konzentrationsentwicklung der Sickerwasserinhaltsstoffe

Die Entwicklung der Sickerwasserkonzentration im Tonfeld über einen Zeitraum von ca. 8 Jahren wurde durch eigene Untersuchungen (Analysen 6/82 und 12/86) und mit Analysen der "Abfallbeseitigungsgesellschaft Ruhrgebiet" (AGR; 1985) verfolgt. Die Daten sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Zum Vergleich sind auch die von EHRIG (1980) bzw. der "Länderarbeitsgemeinschaft Abfall" (LAGA; 1985) angegebenen Bereiche der Sickerwasserparameter für Hausmülldeponien mit aufgeführt.

Der pH-Wert, ein Parameter für die im Deponiekörper ablaufenden Abbauvorgänge (BAUMANN, 1985), sinkt nach Schüttbeginn durch saure Gärungsprozesse auf etwa pH 6. Damit verbunden ist die Zunahme der organischen Belastung (CSB) auf Werte bis ca. 3600 mg/l, eine Anreicherung von Ammonium sowie verstärkte Löslichkeit von Schwermetallen. Die Gehalte der gelösten Alkali- und Erdalkali-Ionen steigen innerhalb der ersten beiden Betriebsjahre von wenigen mg/l bis auf Werte von über 800 mg/l an, wobei die Konzentrationserhöhung bei Na^+ und K^+ am auffälligsten ist. Bei den Anionen ist eine starke Zunahme der Chloride, Sulfate und Hydrogenkarbonate zu verzeichnen. Als Folge dieser Auslaugungsprozesse nimmt die Leitfähigkeit des Sickerwassers stark zu.

Tab. 5: Entwicklung der Sickerwasserkonzentration im Tonfeld der Deponie Geldern-Pont

Parameter		Tonfeld				EHRIG	LAGA
		AGR (1985) Probenahme		Geot. Büro		(1980) Bandbreite	(1985) Mittelwerte
		5/79	5/81	6/82	12/86		
pH-Wert	1	6.4	8.0	8.2	7.8	3.5-9.0	7.5
elektr. Leitfähigkeit	S/cm	5.620	10.500	7.450	11.100	2.000-20.000	10.000
Redoxspannung	m			+ 132	- 170	- 100- + 200	- 50
Abdampfdruckstand	mg/l				11.600	300-50.000	8.000
Glührückstand	mg/l				9.540	800-20.000	
Glühverlust	mg/l				2.060		
Chem. Sauerstoffbedarf	mg/l	3.250	3.580		1.100	2.800-19.000	5.000
KMnO_4 -Verbrauch	mg/l				2.400		1.000
Natrium	mg/l	205	855	335	1.410	50- 4.000	1.500
Kalium	mg/l	174	740	269	780	10- 2.500	1.000
Calcium	mg/l	1.010	350	249	561	20- 2.500	200
Magnesium	mg/l	140	520	152	300	15- 1.250	600
Ammonium	mg/l	70	568	570	0.02	6- 2.000	500
Eisen (gelöst)	mg/l	21	90	10	1.20	1- 1.000	50
Mangan (gelöst)	mg/l	24	68	0.3	0.04	1 - 70	3
Anorg. geb. Stickstoff	mg/l				5.5		
Nitrat	mg/l	N:101	N:643	9	24	0 - 50	3
Nitrit	mg/l			0.05	0.05		0.5
Hydrogencarbonat	mg/l			3.367	3.620		1.100
Carbonat	mg/l				0.5		
Chlorid	mg/l	333	1.642	1.095	2.290	100- 5.000	2.000
Sulfat	mg/l	63	482		505	50- 2.500	300
Blei	$\mu\text{g/l}$				41	20- 1.000	50
Arsen	$\mu\text{g/l}$	11	18		19	0.1- 1.000	20
Chrom (gesamt)	$\mu\text{g/l}$	40	120		27	20- 1.500	200
Kupfer	$\mu\text{g/l}$	160	150		48	10- 1.000	50
Zink	$\mu\text{g/l}$	650	1.100		239	10-10.000	1.000
Cadmium	$\mu\text{g/l}$				14.7	1-1- 100	5
Quecksilber	$\mu\text{g/l}$				0.5	0.2- 50	10
Nickel	$\mu\text{g/l}$	680	230		306	20- 2.000	200

