

Abfallroostaschen – ist die bodenmechanische Klassifizierung sinnvoll?

Bottom Ashes from Municipal Solid Waste Incineration – does Soilmechanical Classification make Sense?

Elfriede Ott, Bundesanstalt fuer Wasserbau, Hamburg
Hans-Georg Kempfert, Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel

ZUSAMMENFASSUNG: Abfallroostaschen werden üblicherweise in erdstatischen Berechnungen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften wie Böden ähnlicher Erscheinungsform behandelt. Intensive Reihemuntersuchungen zur Klassifizierung, zur Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften und der Durchlässigkeit haben gezeigt, dass die bodenmechanischen Kenntnisse nicht uneingeschränkt auf Abfallroostaschen übertragen werden können. Abfallroostaschen liegen in einem relativ engen Körnungsband und können als sandiger Kies eingestuft werden. Ihre Festigkeits- und Verformungseigenschaften entwickeln sich jedoch sehr stark zeitabhängig, in großen Bandbreiten schwankend und können in Laborversuchen nur schwer bzw. nicht reproduziert werden. Dieses Verhalten ist auf chemisch mineralogische Um- und Neubildungsprozesse zurückzuführen, die in Abhängigkeit von verfügbarem Wasser zeitabhängig ablaufen. Die herkömmlichen Klassifikationskriterien sind demnach nicht ausreichend, um zutreffende Prognosen zu erstellen und müssen um chemisch-mineralogischen Aspekte ergänzt werden.

ABSTRACT: Regarding their mechanical parameters bottom ashes from municipal solid waste incineration are treated like soils with similar classification characteristics in earthstatic computations. Intensive investigation on classification, strength- and deformation behavior and permeability showed that the soil-mechanical procedure is not fully transferable to MSW bottom ashes. The grain size distribution lies within a narrow range and the MSW bottom ashes can be classified as sandy gravel. Their strength and deformation characteristics were found to be highly depending on time, they varied within a large range and were hardly reproduceable in laboratory tests. This behavior is due to the chemical-mineralogical composition and the high potential of forming new crystals and materials with time and availability of water. The conventional classification criteria are therefore not sufficient to give reliable prognoses and should be supplemented with chemical-mineralogical aspects be.

1 Einführung

In Deutschland wird derzeit ein erheblicher Anteil an Siedlungsabfällen verbrannt, bevor er verwertet oder deponiert wird. Überwiegend wird der Abfall in Rostfeuerungsanlagen mit einer Abkühlung des Verbrennungsgutes im Wasserbad verbrannt. Schon bei der Bezeichnung des Verbrennungsgutes am Rost der Verbrennungsanlage bestehen Unterschiede in der Terminologie und auf eine einheitliche Bezeichnung konnte sich bislang nicht geeinigt werden. Dieser Beitrag bezeichnet die Rostrückstände aus der Verbrennung von Siedlungsabfall als Abfallroostaschen, eine Definition erfolgte in (Ott, 2001). Verwertungsmöglichkeiten bestehen hauptsächlich im Unterbau

von Straßen, ansonsten werden sie deponiert und stellen damit Massenkörper dar, deren mechanisches Verhalten prognostizierbar sein muss.

Hinsichtlich der umweltrelevanten Stoffeigenschaften im Kurzzeit- und Langzeitverhalten wurden vielfältige Forschungsprogramme durchgeführt und für jede heute betriebene Müllverbrennungsanlage gibt es Monitoringprogramme. Zu den mechanischen Eigenschaften und ihrer Langzeitentwicklung wurden hier systematische Untersuchungen durchgeführt. Es wurden die bodenmechanischen Klassifikationsuntersuchungen, die Charakterisierung des Materials und die Beobachtung von Festigkeits- und Verformungseigenschaften an 6 Abfallrostaaschen (A bis E) über den Zeitraum von einem Jahr untersucht.

2 Klassifizierung von Abfallrostaaschen

2.1 Untersuchungsprogramm an Abfallrostaaschen

Ziel des Forschungsprojektes war es zu zeigen, ob die standardisierten bodenmechanischen Klassifikationskriterien auf Abfallrostaaschen uneingeschränkt übertragbar sind. Dieses Vorgehen ist derzeit gängige Praxis obwohl weithin bekannt ist, dass sich Abfallrostaaschen mechanisch nicht wie inerte Bodenarten verhalten. Es wurden Reihenuntersuchungen an sechs Abfallrostaaschen und zum Vergleich an einer Braunkohleasche und einer Holzrasche durchgeführt.

Die Reihenuntersuchungen bestanden aus den bodenmechanischen Standardversuchen zur Klassifizierung (Korngrößenverteilung, Konsistenzgrenzen, Korndichte, Gehalt an organischen Bestandteilen, Kalkgehalt u. Wasseraufnahmevermögen). Zusätzlich wurden die Kornform, die chemische Zusammensetzung, die Mineralogie und die Oberflächenbeschaffenheit untersucht.

