

Abfallrostataschen werden zur Zeit überwiegend im Unterbau von Straßen verwertet oder deponiert. Untersuchungen zum Verhalten hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit wurden vielfach durchgeführt und ermöglichen realistische Prognosen. Für die Abschätzung des mechanischen Verhaltens wird in der Regel auf bodenmechanische Klassifizierungskriterien und hier hauptsächlich auf die Korngrößenverteilung zurückgegriffen. Erfahrungswerte aus der Praxis und Untersuchungen an anderen Aschen (KEMPFERT, 1981, BURGER et al., 1995) belegen, dass diese Materialien sowohl ihr mechanisches Verhalten als auch ihr Volumen mit der Zeit verändern, was für ähnliche klassifizierte Böden nicht der Fall ist. Das zeitlich veränderliche mechanische Verhalten wird auf die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Abfallrostataschen zurückgeführt, die auch nach dem Einbau ihre Festigkeit, Verformungseigenschaften und die Volumenstabilität noch verändern.

An der Universität Kassel wurden Reihenuntersuchungen an sechs Abfallrostataschen durchgeführt, um die Übertragbarkeit der bodenmechanischen Klassifizierungskriterien auf Abfallrostataschen systematisch zu überprüfen. Die bodenmechanischen Versuche wurden durch chemisch-mineralogische Untersuchungen ergänzt. An einer ausgewählten Abfallrostatasche wurden dann zeitabhängig das Festigkeits- und Verformungsverhalten untersucht und den chemisch-mineralogischen Veränderungen gegenübergestellt. In diesem Beitrag finden sich die wichtigsten Ergebnisse wieder, und es werden erste Anhaltswerte von Berechnungsparametern angegeben.

Versuchsprogramm

Reihenuntersuchungen an sechs Abfallrostataschen

Der Klassifizierung von Böden liegt als wichtiges Kriterium die Korngrößenverteilung zu Grunde, die bei bindigen Böden um die Bestimmung der Zustandsgrenzen ergänzt wird. Neben den Körnungslinien wurden für jede Asche ihr Kalkgehalt, Glühverlust und Wasseraufnahmevermögen untersucht. Da bereits bei Trocknungstemperaturen ab 60 °C Veränderungen in der Kristallstruktur von Bestandteilen der Abfallrostataschen erwartet werden (beispielsweise ist reiner Gips thermodynamisch bei > 100 °C stabil, liegt aber selten in dieser reinen Form vor), wurde das Wasseraufnahmevermögen für Abfallrostataschen bestimmt, die bei 105 und bei 60 °C getrocknet waren. Ergänzend zum bodenmechanisch klassifizierenden Versuchsprogramm wurden Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung, des mineralogischen Aufbaus und der Oberflächen-

Aspekte zur Klassifizierung und Kenngrößenermittlung von Abfallrostataschen

**Dr.-Ing. Elfriede Ott, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, Professor
Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel**



beschaffenheit durchgeführt. Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der durchgeführten Untersuchungen mit den zugehörigen Prüfvorschriften.

Daneben wurden Aussagen über die Verarbeitbarkeit der Aschen auf der Grundlage von Proctorversuchen gewonnen und das Festigkeits- und Verformungsverhalten sowie das Durchlässigkeitsverhalten untersucht. Die Festigkeitsparameter

Tabelle 1. Versuchsprogramm und Prüfvorschriften für die durchgeführten Reihenuntersuchungen.

Versuch	Prüfverfahren
Versuche zur Klassifizierung der Verbrennungsrückstände	
Korngrößenverteilung	DIN 18 123
Zustandsgrenzen	DIN 18 122
Korndichte	DIN 18 124
Gehalt an organischen Bestandteilen	DIN 18 128
Kalkgehalt	DIN 18 129
Wasseraufnahmevermögen nach Enslin/Neff	DIN 18 132
Kornform	
Chemische Zusammensetzung (halbquantitativ)	RFA
Mineralogische Zusammensetzung (teilweise)	XRD
Beschaffenheit der Oberfläche (teilweise)	REM
Versuche zur Bestimmung der erreichbaren Einbaudichte	
Proctorversuch	DIN 18 127
Wassergehalt	DIN 18 121
Versuche zur Bestimmung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens	
Scherfestigkeit, direkter Scherversuch (zeitabhängig)	DIN 18 137
Einaxialer Druckversuch	DIN 18 136
Eindimensionaler Kompressionsversuch	DIN 18 135 (E)
Versuche zur geohydraulischen Eigenschaft	
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert	DIN 18 130

Abfallrostataschen werden derzeit überwiegend deponiert oder im Straßenbau verwertet. Intensive Untersuchungen zur Bestimmung von Klassifikationskriterien und mechanischen Parametern zeigte, dass die Kenntnisse über Böden mit ähnlicher Erscheinungsform nicht auf Abfallrostataschen übertragbar sind. Die beobachteten Erscheinungen werden dargestellt, und erste Ansätze zur mechanischen Beschreibung werden gegeben. Weiterhin sind erste Parameter für erdstatische Berechnungen aufgrund der Erfahrungswerte aus den Untersuchungen vorgeschlagen.

Tabelle 2. Zusammenstellung der mineralogischen Untersuchungen an ausgewählten Abfallrostaschen.