In den anschließenden Phasen der Methangärung (nach 5/81) sinkt mit Abbau der Fettsäuren die organische Belastung. Dies verursacht pH-Anstieg und Stabilisierung auf etwa pH 8. Die Alkali-Konzentrationen liegen 1986 relativ hoch (800 und 1400 mg/l). Bei Erdalkalien und insbesondere bei Eisen-, Mangan- und Ammoniumgehalten sind deutliche Abnahmen zu verzeichnen. Die Konzentrationen der Schwermetalle liegen in der Regel unter 50 $\mu\text{g/l}$;

halte auf. Das hohe Konzentrationsniveau der sauren Gärung wird bei den Chloriden, Sulfaten und Hydrogenkarbonaten in der Methanphase beibehalten bzw. noch deutlich angehoben.

4.4. Bodenphysikalische Klassifikation der Tonproben

Die an Proben mehrerer Profile durch die Tondichtung ermittelte Korngrößenzusammensetzung weist nach 8-jähriger Sickerwasserbeaufschlagung keine signifikanten Veränderungen auf (Abb. 6). Eine erwartete teufenabhängige Variation des Wassergehaltes ist ebenfalls nicht nachzuweisen. Gleiches gilt für den Sättigungsgrad und die Porenzahl.

Bezüglich der Grenzwassergehalte ist dagegen eine deutliche Abnahme der Fließgrenze und der Plastizität im oberen Bereich der Tondichtung festzustellen. Dadurch sind auch die aus diesen Kenn-

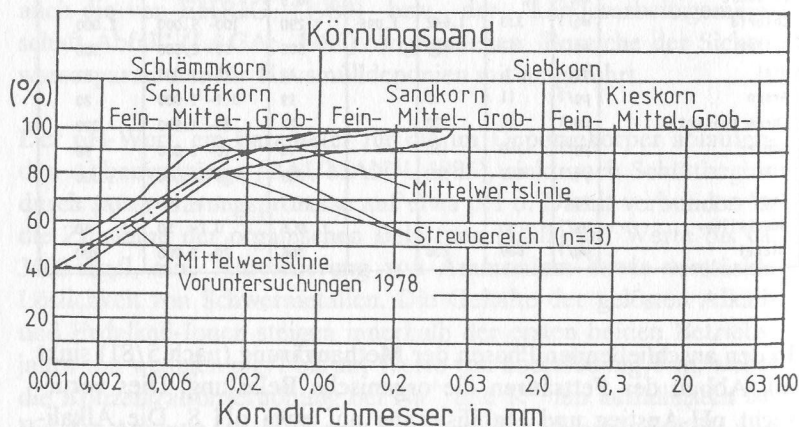


Abb. 6: Kornverteilungsband von Tonfeld-Proben der Deponie Geldern-Pont

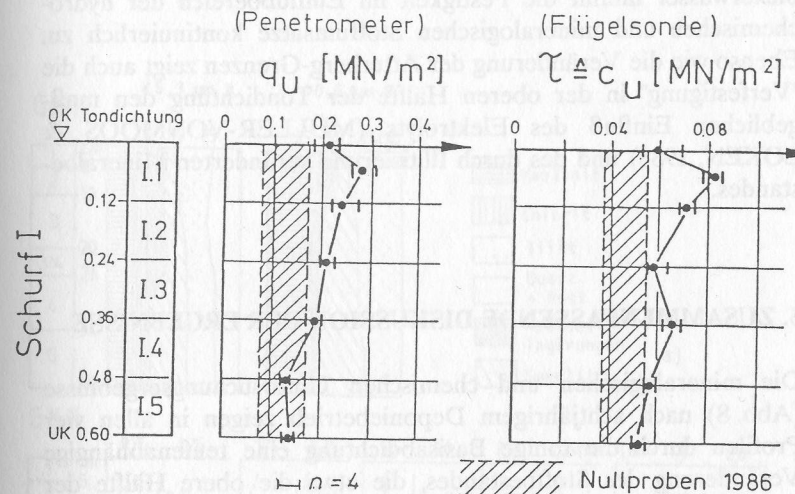


Abb. 7: Verteilung der einaxialen Druckfestigkeit und der undrained Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe am Beispiel eines Schurfprofils (GS I) durch die Tondichtung der Deponie Geldern-Pont.

größen ableitbaren Konsistenzzahlen in der oberen Profilhälfte deutlich größer als die des unteren Profilabschnitts.