2.2 Korngrößenverteilung

Aus den Reihenuntersuchungen geht ein enges Körnungsband aller Abfallrostaaschen hervor, siehe Bild 1. Demnach handelt es sich überwiegend um Grobsande und Feinkiese mit teilweise hohem Schluffgehalt. Die Braunkohle- und Holzraschen fallen nicht in dieses Körnungsband. Schlämmanalysen zur Bestimmung der Verteilung im Feinkornbereich konnten weder für eine der Abfallrostaaschen noch für die Braunkohleasche aufgrund von Ausflockung oder Aufschäumen durchgeführt werden.

2.3 Konsistenz

Aus den Ergebnissen der Korngrößenverteilung wurden keine plastischen Eigenschaften für die Abfallrostaaschen erwartet, was sich durch die Versuche bestätigt hat. Allerdings konnten auch für die Braunkohle und die Holzrasche keine plastischen Eigenschaften nachgewiesen werden, was im Widerspruch mit dem Verhalten von inerten Bodenstoffen gleicher oder ähnlicher Körnungslinien steht.

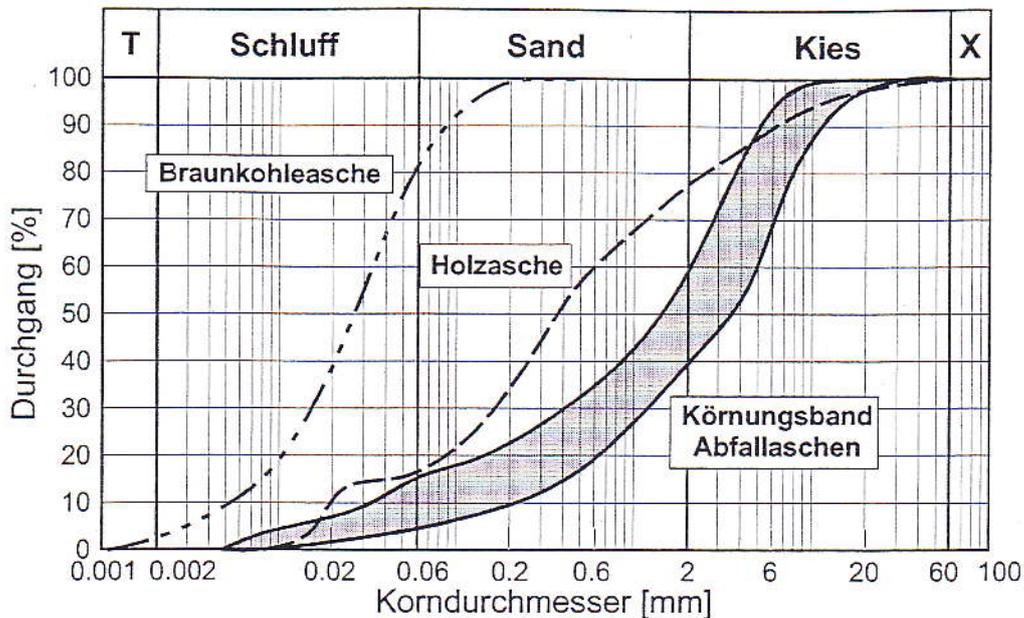


Bild 1: Korngrößenverteilung von 6 Abfallrostaschen, einer Braunkohleasche und einer Holzasche

2.4 Korndichte

Zur korrekten Terminologie wird weiterhin der Begriff der Materialdichte verwendet, da insbesondere die Abfallrostaschen ein Materialgemisch aus vielen verschiedenen Einzelkomponenten sind. Die ermittelten Materialdichten sind in Tabelle 1 dargestellt und variieren bei den Abfallrostaschen zwischen 2.61 und 2.86 g/cm³. Sie liegen im Vergleich mit Böden ähnlicher Korngrößenverteilung in der selben Größenordnung, zeigen jedoch größere Streuung. Die Untersuchungen wurden sowohl mit Kapillar- als auch mit Luftpiknometrier bestimmt und beide Methoden lieferten weitgehend übereinstimmende Ergebnisse. Der Einsatz des Luftpiknometers hat allerdings drei wesentliche Vorteile: die Probengröße ist wesentlich größer, womit eine eher repräsentative Probe untersucht werden kann; die Untersuchungszeit und somit die mögliche chemische Reaktionszeit ist erheblich kürzer, wodurch die Veränderung des Materials während der Untersuchung reduziert wird; das Material wird nicht für 20 min erhitzt oder Wasser ausgesetzt, was ebenfalls die Veränderung der chemisch/mineralogischen Zusammensetzung reduziert.