Mischung	Untersuchungszeit XRD [Tage]	Untersuchungszeit REM [Tage]
A $D_{Pr} = 0,97$ _{trocken}	0, 1, 7, 28, 180, 360	1, 07, 28, 180, 360
B $D_{Pr} = 1,0$	0, 1, 7, 28, 180, 360	1, 07, 28, 180, 360
C $D_{Pr} = 0,97$ _{nass}	0, 1, 7, 28, 180, 360	1, 07, 28, 180, 360

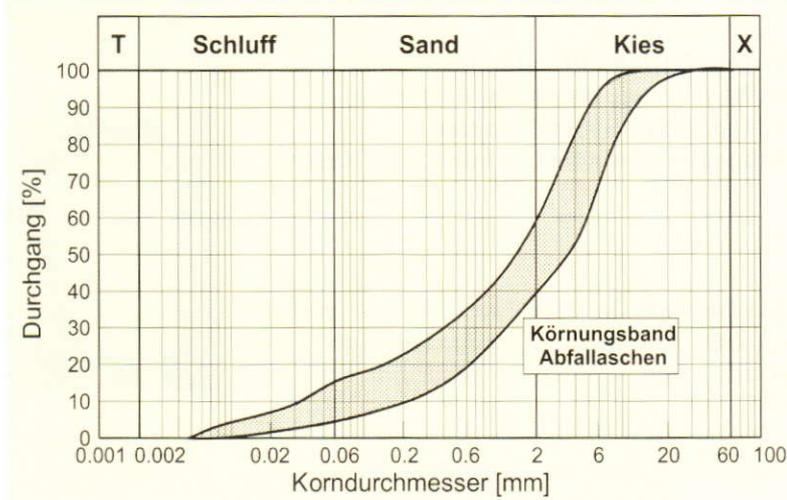


Bild 1. Körnungsbands für Abfallrostaschen aus sechs verschiedenen Verbrennungsanlagen.

wurden in Abhängigkeit von der Liegezeit nach 1, 7 und 28 Tagen sowie nach 6 Monaten und einem Jahr ermittelt. Dabei lehnen sich die Untersuchungszeitpunkte an die Vorgehensweise in der Betontechnologie an.

Weiterführende Untersuchungen an einer Abfallrostasche

An einer ausgewählten Abfallrostasche wurden weiterführend mineralogische Untersuchungen und Triaxialversuche über die Zeit von einem Jahr mit dem Ziel durchgeführt, die mechanische Veränderung auf die chemisch-mineralogische Entwicklung beziehen zu können. Die Zusammenstellung der untersuchten Mischungen und Liegezeiten enthält Tabelle 2. Proben vom Originalmaterial wurden direkt nach Anlieferung als Stichproben gezogen und in Isopropanol gelagert, um weitere Reaktionen mit Wasser und somit gegebenenfalls ablaufende Abbindeprozesse zu stoppen. Proben zu späteren Liegezeiten wurden direkt nach Beendigung der Triaxialversuche aus den abgescherten Probekörpern gewonnen und in

Isopropanol gelagert. Alle Proben wurden bei 40 °C getrocknet und für RFA (Röntgenfluoreszenzanalyse) oder XRD (Röntgenpulverdiffraktionsanalyse) aufbereitet.

Ergebnisse der Reihenuntersuchungen

Bild 1 und Tabelle 3 zeigen die Ergebnisse der bodenmechanischen Klassifizierungsversuche und sind nachfolgend stichpunktartig zusammengefasst:

- ◊ Die Abfallrostaschen sind schluffige Sand-Kiesbeziehungsweise Kies-Sand-Gemische,
- ◊ Es handelt sich um Stoffe, die keine plastischen Eigenschaften aufweisen,
- ◊ Die Stoffdichten der untersuchten Abfallrostaschen liegen mit 2,61 bis 2,86 g/cm³ in vergleichbaren Größenordnungen wie die der Böden, weisen jedoch eine größere Streuung auf,
- ◊ Die Kalkgehalte der untersuchten Aschen liegen zwischen 5,4 und 11 %.

Aus den weiterführenden Untersuchungen ergab sich Folgendes:

- ◊ Es handelt sich bei den Aschen und insbesondere bei den Abfallrostaschen um Vielformengemische sowohl hinsichtlich der Makro- als auch in der Mikrostruktur,
- ◊ Aus Ergebnissen von RFA ist ersichtlich, dass die Hauptelemente der Aschen den Komponenten der anorganischen Bindemittel entsprechen,
- ◊ Verschiedene Phasen von abbindefähigen Stoffen wurden durch die XRD nachgewiesen.

Als erstes Ergebnis der Versuche zum Scher-, Verformungs- und Durchlässigkeitsverhalten wurde festgestellt:

- ▶ Abfallrostaschen können nach den von der Liegezeit abhängigen Scherparametern tendenziell in
 - ◊ Gruppe I (stark zeitabhängige Entwicklung der Scherparameter) und
 - ◊ Gruppe II (weniger stark zeitabhängige Entwicklung der Scherparameter) unterteilt werden,
- ▶ Abfallrostaschen zeigen bei der Einbaubedingung $D_{Pr} = 0,97$ _{trocken} ähnliche Verformungsparameter wie locker bis mitteldicht gelagerte Sande,

Tabelle 3. Übersicht über die mittlere Stoffdichte, Glühverlust, Kalkgehalt und Wasseraufnahmefähigkeit von Abfallrostaschen.