Diese signifikanten Veränderungen zeigen die ausgeprägte Abhängigkeit der Atterberg-Grenzen von der mineralogischen Zusammensetzung des Tons und von der veränderten Kationenbelegung der Tonminerale an. Auch die stärkere Abnahme der Fließgrenze, bei geringer Veränderung der Ausrollgrenze, kann auf das erhöhte Illit/Smectit-Verhältnis (LAGALY, 1988) zurückgeführt werden.

Der sich bereits in den Konsistenzzahlen andeutende Trend wird durch systematische Festigkeitsuntersuchungen mittels Penetrometer und Flügelsonde bestätigt (Abb. 7). Im unteren Profilabschnitt liegen die Festigkeitseigenschaften noch im Streubereich der Nullproben. Abgesehen von einer nur 1-2 cm starken, aufgeweichten Zone an der Dichtungsoberkante in direktem Kontakt zum

Sickerwasser nimmt die Festigkeit im Einflußbereich der hydrochemischen und mineralogischen Stoffumsätze kontinuierlich zu. Ebenso wie die Veränderung der Atterberg-Grenzen zeigt auch die "Verfestigung" in der oberen Hälfte der Tondichtung den maßgeblichen Einfluß des Elektrolyts (MÜLLER-VONMOOS & LOKEN, 1988) und des durch Illitisierung veränderten Mineralbestandes.

5. ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die mineralogischen und chemischen Untersuchungsergebnisse (Abb. 8) nach achtjährigem Deponiebetrieb zeigen in allen vier Profilen durch die tonige Basisabdichtung eine teufenabhängige Veränderung des Stoffbestandes, die etwa die obere Hälfte der Tonbarriere erfaßt. Dies wird besonders im Tonmineralspektrum der Feinkornfraktionen durch Abnahme der ursprünglichen hohen Smectitanteile infolge der Umwandlung in Mixed Layers und schließlich Illit verdeutlicht.

Die gleichen tonmineralogischen Veränderungen sind auch in dem 27 cm mächtigen Profil GS 0 im Randwallbereich trotz einer Abdeck-Dichtungsbahn nachzuweisen. Sie haben auch hier etwa mittlere Teufen erreicht und dokumentieren eine laterale Penetration unter der Dichtungsbahn. Die Untersuchungen an der Probenserie GH, die in Ermangelung von "Null-Proben" aus der Einbauzeit aus dem Anstehenden der Reuverton-Grube Genholt bei Brügglen entnommen wurde, zeigen dagegen einen relativ konstanten Tonmineralbestand im Feinstkornbereich mit durchgehend hohem Smectitanteil von etwa 30% und geringer Variation des Chemismus. Das Tonmineralspektrum dieser unkontaminierten Proben ist also in den unteren Teilen der Basisabdichtung noch erhalten.

Die wesentlichen mineralogischen und chemischen Veränderungen sind in Abbildung 8 zusammenfassend dargestellt.