Anlage	Material	Stoffdichte ρ_s [g/cm ³]	Glühverlust V_{gl} [M-%]	Kalkgehalt V_{Ca} [M-%]	Wasseraufnahmevermögen w_A bei 105 °/60 ° [M-%]
A	Abfall	2,86	2,07	10,5	69,3 / 56,4
B	Abfall	2,61	3,90	7,1	59,0 / 59,8
C	Abfall	2,82	1,57	7,8	56,7 / 56,4
D	Abfall	2,62	3,92	14,5	59,3 / 57,7
E	Abfall	2,76	3,87	6,6	56,8 / 58,1
F	Abfall	2,75	3,13	11,0	61,2 / 59,5
G	Abfall	2,69	4,42	5,4	51,2 / 52,4
H	Holz	2,65	11,41	8,9	52,3 / 54,3
I	Braunkohle	2,71	k.N.	8 - 15	o.A.

Tabelle 1: Klassifikationsparameter von 6 Abfallrostaschen, einer Braunkohle- und Holzasche

2.5 Gehalt an organischen Bestandteilen

Aufgrund des Entstehungsprozesses von Aschen (Verbrennungstemperaturen zwischen 850 ° und 1200 ° C) wurde erwartet, dass sich geringe, bis keine Glühverluste bei 550 ° C ergeben. Durch die Versuche konnte dies grundsätzlich nicht bestätigt werden. Die Abfallrostaaschen wiesen Glühverluste von bis zu 4.42 % auf; die Holzasche sogar 11.4 %, siehe Tabelle 1. Hauptursache dafür sind die geringen Verweilzeiten des Verbrennungsgutes auf dem Rost.

In der Bodenmechanik wird aus dem Glühverlust auf den Gehalt an organischen Bestandteilen und dadurch ggf. entstehende negative Festigkeitseinflüsse rückgeschlossen, was jedoch für Aschen nicht übertragbar ist. Zu den Massendifferenzen tragen hier auch anorganische Reaktionen und mineralogische Umbildungsprozesse bei, wie bspw. Carbonatisierung, Verlust von Kristallwasser etc.

2.6 Kalkgehalt

Bodenmechanisch ist die Bestimmung des Kalkgehaltes von eher untergeordneter Bedeutung und gibt mehr Aufschluss über die Entstehungsgeschichte oder die Beständigkeit im sauren Milieu. Für Abfallrostaaschen kann demgegenüber aus dem Kalkgehalt auf das Potenzial für chemische Reaktionen bzw. auf das Stadium, in dem sich die chemisch/mineralogischen Neu- und Umbildungsprozesse befinden rückgeschlossen werden und er gewinnt damit eine andere Bedeutung.

Kalkgehalte zwischen 5.4 % und 14.5 % wurden für die Abfallrostaaschen festgestellt, siehe Tabelle 1. (Hier wird ausschließlich von CaCO_3 gesprochen, alle anderen Formen von Kalk können nicht mit der bodenmechanischen Standardmethode bestimmt werden, auch wenn sie wesentlichen Einfluss auf das Potenzial an chemisch/mineralogischen Veränderungen haben – weiterführende Untersuchungen werden durchgeführt).

2.7 Wasseraufnahmevermögen

Das Wasseraufnahmevermögen wurde nach der Methode von Enslin/Neff (1988) bestimmt und stellt herkömmlich ein Maß für das Quell- bzw. Schwellvermögen von Böden dar. Für die Aschen werden Schwellvorgänge als solche nicht erwartet, wohl aber die Volumenvergrößerung infolge von chemisch/mineralogischen Prozessen, die mit Wasser in Verbindung stehen.

In Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur zeigten die Aschen unterschiedliche Werte zwischen 51.2 % und 69.3 %, siehe Tabelle 1. Der Maximalwert wurde bei allen Aschen bereits nach 15 sec erreicht, es bildeten sich jedoch zwei Gruppen heraus. Eine Gruppe hat höhere Werte bei niedrigeren Trocknungstemperaturen als bei hohen und die andere Gruppe verhält sich umgekehrt.

Der derzeitige Forschungsstand erlaubt es nicht definitive Zuordnungen zum mechanischen Verhalten zu machen; es zeichnet sich jedoch ab, dass das Wasseraufnahmevermögen für Aschen eine größere Bedeutung besitzt als bei der Standardklassifikationen für Böden ähnlicher Korngrößenverteilungen.

2.8 Kornform

Die makroskopische Erscheinung innerhalb der Gruppe der Abfallrostaaschen war ähnlich – überwiegend gedrungene, runde und prismatische Partikel mit einer rauhen Oberfläche. Verbrennungsdurchläuferprodukte wie Glas, Steine, keramische Bestandteile und einige Metalle

waren eher eckig, lang, teilweise flach und scharfkantig. Mit steigendem Anteil an Konglomeraten in den Aschen wird auch die systematische Beschreibung der Kornform unmöglich oder zumindest fraglich.