Anlage	Material	Stoffdichte ρ_s [g/cm ³]	Glühverlust V_{gl} [M.-%]	Kalkgehalt V_{Ca} [M.-%]	Wasseraufnahmevermögen w_A bei 105 °C/60 °C [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

► Das Durchlässigkeitsverhalten ist zeitabhängig und liegt zwischen $1,4 \cdot 10^{-7}$ und $9,3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Statistische Untersuchungen zeigten für die Klassifizierungsversuche gute bis sehr gute Reproduzierbarkeit. Dementgegen sind ganz erhebliche Abweichungen zwischen den Einzelversuchsergebnissen der Proctor-, Scher- und KD-Versuche aufgetreten. Die starken Schwankungen sind auf die komplexe chemisch-mineralogische Zusammensetzung zurückzuführen, die bereits während der Versuchsdurchführung zu Veränderungen im Untersuchungsmaterial führen kann.

Die Durchführung der Reihenuntersuchungen war in vielen Fällen mit Problemen behaftet. Die Reihenuntersuchungen bilden in vielerlei Hinsicht die Grundlage, um die Eigenheiten der Aschen zunächst benennen zu können, ohne dass bereits abschließende Erklärungen vorliegen. Zusammenfassend sind die aufgetretenen Probleme und Folgerungen daraus dargestellt:

- ◊ Das Sedimentationsverfahren nach DIN 18 123 stellt keine zuverlässige Methode dar, um realistische Körnungslinien im Feinkornbereich von Aschen zu erhalten. Besser geeignet ist eine Laser-Partikelgrößen-Bestimmung.
- ◊ Die Ermittlung der Körnungslinie ist für das von der Liegezeit abhängige mechanische Verhalten der Aschen wichtig, da in den feinen Bestandteilen höheres chemisches Reaktionspotenzial enthalten ist, das zu mineralogischen Um-/Neubildungsprozessen führt. Daneben ist aus der Feinfraktion größeres Emissionspotenzial zu erwarten.
- ◊ Der Begriff Korndichte im herkömmlichen Sinn kann nicht auf Aschen übertragen werden, da Aschen Vielstoffgemische sind. Als bessere Bezeichnung, die auch den Unterschied zu Böden im Sprachgebrauch deutlich macht, wird Stoffdichte vorgeschlagen.
- ◊ Zur Bestimmung der Stoffdichte ist die Verwendung von Luftpyknometern den Kapillarypyknometern vorzuziehen, da aufgrund der Probengröße die Probenzusammensetzung eher dem Vielstoffgemisch Asche entspricht und nur kürzere Versuchszeiten erforderlich sind.
- ◊ Der Glühverlust kann nicht mit dem Gehalt an organischen Anteilen

gleichgesetzt werden, da aufgrund der stofflichen Zusammensetzung teilweise Gewichtsveränderungen infolge Austreiben von Kristallwasser erwartet werden müssen.

- ◊ Der Kalkgehalt nach DIN 18 129 gibt ausschließlich den Carbonatanteil als bereits ausreagierte Form des Calciums oder Magnesiums an und macht keine Angaben über noch zu erwartende Verfestigungsreaktionen.
- ◊ Wird das Wasseraufnahmevermögen an Proben bestimmt, die bei unterschiedlichen Temperaturen getrocknet wurden, kann für Aschen als erster Indikator abgeleitet werden, wie stark zeitabhängig sich ihre Scherfestigkeit entwickelt.
- ◊ Die Beurteilung der Kornformen zur Ableitung mechanischer Eigenschaften erscheint nicht zweckmäßig aufgrund der äußerst vielfältigen Zusammensetzung der Aschen in jedem Maßstab und subjektiv unterschiedlicher Wahrnehmung.
- ◊ Mittels XRD-Analyse können nur die in kristalliner Form vorliegenden Bestandteile ermittelt, amorphe Anteile jedoch nicht erkannt werden.
- ◊ Erhärtungsvorgänge treten bei der Ermittlung der Proctordichten bereits während des Versuchsablaufs auf und führen zu nicht miteinander vergleichbaren Einzelergebnissen bei der herkömmlichen Vorgehensweise. Eine modifizierte Methodik ist erforderlich und wurde hier auch angewandt (BURGER et al., 1995).
- ◊ Eingestellte Wassergehalte weichen bei den Proctorversuchen um bis zu 5 % von den nachträglich durch Ofentrocknung ermittelten Wassergehalten ab, trotz der modifizierten Vorgehensweise.
- ◊ In Scherversuchen wurde gezeigt, dass Aschen zeitabhängig ihre Scherparameter verändern. Geogene Materialien zeigen keine Schwankungen in diesem Ausmaß.
- ◊ Einaxiale Druckfestigkeitsversuche sind an Proben direkt nach der Herstellung nicht durchführbar. Sie sind an Proben mit längeren Liegezeiten möglich, sofern die chemischen Reaktionen und mineralogischen Um-/Neubildungsprozesse ausreichende Tragfähigkeit ergeben.
- ◊ Die ermittelten Werte der Steifemoduln können nicht mit Literatur-



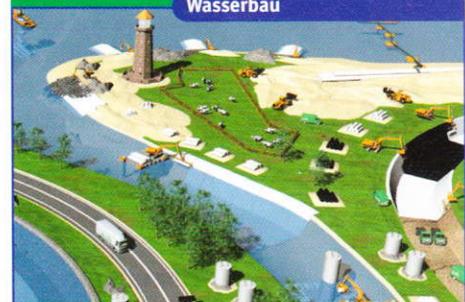
Geokunststoffe von Naue Fasertechnik.

