

# Geotechnische Probleme bei mechanisch-biologisch aufbereitetem Abfall

## Geotechnické problémy v případě biologicko – mechanicky upraveného odpadu

J. Engel<sup>1</sup>, S. Geß<sup>2</sup>, E. Kammel<sup>3</sup>, S. Al-Akel<sup>4</sup>, C. Lauer<sup>5</sup>.

**Abstract:** Deponien sind im Sinne der Bautechnik Erdbauwerke, deren Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit rechnerisch nachzuweisen ist. Dies betrifft den Endzustand aber auch alle Zwischen- und Bauzustände. Für diese Nachweise müssen die Eigenschaften der Baustoffe durch Stoffgesetze beschrieben und die erforderlichen Kennwerte bereitgestellt werden. Mit der Ablagerung von mechanisch-biologisch aufbereitetem Abfall wird seit einigen Jahren ein neuartiges Material benutzt, dessen Eigenschaften u.a. von der Art der Herstellung und der Einbautechnologie abhängen. In diesem Beitrag werden die ersten Ergebnisse von Untersuchungen zur Beurteilung von MBA Material der Zentraldeponie Cröbern vorgestellt. Dies umfasst Laborversuche und Ergebnisse von Standsicherheits- und Verformungsberechnungen.

**Abstract:** Skládky jsou ve smyslu stavební techniky zemními stavbami, jejichž stabilita a využití je nutno doložit propočtem. To se týká jak koncového stavu, tak všech dílčích a stavebních stavů. K tomu je zapotřebí pospat vlastnosti stavebních hmot prostřednictvím látkových zákonů a poskytnout požadované hodnoty. Společně se skládkováním mechanicko – biologicky upraveného odpadu se již několik let používá nový materiál, jehož vlastnosti závisí mimo jiné na způsobu výroby a technologii aplikace. V tomto příspěvku jsou prezentovány první výsledky průzkumů pro posouzení MBA materiálů pro ústřední skládku Cröbern. Obsaženy jsou laboratorní pokusy a výsledky propočtu stability a formování.

## 1 Einführung

### 1.1 MBA Material, Untersuchungen an Material aus Cröbern

Nach der "Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen" (Abfallablagerungsverordnung) ist die Ablagerung von unbehandeltem Abfall seit Juni 2005 nicht mehr zulässig. Die mechanisch biologische Abfallbehandlung (MBA) von Siedlungsabfällen stellt ein Behandlungsverfahren dar, mit dem die Einhaltung der vorgegebenen

---

<sup>1</sup> Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Friedreich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Tel.: +49 / 351 / 462 2352, E-Mail: engel@htw-dresden.de

<sup>2</sup> FCB Fachbüro für Consulting und Bodenmechanik GmbH, Verwaltungsring 10, D-04579 Espenhain, Tel.: +49 / 34206 / 743 770, E-Mail: gess@bodenmechanik.de

<sup>3</sup> Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT) an der HTW Dresden, Friedreich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Tel.: +49 / 351 / 462 3667, E-Mail: kammel@htw-dresden.de

<sup>4</sup> Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT) an der HTW Dresden, Friedreich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Tel.: +49 / 351 / 462 3647, E-Mail: al-akel@htw-dresden.de

<sup>5</sup> Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Friedreich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Tel.: +49 / 351 / 462 3627, E-Mail: lauer@htw-dresden.de

Grenzwerte möglich ist. Das Endprodukt des Aufbereitungsprozesses ist ein Material (MBA-Material) dessen Eigenschaften wesentlich von den Abläufen beim Sortieren, der Zerkleinerung und der Verrottung bestimmt werden.

Nach bisherigen Erkenntnissen führt die Abfallbehandlung zu höheren Dichten, Verringerung der Wasserdurchlässigkeit, sowie einer veränderten Scherfestigkeit. Mittels bodenmechanischer Untersuchungen können die Eigenschaften des MBA-Materials ermittelt und anschließend auf praktische Problemstellungen angewandt werden. Da es deutschlandweit eine Vielzahl unterschiedlicher MBA-Anlagen gibt, sind auch die Eigenschaften des neuen Materials teilweise unterschiedlich. Erfahrungen hinsichtlich der Kennwerte, die für bautechnische Fragestellungen von Interesse sind, liegen noch nicht in umfassender Form vor.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Definition eines zeitabhängigen Stoffmodells zur Quantifizierung und Überwachung der Einbauparameter von MBA-Material“ wurden gezielt die Stoffeigenschaften des MBA-Materials der Deponie Cröbern durch Labor- und Felduntersuchungen ermittelt. Hierdurch lässt sich das Material hinreichend genau beschreiben. Im Ergebnis dieses Forschungsvorhabens soll ein Stoffmodell entwickelt werden, das die zahlenmäßige Beschreibung des Verhaltens von MBA-Material der Deponie Cröbern ermöglicht. **An diesem Projekt sind neben dem Projektpartner I (Zentrum für angewandte Forschung und Technologie ZAFT e.V.), der die theoretischen Arbeiten und ausgewählte Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit und der hydraulischen Eigenschaften ausführt, die Projektpartner II (GGB Gesellschaft für Geomechanik und Baumeßtechnik mbH, Espenhain) und Projektpartner III (FCB Fachbüro für Consulting und Bodenmechanik GmbH, Espenhain) beteiligt.**