Die mikroskopische Erscheinung ist in hohem Grade von der mineralogischen Zusammensetzung abhängig. Die Kornform und -größe entwickelt sich mit der Entstehung und dem Verschwinden von Mineralphasen, was wiederum in Abhängigkeit vom verfügbaren Wasser und der Zeit steht, siehe Abschn. 2.10. Detailliertere mineralogische Untersuchungen werden erforderlich, wie sie in der bodenmechanischen Standardklassifikation nicht durchgeführt werden.

2.9 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung wurde mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) bestimmt. Diese Untersuchungsmethode ist nicht zeitabhängig, da die Zusammensetzung der chemischen Elemente innerhalb der Aschen unveränderlich ist, solange nichts hinzugefügt oder entnommen wird.

In der Gruppe der Abfallrostaaschen wurden überwiegend die Elemente gefunden, aus denen die anorganischen Bindemittel bestehen. Hauptbestandteile sind Calcium (22 % bis 32 %) gefolgt von Silicium (6.9 % to 13 %), Eisen, Aluminium und Schwefel. Alle anderen Elemente waren mit weniger als 2.5 % enthalten.

2.10 Mineralogische Zusammensetzung

Ein Teil der Reihenuntersuchung war die Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung durch Röntgenpulverdiffraktionsanalysen (XRD) an den Abfallrostaaschen A, E, F und der Braunkohleasche J sowie Rasterelektronenmikroskopie (REM) an allen Aschen. Die hauptsächlich gefundenen Mineralphasen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Mineralphase	chemische Zusammensetzung	A	E	G	I	
Quarz	SiO ₂	x	xxxx	x	xxxx	
Calciumoxid	CaO	-	-	-	xx	
Portlandit	Ca(OH) ₂	x	-	-	xxx	
Calcit	CaCO ₃	x	xx	x	-	
Anhydrit	CaSO ₄	x	x	x	xxxx	
Bassanit	CaSO ₄ · ½ H ₂ O	-	-	+/-	-	
Gips	CaSO ₄ · 2 H ₂ O	-	x	-	-	
Ettringit	3CaO · Al ₂ O ₃ · 3CaSO ₄ · 32H ₂ O	x	x	-	-	
Gehlenit	2CaO · Al ₂ O ₃ · SiO ₂	-	x	-	xx	
Gehalte	xxxx sehr viel	xxx viel	xx deutlich	x nachweisbar	+/- möglich	- nicht nachweisbar

Tabelle 2: Mineralogische Zusammensetzung einiger Aschen

Die XRD Analysen wurden am Originalmaterial durchgeführt. Direkt nach der Entnahme wurden die Proben mit Isopropanol versetzt, um chemische Reaktionen und mineralogische Umbildungsprozesse zu verhindern. Die Proben wurden bei 60 °C getrocknet. Bei allen Aschen war der Hauptbestandteil Quarz. Weitere wichtige Bestandteile sind Portlandit, Calcit und

Anhydrit, siehe Tabelle 2. Ettringit wurde nur in 2 Aschen gefunden und Gips nur in Abfallrostaße E. Bassanit wurde nicht gefunden, was den Angaben in Pfrang-Stotz & Reichelt (1999) widerspricht.

Vorhandenes Calcit und Ettringit deuten auf bereits abgeschlossene Verfestigungsreaktionen hin, während aus Anhydrit in Verbindung mit weiteren nachgewiesenen Komponenten weiteres Verfestigungspotenzial abgeleitet wird. Calciumoxid konnte in keiner Probe nachgewiesen werden, was darauf hindeutet, dass die Hydratation von Portlandit bereits während der Abkühlungsphase im Wasserbad der Verbrennungsanlagen stattfindet.

Die Volumenvergrößerung der Aschen wird erwartet aufgrund des Gehaltes an elementarem Aluminium und Schwefel. Das Potenzial der Ettringitbildung ist größer, als der zur Verfügung stehende Porenraum und damit steigt die Wahrscheinlichkeit zur Sprengung des Korngerüsts und damit zum Festigkeitsverlust.

2.11 Oberflächenbeschaffenheit

Die Oberflächenbeschaffenheit wurde mittels REM untersucht nachdem sie bei 60 °C getrocknet und mit Kohlenstoff und Gold besputtered wurden. d. Bild 2 zeigt die Oberfläche einer Abfallrostaße mit sehr unregelmäßiger Oberflächenbeschaffenheit. Kugel- und nadel-förmige unabhängige Partikel unterschiedlicher Größe sind auf einer nicht näher beschreibbaren Oberfläche aufgewachsen.