**Wirtschaftlich.
Sicher.
Umweltschonend.**

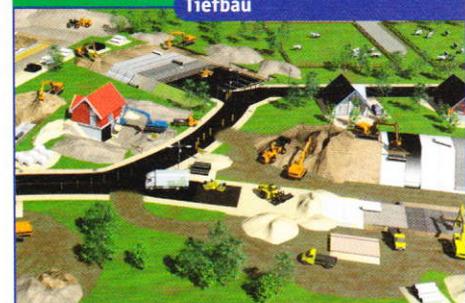
Deponiebau



Wasserbau



Tiefbau



NAUE 
FASERTECHNIK

Naue Fasertechnik
GmbH & Co. KG
Wartturmstraße 1
32312 Lübbecke
Telefon 0 57 41 / 40 08 - 0
Telefax 0 57 41 / 40 08 - 40
e-mail: info@naue.com
Internet: www.naue.com

www.naue.com

Tabelle 4. Zusammenstellung von Verfestigungsreaktionen in Abfallrostaaschen.

Chemische Reaktion	Zeitraum/Reaktionszeit	Verhaltensveränderung
Calciumhydratbildung	Sofort, innerhalb weniger Stunden bei ausreichender Wasserverfügbarkeit	hohe Alkalinität
Carbonatisierung	Nach etwa 2 Wochen, stabil nach 3 Monaten	Verfestigung
Calciumsilicathydratbildung	Nach Wochen, kann Jahrzehnte andauern (GALLENKEMPER/REGENER, 1993)	Verfestigung
Aluminiumhydratbildung	Innerhalb der ersten Wochen größere Bestandteile bis zu mehreren Jahrzehnten (LAHL, 1992)	Gasbildung Volumenbildung
Eisenhydratbildung	5 bis 10 Jahre (LICHTENSTEIGER, 1996)	Volumenbildung
Sulfidoxidation		Volumenbildung
Calciumsulfathydratation: Anhydrit → Bassanit → Gips	nach 2 Wochen stabil bei ausreichender Verfügbarkeit von Wasser	Verfestigung
Mischkristallbildung (Ettringitbildung)		Verfestigung Volumenbildung

werten für Böden mit ähnlichen Kornverteilungskurven verglichen werden.

Mit den vorliegenden Ergebnissen werden die Eigenheiten insbesondere der Abfallrostaaschen im Vergleich zu Böden aufgezeigt. Dies bezieht sich auf die bodenmechanischen Prüfverfahren, die nicht generell auf Abfallrostaaschen übertragen werden können, wie es bisher üblich ist. Die Reihenuntersuchungen liefern eine Grunddatenbasis, die zur Entwicklung eines Klassifizierungsschemas weiter ergänzt werden muss, damit tatsächliche physikalisch-chemische Zusammenhänge erfasst werden können.

Weiterführende Untersuchungsergebnisse an einer Abfallrostaasche

Mineralogische Veränderungen bis Liegezeiten von einem Jahr

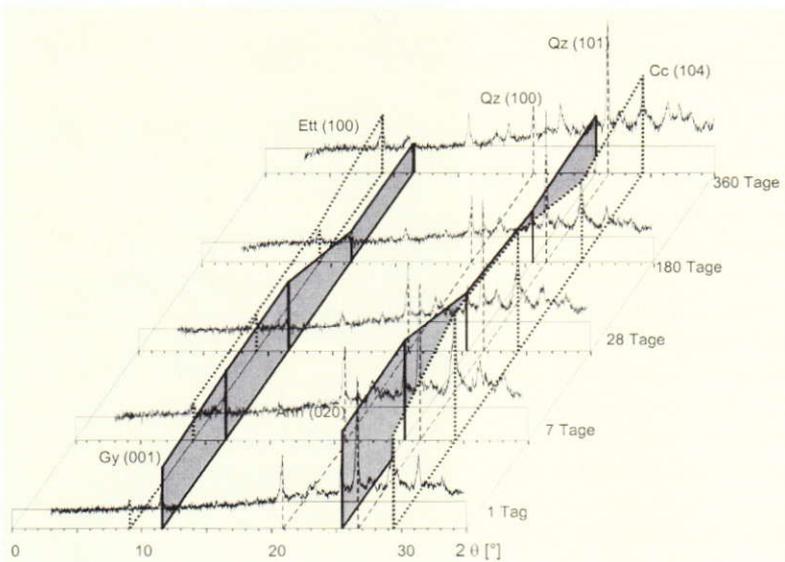
Das zeitlich veränderliche mechanische Verhalten wird hauptsächlich auf chemisch-mineralogische Um-/Neubildungsprozesse zurückgeführt, die im Wesentlichen Calciumhydratbildung (CH), Carbonatisierung (= CO_2), Calciumsilicathydrat-, Aluminiumhydrat-, Eisenhydratbildung, Sulfid-