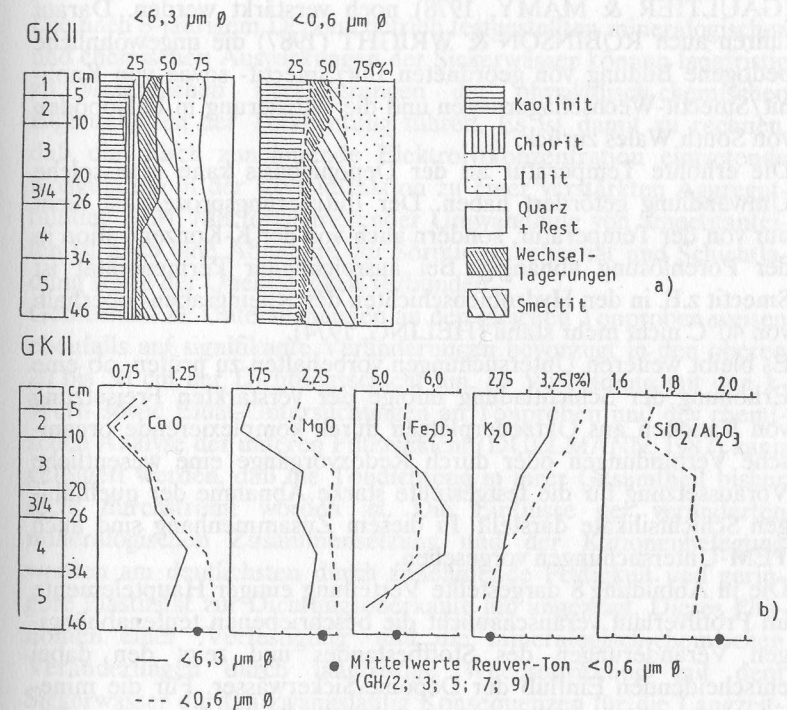


Abb. 8: Mineralbestand und chemische Daten in den Fraktionen $< 6,3 \mu\text{m} \phi$ und $< 0,6 \mu\text{m} \phi$ der Probenserie des Kernprofils GK II durch die Tondichtung der Deponie Geldern-Pont.

Im Bereich der Deponiebasis ist eine verstärkte K+Na-Belegung der Smectite, Mixed Layer-Bildung und schließlich Illitisierung der primären Smectitanteile festzustellen. Diese von der Oberkante der Tonabdichtung bis etwa 20-25 cm Tiefe in abnehmender Intensität nachweisbaren Umwandlungen resultieren mit großer Wahrscheinlichkeit aus dem hohen Alkali-Angebot der Deponie-Sickerwässer (Tab. 5). Die aus landwirtschaftlich genutzten Böden

mit Kalium-Düngung bekannte Bildung von Wechsellagerungen mit hohem nicht austauschbaren K-Anteil und schließlich Illitisierung kann bei periodischem Wechsel von Naß- und Trockenphasen (GAULTIER & MAMY, 1978) noch verstärkt werden. Darauf führen auch ROBINSON & WRIGHT (1987) die ungewöhnliche pedogene Bildung von geordneten Illit/Smectit- sowie von Kaolinit/Smectit-Wechsellagerungen und die Illitisierung in Paläoböden von South Wales zurück.

Die erhöhte Temperatur an der Deponiebasis kann eine solche Umwandlung gefördert haben. Der Illitisierungsprozess ist nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der K-Konzentration in der Porenlösung abhängig. Bei ausreichender Permeabilität ist Smectit z.B. in den Hydrobienschichten des Rheingrabens oberhalb von 40°C nicht mehr stabil (HELING, 1974).

Es bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten zu prüfen, ob eine Erhöhung der Schichtladung infolge der verstärkten Freisetzung von Kationen aus Oktaederplätzen durch komplexierende organische Verbindungen oder durch Redoxvorgänge eine wesentliche Voraussetzung für die festgestellte starke Abnahme der quellfähigen Schichtsilikate darstellt. In diesem Zusammenhang sind auch TEM-Untersuchungen vorgesehen.

Die in Abbildung 8 dargestellte Verteilung einiger Hauptelemente im Profilverlauf veranschaulicht die beschriebenen teufenabhängigen Veränderungen des Stoffbestandes und zeigt den dabei entscheidenden Einfluß der Deponie-Sickerwässer. Für die mineralogischen Umwandlungsvorgänge stellt die in der sauren Gärungsphase verstärkte Auswaschung von austauschbarem Mg und insbesondere Ca aus Smectit eine ebenso wichtige Voraussetzung dar wie die K-Zufuhr durch die Sickerwässer. Diese Milieubedingungen könnten auch für die leichte Zunahme von Kaolinit und möglicherweise von Chlorit nahe der Dichtungsoberkante verantwortlich sein. Das bei der Illitisierung unter Al-Verbrauch freiwerdende Silikagel wird möglicherweise mit den später basischen Sickerwässern nach unten verlagert. Dafür spricht die vorliegende signifikante Abnahme des $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnisses in den oberen Profiltellen.

Das Verhalten von Fe wird durch Lösungs- und redox-abhängige Verlagerungsvorgänge unter Sickerwassereinfluß gesteuert. Die

Anteile der leicht- und mäßigreduzierbaren Fe-Oxide (vgl. Abb. 5) stellen ein Maß für solche Umsetzungsprozesse dar.