Bild 2: Abfallrostaße, BB = 363 µm,
Originalmaterial

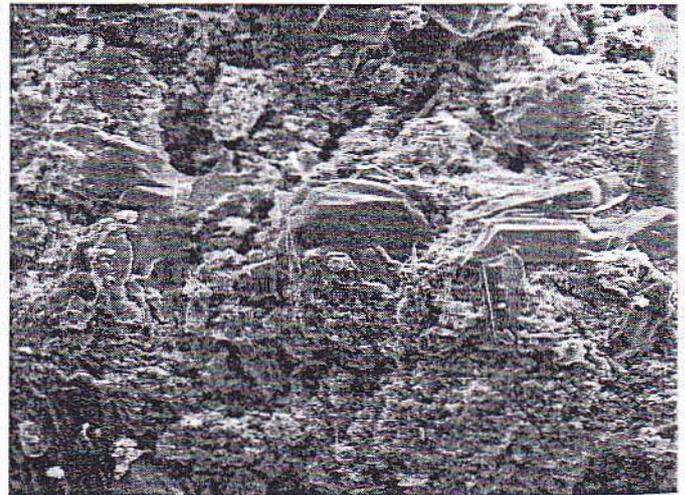


Bild 3: Abfallrostaßen, BB = 154 µm, Liegezeit
12 Wochen

Bild 3 zeigt die Abfallrostaße nach einer Liegezeit von 12 Wochen in nasser Umgebung bevor sie verwertet oder deponiert werden darf. Die granularen Einzelpartikel scheinen zusammenzuwachsen und neue Kristallstrukturen zu bilden. Typisch 6-eckige, flache Partikel beweisen die Entstehung von Protlandit, was ebenfalls in den XRD-Analysen beobachtet wurden. Mit der Verfügbarkeit von Wasser und Luft sowie Aluminium und Schwefel kann sich dann Calcit und/oder Ettringit entwickeln.

Die Holzaste enthält überwiegend granuläre Bestandteile mit rauher Oberflächenbeschaffenheit und einen hohen Gehalt an nicht verbrannten Bestandteilen, siehe Bild 4. Ein überwiegender Teil des Wasseraufnahmevermögens resultiert allein daraus.

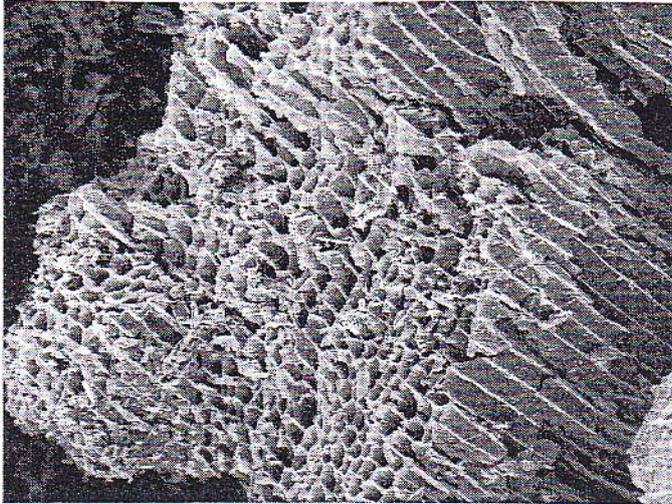


Bild 4: Holzasche, BB = 720 μm , nach 12 Wochen

Die Braunkohleasche zeigte einen hohen Anteil an Hohlkugeln, wie bereits in der Literatur berichtet ist. Die Durchmesser vergrößern sich mit der Zeit im Vergleich zum Originalmaterial.

Sowohl die makroskopischen als auch die mikroskopischen Untersuchungen der Oberflächenbeschaffenheit zeigten eine große Bandbreite an Erscheinungsformen hinsichtlich der Partikelgröße, der Rauigkeit, der Struktur und der Kornformen. Damit wird die Notwendigkeit unterstrichen, weitere Kriterien zur Charakterisierung von Verbrennungsrückständen zu etablieren.

2.12 Reproduzierbarkeit der Klassifizierungsversuche

Alle bodenmechanischen Klassifikationsuntersuchungen wurden mindestens 6-fach durchgeführt und zeigten gute bis sehr gute Reproduzierbarkeit

3 Versuche zur Charakterisierung

3.1 Untersuchungsprogramm

Die Charakterisierung der Abfallrostaschen wurde durch die Wassergehaltsbestimmung (Trocknungstemperatur 105 ° C) und die Verdichtbarkeit im Proctorversuche durchgeführt.

3.2 Wassergehalt

Die Wassergehalte wurden direkt nach der Probennahme bestimmt und variierten bei den Abfallrostaschen zwischen 10 % und 25 %. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Probenahme nach einer mindestens 3 monatigen Lagerung der Aschen im Freien stattfand und von daher eher die aktuellen Wetterbedingungen wiedergegeben werden, als den Zustand der Aschen. Der Wassergehalt ist allerdings in Verbindung mit den zu erwartenden chemischen Reaktionen von Bedeutung.