oxidation, Calciumsulfathydratbildung (CSH) (Anhydrit → Bassanit → Gips) und Mischkristallbildung (beispielsweise Ettringit) sind. Diese Reaktionen treten in Abhängigkeit vom verfügbaren Wasser, von den Liegezeiten und den Milieubedingungen auf und sind die Ursache von teilweise gegensätzlichen mechanischen Veränderungen. Tabelle 4 zeigt die chemischen Hauptreaktionen, die Zeitpunkte beziehungsweise die jeweils benötigten Reaktionszeiten sowie die bewirkten mechanischen Veränderungen. Der Abbau organischer Substanzen ist in den hier durchgeführten Untersuchungen nur insofern von Bedeutung, als sie über ihren Abbaue Zeitraum Wasser und Kohlendioxid freisetzen und gegebenenfalls Verfestigungsreaktionen begünstigen. Sie wurden nicht weiter untersucht.

Exemplarisch ist für Mischung C gezeigt, wie sich die chemisch-mineralogischen Phasen qualitativ mit der Liegezeit verändern (Bild 2). Es wird nach ihrer Bedeutung unterschieden zwischen Hauptbestandteilen, wesentlichen Bestandteilen, Bestandteilen und Nebenbestandteilen.

- Quarz wurde zu allen untersuchten Zeitpunkten als Hauptbestandteil der Proben festgestellt, Peaks Qz (100) und Qz (101).
- Portlandit wurde in keiner der Proben analysiert, was eher untypisch für Liegezeiten von 1 bis 7 Tagen ist.
- Calcit wurde nach einem Tag als wesentlicher Bestandteil nachgewiesen, stieg zum Hauptbestandteil nach 7 beziehungsweise 28 Tagen an, Peak Cc (104). Nach 180 und 360 Tagen war Calcit als wesentlicher Bestandteil nachweisbar. Dieses Verhalten wurde tendenziell bereits bei den Mischungen A und B beobachtet.
- Anhydrit war wesentlicher Bestandteil nach 7 Tagen und konnte in den älteren Proben nicht mehr nachgewiesen werden, Peak Anh (020).
- Gips war nach einem Tag deutlich nachweisbar mit ansteigender Tendenz nach 7 beziehungsweise 28 Tagen und danach wieder abfallend,

Bild 2. Mischung C – Veränderung in der mineralogischen Zusammensetzung über den Zeitraum von 360 Tagen.



Peak Gy (001). Nach 360 Tagen war Gips noch nachweisbar. Der in 7 Tagen steigende Gipsgehalt kann mit dem sinkenden Anteil an Anhydrit durch dessen Reaktion begründet werden. In der Tendenz zeigt die Mischung C das gleiche Verhalten wie bereits die Mischungen A und B, allerdings erfolgt die Hydratation in einem kürzeren Zeitraum, was auf den höheren Wassergehalt zurückgeführt werden kann. Der nach 28 Tagen abfallende Gehalt an Gips ist durch die Entstehung von Ettringit begründbar.

- ⊖ Ettringit war mit fraglichem Gehalt in der Probe nach einem Tag nachweisbar mit steigender Tendenz bis zu 360 Tagen, Peak Ett (100). Der steigende Anteil von Ettringit geht mit der Reduzierung von Gips einher. Diese Entwicklung wurde bereits bei den Mischungen A und B beobachtet, allerdings stieg der Ettringitgehalt nur bei Mischung C auf einen wesentlichen Gehalt an. Eine Erklärung dafür können der höhere Wassergehalt und die bessere Verfügbarkeit von Aluminium sein, welche die Entstehung von Ettringit begünstigen.

Zusammenfassend kann aufgrund der XRD für alle drei Mischungen gesagt werden:

- ⊖ Quarz ist in jeder Probe ein Hauptbestandteil.
- ⊖ Innerhalb eines Tags ist kein Portlandit mehr mittels XRD nachweisbar.
- ⊖ Der Calcitanteil in den Proben steigt mit zunehmendem Probenalter an.
- ⊖ Anhydrit ist in allen Proben bis zu 28 Tagen enthalten und danach nicht mehr nachweisbar, was die steigende Menge an Gips innerhalb dieser Zeit erklärt.
- ⊖ Gips wird bis zu 28 Tagen mit steigender Tendenz nachgewiesen und nimmt danach wieder ab. Die ansteigende Menge an Gips kann mit der Hydratation des Anhydrits und die Abnahme mit der Bildung von Ettringit erklärt werden.
- ⊖ Ettringit konnte in den Proben ab 7 Tagen mit steigender Tendenz nachgewiesen werden und geht mit der Verringerung von Gips einher. Ettringit wird stetig gebildet, was sich durch eine allmähliche Verfügbarkeit von Aluminiumsalzen erklären lässt.