Die nach 8-jährigem Deponiebetrieb festgestellten mineralogischen und chemischen Auswirkungen der Sickerwässer können langfristig zu wesentlichen Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Tondichtung führen. Es ist damit zu rechnen, daß die durch zunehmende Elektrolytkonzentration eintretende Koagulation in der Kolloidfraktion zu einer verstärkten Aggregatbildung führt. Mit fortschreitender Umwandlung von Smectitanteilen ist auch eine Abnahme der Sorptionskapazität und Schichtladung sowie der Quelfähigkeit verbunden.

Geotechnische Untersuchungen an den gleichen Tonproben weisen ebenfalls auf signifikante Veränderungen bevorzugt in den oberen 20 bis 30 cm der Dichtungsschicht hin. In Verbindung mit den k-Wert- sowie Eluat-Untersuchungen an Tonproben und der chemischen Analyse der unteren Filterschicht (DÜLLMANN, 1987) kann gefolgert werden, daß die Tondichtung in ihrer Gesamtheit bisher nicht durchströmt worden ist. Die Einflüsse der veränderten mineralogischen Zusammensetzung und der Kationenbelegung werden am deutlichsten durch zunehmende Festigkeit und geringere Plastizität zur Dichtungsoberkante hin angezeigt. Dieses Phänomen einer "Verfestigung" und die mineralogisch-chemischen Veränderungen durch langfristige Wechselwirkung mit dem Sickerwasser dürften zwangsläufig Konsequenzen für die Langzeitbeurteilung von Tonen als Dichtungsmaterial haben.

6. LITERATUR

- AGR Abfallbeseitigungsgesellschaft Ruhrgebiet (1985): Vergleichende Untersuchungen über das Langzeitverhalten von Deponiebasisabdichtungen unter praxisbezogenen Bedingungen.- Abschlußbericht (unveröffentlicht).
- BAUMANN, W. (1987): Minimierung und langfristige Abschätzung von Sickerwasserimmissionen aus Hausmülldeponien.- Dortmund (Borgmann).
- DÜLLMANN, H. (1987): Schadensanalyse mineralischer Deponiebasisabdichtungen (Versuchsfelder 1 und 2 der Deponie Geldern-Pont) - Abschlußbericht (unveröffentlicht).- F+E-Vorhaben im Auftrag des MURL/NW.
- ECHLE, W. & CEVRIM, M. (1987): Mineralbestand als Kontrollfaktor der Bindungsformen und Mobilität von Blei, Zink und Cadmium in kontaminierten Böden.- DFG-Abschlußbericht Ec72/2 (unveröffentlicht).
- ECHLE, W. & CEVRIM, M. (1988): Mineralogische und chemische Veränderungen in der Basisabdichtung des Tonfeldes der Deponie Geldern-Pont.- Abschlußbericht (unveröffentlicht).
- EHRIG, H.-J. (1980): Beitrag zum qualitativen und quantitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien.- Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, TU Braunschweig, 26.
- GAULTIER, J.P. & MAMY, J. (1978): Evolution of exchange properties and crystallographic characteristics of biogenic K-Ca-Montmorillonite submitted to alternate wetting and drying.- *Develop. Sed.*, 27, 167-175.
- HELING, D. (1974): Diagenetic alteration of smectite in argillaceous sediments of Rhinegraben (SW Germany).- *Sedimentology*, 21, 463-472.
- LAGA Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1985): Informationsschrift Sickerwasser aus Hausmüll- und Schlackendeponien, 10.
- LAGALY, G. (1988): Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen.- *Mitt. d. Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich*, 133, 7-22.
- MÜLLER-VONMOOS, M. & LOKEN, T. (1988): Das Scherverhalten der Tone.- *Mitt. d. Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich*, 133, 23-37.
- ROBINSON, P. & WRIGHT, V.P. (1987): Ordered illite-smectite and kaolinite-smectite: pedogenic minerals in a Lower Carboniferous paleosol sequence, South Wales.- *Clay Minerals*, 22, 109-118.
- SHUMAN, L.M. (1985): Fractionation method for soil microelements.- *Soil Sci.*, 140, 11-22.