3.3 Proctorversuche

Die Durchführung der Proctorversuche wurde dahingehend modifiziert, dass direkt nach Anlieferung das gesamte Material bei 60 ° C getrocknet wurde. Für jeden Proctorversuchsbehälter wurde dann das Wasser separat zugegeben und innerhalb von 15 min verarbeitet, siehe Burger et al. (1995). Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden die Versuche 3-fach durchgeführt und ausgewählte Testergebnisse der Abfallrostatasche E und F sind in Bild 5 und 6 dargestellt.

Für Abfallrostatasche E wurden Proctorwerte von max. $\rho_{Pr} = 1.92 \text{ g/cm}^3$ bei zugehörigen $w_{Pr} = 15.1 \%$ bestimmt, siehe Bild 5, die erheblich schwanken. Asche F hat min. $\rho_{Pr} = 1.45 \text{ g/cm}^3$ und $w_{Pr} = 21 \%$ bei ebenfalls starken Schwankungen der Ergebnisse, siehe Bild 6.

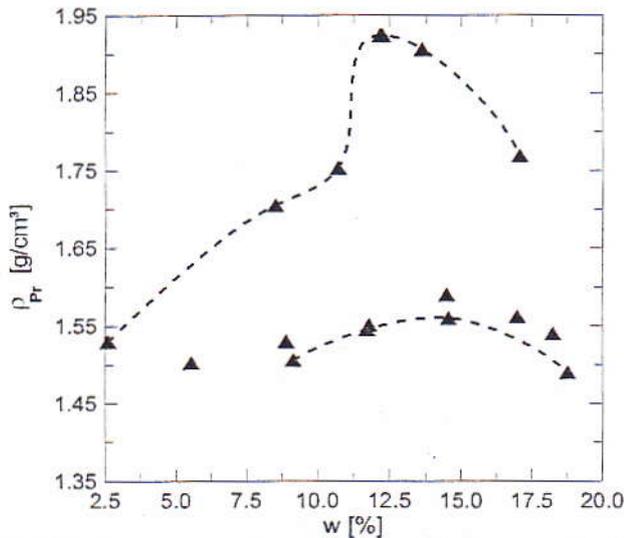


Bild 5. Proctorergebnisse von Abfallrostatasche E

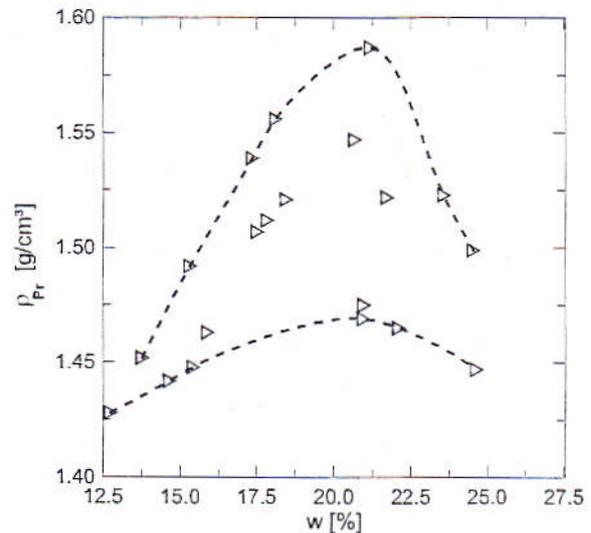


Bild 6. Proctorergebnisse von Abfallrostatasche F

Die grundsätzliche Reproduzierbarkeit von Proctorversuchen konnte in den Reihenuntersuchungen nicht nachgewiesen werden, was die starken Schwankungen der Ergebnisse, die bei jeder Abfallasche auftraten, belegen. Bei Betrachtung der gesamten Gruppe der Abfallrostataschen traten maximale Werte von ρ_{Pr} bei minimalen Werten von w_{Pr} auf und umgekehrt. Mit derzeitigem Stand der Forschung kann dieses Verhalten nicht erklärt werden.

4 Entwicklung der Scherparameter

4.1 Untersuchungsprogramm

Sehr schnell wurde bemerkt, dass das mechanische Verhalten der Abfallrostataschen stark zeit- und milieuhängig ist. Es wurden direkte Scherversuche nach Liegezeiten von 1, 7 und 28 Tagen sowie nach 26 und 52 Wochen durchgeführt. Die Probekörper wurden $D_{Pr} = 0,97$ auf dem trockenen Ast hergestellt, luftdicht verschlossen und bei Raumtemperatur gelagert. Die Probekörper zeigten bereits nach 7 Tagen eine Volumenvergrößerung, die auf die Entstehung von volumenbildenden Mineralen zurückgeführt wird. Teilweise war die Expansion so groß, dass die Proben zerstört waren.