Die tendenzielle Entwicklung von Mineralbestandteilen war für alle drei untersuchten Mischungsverhältnisse mit Wasser gleich, was ein ähnliches Spannungs-Verformungs-Verhalten erwarten lässt. Untersuchungen mittels REM bestätigten die Bildung von Ettringit und CSH-Phasen in Proben unterschiedlichen Alters (Bilder 3 bis 6).

Entwicklung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens bis Liegezeiten von einem Jahr

Zur Untersuchung des zeitabhängigen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Abfallrostaasche E wurden Elementversuche als triaxiale Kompres-

sionsversuche durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameter variiert (vgl. Tabelle 2):

- ⊖ Seitendruck σ_3 ,
- ⊖ Einbaukriterien der Proben,
- ⊖ Versuchszeitpunkte beziehungsweise Liegezeiten der Proben.

Bild 7 zeigt exemplarisch den Spannungs-Verformungsverlauf aus Triaxialversuchen nach 28 und 360 Tagen an Proben der Mischung C. In den eigenen Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Abfallrostaaschen (OTT, 2001) wur-

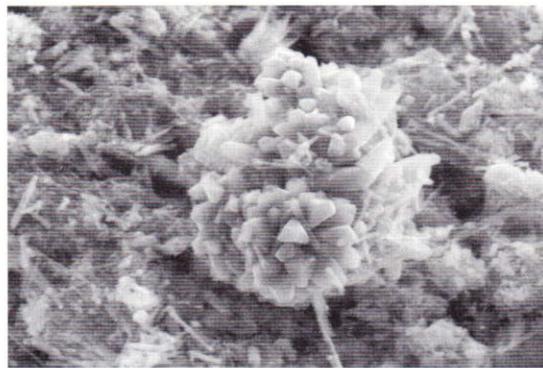


Bild 3. Mischung C, 28 Tage, BB = 40 μm , (CaCO_3 Varietät).

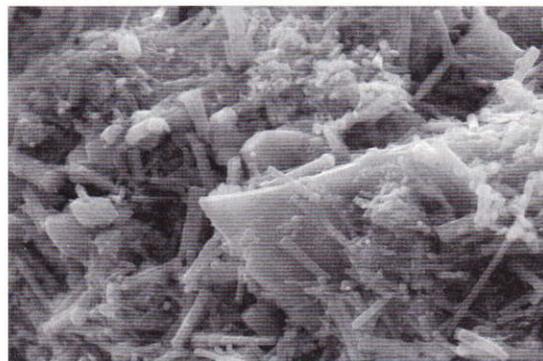


Bild 4. Mischung A, 180 Tage, BB = 21 μm , (Ettringit-Kristalle auf CH).

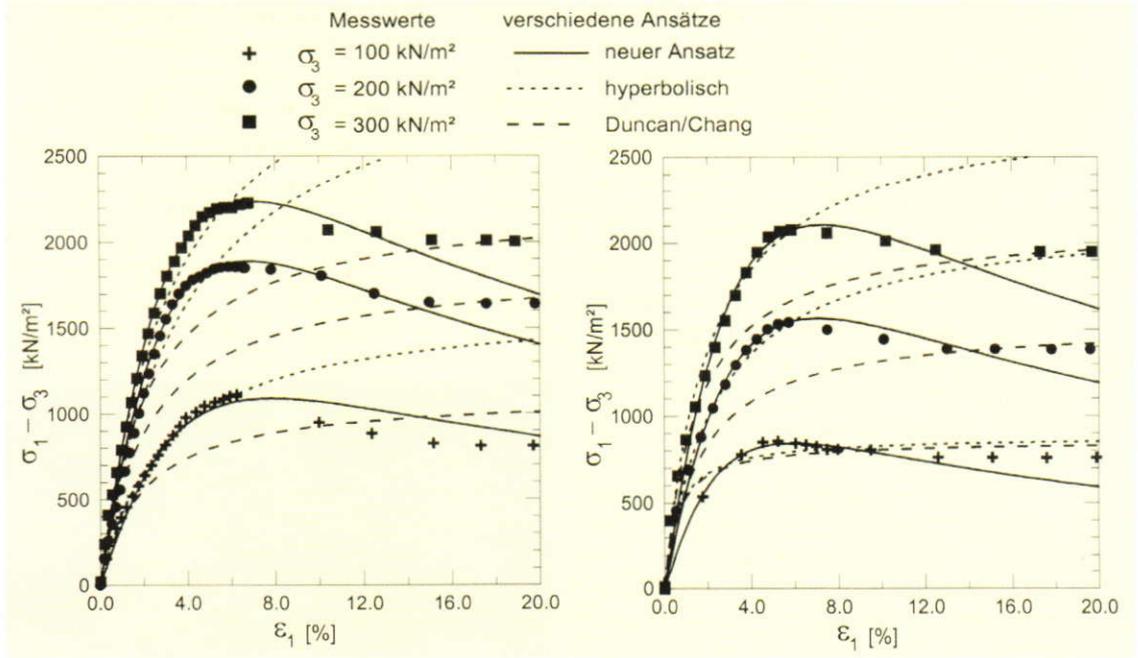


Bild 5. Mischung C, 180 Tage, BB = 105 μm , (CSH).



Bild 6. Mischung B, 360 Tage, BB = 23 μm , (Ettringit-Kristalle).