4.2 Reibungswinkel

Die festgestellten Reibungswinkel der Abfallrostataschen E und F variieren zwischen 30.9° und 52.9° zur Liegezeit von 1 Tag. Die zeitabhängige Entwicklung von φ ist in Bild 7 für Abfallrostatasche E und in Bild 8 für Abfallrostatasche F dargestellt. Demnach zeigt Abfallrostatasche E nur eine geringe Schwankung von 2° über den Zeitraum eines Jahres auf, was im Rahmen der Messgenauigkeit liegt.

Deutlich verschieden davon ist die zeitliche Entwicklung von φ für Abfallrostatasche F, das nicht nur mit der Zeit variiert sondern auch enorme Schwankungen zeigt, siehe Bild 8. Bemerkenswert ist, dass φ nach 1 Jahr kleiner ist, als nach 1 Tag.

Im Vergleich aller untersuchten Aschen ergaben sich 2 Gruppen, eine, deren φ zeitabhängig relativ konstant bleibt und eine, die extreme Unterschied in der Entwicklung von φ aufweist.

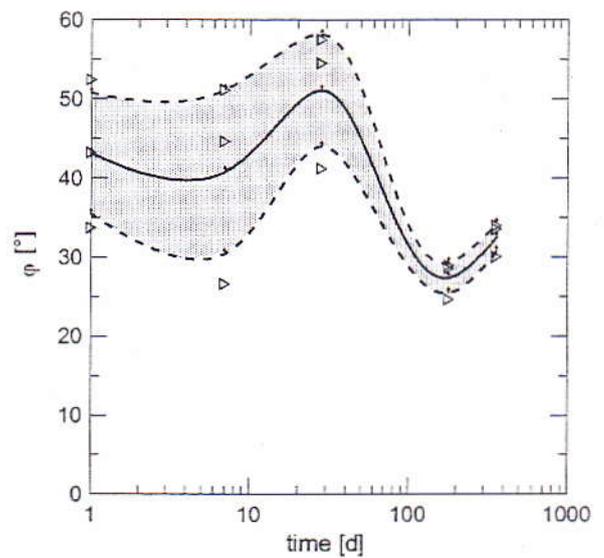
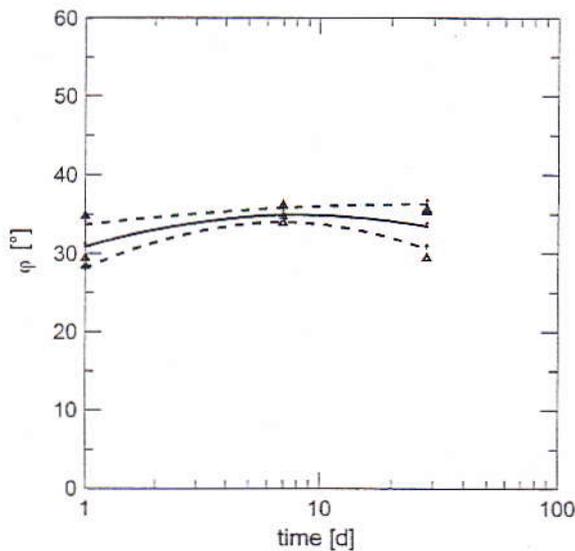


Bild 7: Zeitabhängige Entwicklung von φ , Asche E Bild 8: Zeitabhängige Entwicklung von φ , Asche F

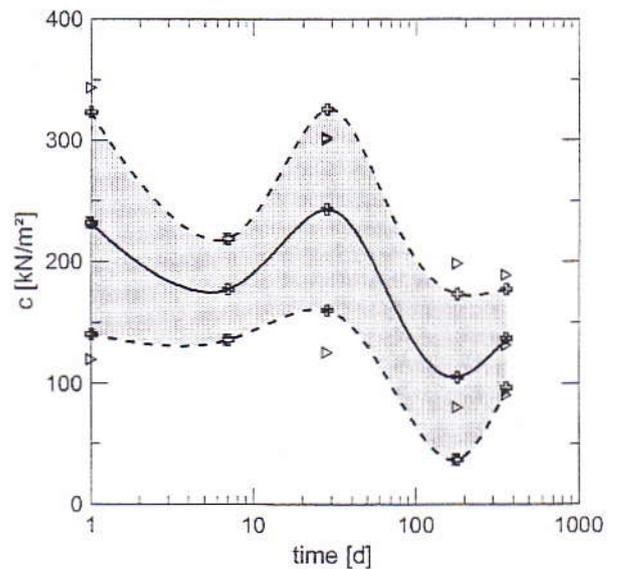
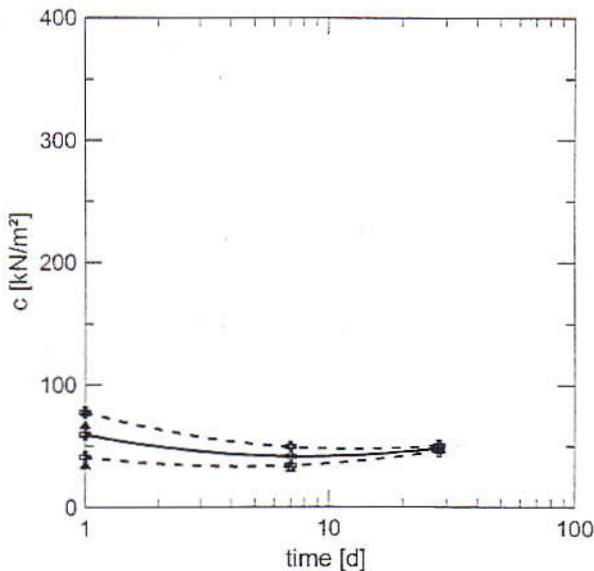