Bild 7. Gegenüberstellung von Messwerten mit verschiedenen Stoffansätzen; links Versuch C28, rechts Versuch C360.



de zur Erfassung der Dehnungs-Entfestigung bei hohen Axialdehnungen der ursprüngliche hyperbolische Ansatz von KONDNER/ZELASKO (1963) in eine Form weiterentwickelt, welche die Ausbildung eines Maximalwerts (weiterhin Peak) mathematisch wiedergibt und sich dem nicht ideal hyperbolischen Verlauf der Spannungs-Verformungs-Kurven besser anpasst (NEUMANN, 2000). Folgende Ansatzfunktion wird vorgeschlagen:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_1}{a + \hat{b} (\epsilon_1 + \epsilon_1^{\hat{c}})} \dots\dots\dots [1]$$

Darin sind :
 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ deviatorische Spannung,
 ϵ_1 axiale Verformung im Triaxialversuch,
 a, \hat{b}, \hat{c} Kurvenparameter.

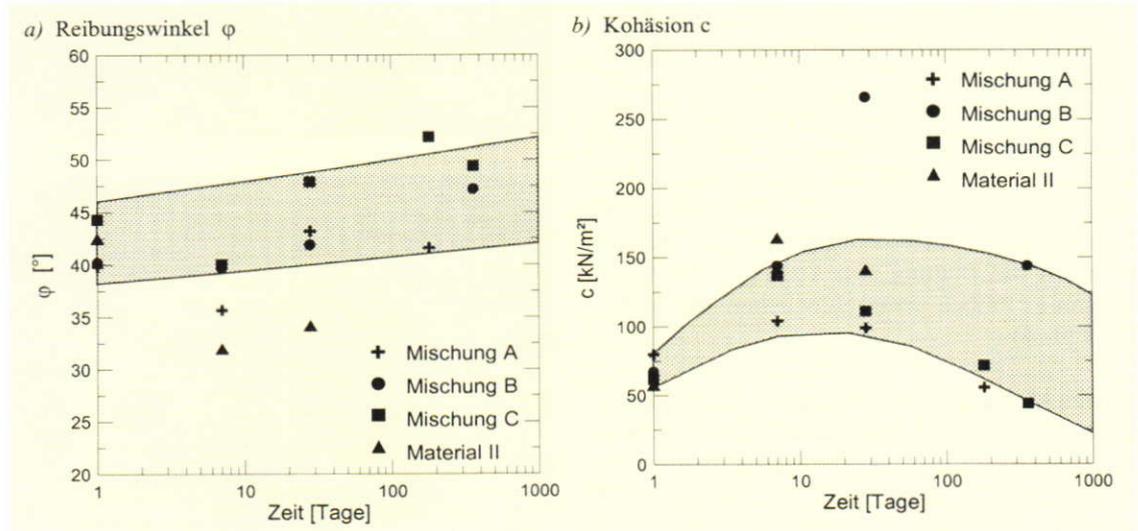
Exemplarisch sind für die Triaxialversuche C28 und C360 (vgl. Bild 7) die Messergebnisse dem erweiterten Ansatz, dem hyperbolischen Ansatz sowie dem Ansatz nach DUNCAN/CHANG (1970) gegenübergestellt.

Bild 8 zeigt alle Reibungswinkel und Kohäsionswerte der untersuchten Abfallroostaschen für Liegezeiten von einem Tag bis zu einem Jahr. Es wurde der erste Versuch unternommen, eine tendenzielle Entwicklung der Scherparameter zu beschreiben. Bei der graphischen Darstellung aller Reibungswinkel (vgl. Bild 8a) zeichnet sich ein Anstieg der Reibungswinkel um etwa 5° über den Zeitraum von einem Jahr ab, wobei die Bandbreite, mit der die Reibungswinkel bestimmt werden können, 10° beträgt. Diese große Bandbreite der Reibungswinkel wird auf zwei wesentliche, nicht kontrollierbare Eigenschaften zurückgeführt:

- ◇ Inhomogenität in der makroskopischen Zusammensetzung (Eigenschaften des Haufwerks bedingt durch stark unterschiedliche Kornform und Beschaffenheit),
- ◇ Inhomogenität in der chemischen Zusammensetzung (Neu/Umbildungsprozesse).

Bild 8b zeigt die Kohäsionswerte für alle Mischungen zu allen Zeitpunkten sowie den Ver-

Bild 8. Zeitliche Entwicklung der Scherparameter für Abfallroostaschen:
 a) Reibungswinkel ϕ ,
 b) Kohäsion c.



such, eine Tendenz abzuleiten. Nach ähnlichen Kohäsionswerten aller drei Mischungen an einem Tag steigt die Kohäsion an und fällt danach wieder ab. Ein Kohäsionsmaximum trat für die Mischungen A und C nach 7 Tagen, für die Mischung B nach 28 Tagen auf. Bei den Mischungen A und C verringerte sich der Endwert um etwa 30 % unter den nach einem Tag bestimmten Kohäsionswert, für Mischung B ist eine Zunahme von 115 % zu verzeichnen. Die maximalen Schwankungen betragen 108 % beziehungsweise 121 % für die Mischungen A und C und 296 % für die Mischung B. Eine Tendenz ist nicht ableitbar.

Als Ergebnis der Arbeit wurde deutlich, dass die Abfallroostasche ihr mechanisches Verhalten in Abhängigkeit von der Liegezeit bedingt durch chemisch-mineralogische Umwandlungen verändert. Als maßgebende, bodenmechanische Größe ergab sich der Wassergehalt. Auf der Basis der elastisch-plastischen Modelltheorie wurden mathematische Beschreibungen für die wesentlichen Modellparameter gefunden, die sich in Abhängigkeit von der Liegezeit, den Materialkenngrößen, den Einbaubedingungen und dem Spannungsniveau abschätzen lassen. Die weiteren Modellparameter wurden nur qualitativ untersucht. Zunächst gelten die Ergebnisse nur für die untersuchte Abfallroostasche, lassen sich aber gegebenenfalls auf andere Abfallroostaschen übertragen, sofern diese von den makroskopischen Eigenschaften insbesondere Körnungslinie und Kornform und von den mikroskopischen Eigenschaften, respektive mineralogische Zusammensetzung und damit verbundenes chemisches Reaktionspotenzial, vergleichbar sind. Rückschlüsse auf alle weiteren Verbrennungsrückstände sind nur bedingt zulässig.

Die Erfahrungswerte für die herkömmlichen Parameter aus Triaxialversuchen, die mit der untersuchten Abfallroostasche gewonnen wurden, sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Ausblick

Die vorgestellten Versuchsergebnisse stellen eine erste systematische Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Abfallroostaschen dar und zeigen deren Abweichungen von Böden auf. Insbesondere wurde die Veränderung der Eigenschaften mit der Liegezeit betrachtet, die in den Reihenuntersuchungen qualitativen Charakter tragen und die in den vertiefenden Untersuchungen für eine ausgewählte Abfallroostasche mit den chemischen Reaktionen korreliert wurden. Dies kann allerdings nur als erster Einstieg in die stoffliche Gesamtproblematik des mechanischen Verhaltens von Abfallroostaschen verstanden werden und lässt noch viele Fragen offen. Weitere fachübergreifende systematische Untersuchungen sind erforderlich, um für Abfallroostaschen eine annähernd zutreffende Prognose des mechanischen Verhaltens abgeben zu können.

Tabelle 5. Zusammenstellung der Materialparameter für die Abfallroostasche.

Modellparameter	Liegezeit [d]	Erfahrungswerte
E_i	1 360	53 – 83 MN/m ² 40 – 137 MN/m ²
φ	1 360	≈ 40 ° 47 – 50 °
c	1 360	62 – 80 kN/m ² 44 – 56 kN/m ²
ψ	1 360	7 – 12 ° 3 – 10 °

Quellennachweis

BURGER, CH. ; GRABE, J. ; RANKELMANN, U. (1995): *Materialuntersuchungen an Klärschlamm-aschen*. In: geotechnik 19, S. 162-170.

DUNCAN, J.M. ; CHANG, C.-Y. (1970): *Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils*. In: Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Proc. Paper 7513, S. 1329-1653.

GALLENKEMPER, B. ; REGENER, D. (1993): *Emissionsarmer Einsatz von Bauschutt, Straßenaufbruch und Rost- und Kesselasche aus der Müllverbrennung*. LWA-Materialien Nr. 10/93, Düsseldorf.

KEMPFERT, H.-G. (1981): *HEW – Bodenmechanische Untersuchungen an Steinkohlenflugasche*. Berichte 1 bis 3. Grundbauingenieure Steinfeld und Partner, Hamburg. Nicht veröffentlicht.

KONDNER, R.L. ; ZELASKO, J.S. (1963): *A hyperbolic stress strain formulation for sands*. Proc. 2nd Pan. Am. ICOSFE, Brazil, pp. 289-294.

LAHL, U. (1992): *Verwertung von MVA-Schlacken nach konventioneller Aufbereitung*. In: Müll und Abfall, Nr. 4/92.

LICHTENSTEIGER, T. (1996): *Müllschlacken aus petrologischer Sicht*. In: Die Geowissenschaften 14, Nr. 5, S. 173-179.

NEUMANN, J. (2000): *Untersuchung des zeitabhängigen Spannungs-Verformungs-Verhaltens einer Abfallroostasche*. Unveröffentlicht.

OTT, E. (2001): *Zum bodenmechanischen Verhalten von Abfallroostaschen*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität GH Kassel, Heft 11.

Glückauf
Glückauf-Forschungshefte
Geotechnik
Felsbau

VGE
Verlag Glückauf Essen

Postfach 18 56 20 · D-45206 Essen
Telefon +49 (0) 20 54 / 9 24-121
Telefax +49 (0) 20 54 / 9 24-129
E-Mail vertrieb@vge.de
Internet www.vge.de

Beiträge in Fachzeitschriften sind das aussagekräftigste (Werbe-) Mittel, Ihren Geschäftspartnern Ihr Know-how und dessen Anwendung praxisorientiert zu vermitteln.

Fordern Sie ein Angebot an über:

- Sonderdrucke – individuell nach Ihren Wünschen
- Fortdrucke – als kostengünstige Alternative

Sonderdrucke
Fortdrucke