Bild 9: Zeitabhängige Entwicklung von c , Asche E Bild 10: Zeitabhängige Entwicklung von c , Asche F

4.3 Kohäsion

Die Kohäsion zeigt ähnliche zeitabhängige Entwicklungstendenzen, wie der Reibungswinkel. Nach 1 Tag lagen die Kohäsionswerte zwischen $c = 5.4 \text{ kN/m}^2$ und $c = 232 \text{ kN/m}^2$. Durch mechanisches Verhalten kann das nicht erklärt werden, sondern nur durch chemisch/mineralogische Prozesse.

Bild 9 zeigt die Entwicklung der Kohäsion für Abfallrosta-sche E, die sich qualitativ ähnlich verhält wie ihr Reibungswinkel mit vergleichbar niedrigen Schwankungen. Im Vergleich zu Böden ist die Kohäsion sehr hoch!

Abfallrosta-sche F zeigt bei der Kohäsion wie bereits bei ϕ große Unterschiede über den Zeitraum von einem Jahr, siehe Bild 10, die keiner einheitlichen Tendenz folgen.

Die Gruppe der Abfallrosta-schen zeigen in der Entwicklung ihrer Scherparameter erhebliche Variation. Insbesondere vor dem Hintergrund des engen Körnungsbandes, siehe Bild 1, kann dieses Verhalten durch rein mechanische Vorgänge nicht erklärt werden.

4.4 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit ist mit den rein bodenmechanischen Versuchsmethoden gegeben.

5 Bewertung und Schlussfolgerung

Die untersuchten Abfallrosta-schen liegen in einem relativ engen Körnungsband und können als sandiger Kies eingestuft werden. Alle weiteren Versuche an Abfallrosta-schen (Charakterisierung, Bestimmung des Festigkeitsverhaltens) zeigen Schwankungsbreiten, die für geologische Ablagerungen mit ähnlichen bodenmechanischen Klassifikationsmerkmalen nicht gefunden werden. Gründe dafür liegen in der komplexen Matrix der Einflüsse wie: originäre Entstehung der Abfallrosta-schen (bis hin zur Zusammensetzung des Abfalls), mechanische Eigenschaften des Korngerüsts, chemisch/mineralogische Neu- und Umbildungsprozesse, Lagerungsbedingungen, Zeit etc. Das mechanische Verhalten wird offensichtlich zeitabhängig durch chemische Veränderungen beherrscht. Bodenmechanische Klassifikationskriterien können nur ein Baustein in der Klassifikation sein und sind alleine nicht ausreichend um das mechanische Verhalten einzordnen. Andere Klassifikationskriterien sind derzeit nicht verfügbar und sind zu entwickeln.

6 Literatur

- [1] Burger, Ch. & Grabe, J. & Rankelmann, U. 1995. Materialuntersuchungen an Klärschlammaschen. *Geotechnik*, Jg. 19, pp. 162-170. Essen: Glückauf Verlag.
- [2] Pfrang-Stotz, G. & Reichelt, J. 1996. Müllverbrennungsschlacken - Mineralogie, Elutionsverhalten und Technische Eigenschaften, Müll und Abfall, Berlin: Erich-Schmidt-Verlag.
- [3] Neff, H. K. (1988). Der Wasseraufnahme-Versuch in der bodenphysikalischen Prüfung und geotechnische Erfahrungswerte. *Bautechnik* 65. pp. S. 153-163. Berlin: Ernst+Sohn.
- [4] Ott, E. (2001): Zum bodenmechanischen Verhalten von Abfallrosta-schen, Schriftenreihe der Universität Gh Kassel, Heft 11.