## 1.2 Berechnungsverfahren, geotechnische Grundlagen

Deponien sind Bauwerke, die bautechnisch geplant, bemessen und während der Herstellung kontrolliert und überwacht werden müssen. Nach den Regeln der Baukunst ist der Nachweis der Standsicherheit für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu erbringen. Da es sich bei Deponien um Erdbauwerke handelt, gelten für die statischen Nachweise die entsprechenden Bemessungsverfahren und Normen. Das grundsätzliche Vorgehen bei allen Nachweisen ist der Vergleich der rechnerischen Beanspruchungen mit den rechnerischen Widerständen. Zur zahlenmäßigen Beschreibung des Widerstands der Konstruktion müssen die Materialeigenschaften durch Kennwerte quantifiziert werden. Die grundlegenden bodenmechanischen Stoffgesetze, die dafür benutzt werden, sind nachfolgend aufgeführt.

$$E_s = \frac{d\sigma}{de}(1+e) = \nu\sigma_{at} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{at}} \right)^w \quad (1.1)$$

$$\tau_f = \sigma_n' \tan \varphi' + c' \quad (1.2)$$

$$k = \frac{\nu}{i} \quad (1.3)$$

Mit den Ansätzen nach Gl. 1.1-1-3 werden in Bodenmechanik und Grundbau die Zusammendrückbarkeit, die Scherfestigkeit und die Durchlässigkeit zahlenmäßig erfasst. Für die eigentlichen Nachweise wird die Wechselwirkung zwischen Baugrund und Bauwerk durch bestimmte Idealisierungen den Berechnungen vereinfacht.

Diese Rechenverfahren sind nach dem Stand der Technik in Regelwerken und Normen beschrieben. Für den Nachweis des Grenzzustands der Tragfähigkeit gelten beispielsweise zur Berechnung der Böschungstabilität die DIN 4084, oder für den Nachweis der Spreizsicherheit das entsprechende DVWK Merkblatt. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird nachgewiesen, dass die Scherfestigkeit des Untergrunds ausreichend groß ist. Damit lassen sich aus den Berechnungen Mindestwerte der Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  ableiten.

Beim Nachweis des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 sind vorrangig Verformungskriterien einzuhalten. Für die Berechnung der Setzungen gilt DIN 4019. Die Begrenzung der Setzungen bzw. der Setzungsunterschiede dient der Gewährleistung der Funktionsfähigkeit der Entwässerung, d.h. der Einhaltung des Mindestgefälles während der Bauphasen und nach Erreichung der vollen Deponiehöhe. Aus den Berechnungen ergeben sich Mindestanforderungen an den Steifemodul  $E_s$ . Bei allen Nachweisen ist die Strömung im Boden zu beachten. Sie führt bei Setzungen zu zeitlichen Verzögerungen, die sich rechnerisch vorhersagen lassen, oder wirkt als Strömungskraft auf das Korngerüst, was bei Standsicherheitsberechnungen zu beachten ist.

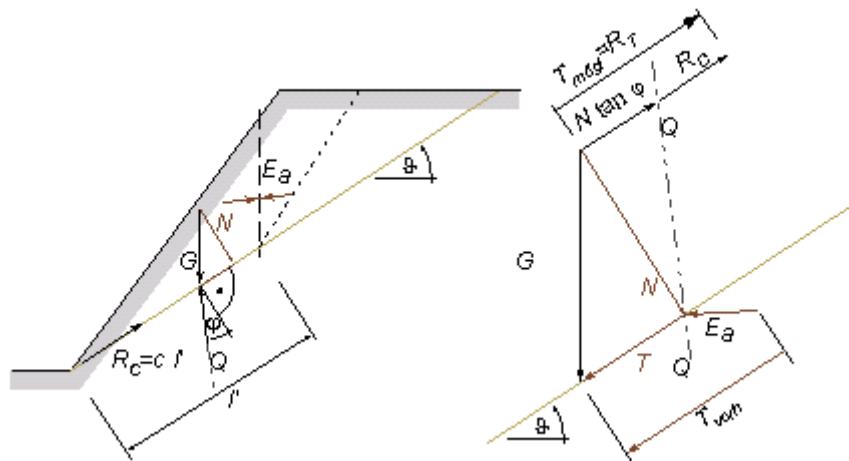


Abbildung 1: Modell der Berechnung der Standsicherheit bei ebener Gleitfläche

Die vorstehend skizzierte Verfahrensweise basiert auf der klassischen Trennung in Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Die Stoffgesetze der Gl. 1.1-1.3 entsprechen ebenfalls dieser Verfahrensweise. Für die wirklichkeitsnahe Quantifizierung des realen Materialverhaltens und der Wechselwirkung Bauwerk-Baugrund ist die komplexe Beschreibung der Vorgänge erforderlich. Dies ist zum Beispiel mit der Methode der Finiten Elemente und höherwertigen Stoffgesetzen möglich. Umfassendere Stoffgesetze müssen in der Lage sein, die Veränderung der Scherfestigkeit, der Zusammendrückbarkeit und der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Zeit, des Spannungszustands und des Bodenzustands beschreiben zu können. Das Ergebnis der numerischen Berechnungen sind i. Allg. Kraft-Verschiebungs-Kurven ausgewählter Bereiche. Mittels messtechnischer Überwachung können die Ergebnisse überprüft und unter Umständen die Berechnungen angepasst werden. Auch im Ergebnis von

numerischen Simulationen lassen sich Grenzwerte für Kennwerte ableiten, die während der Errichtung des Bauwerks kontrolliert werden können.

### 1.3 Grundlagen des Erdbaus, Parameter und Zustandsgrößen

In den Ansätzen gemäß Gl. 1.2-1.3 werden Kennwerte in Abhängigkeit vom Spannungsniveau  $\sigma$  bzw. dem hydraulischen Gefälle  $i$  definiert. Die Materialeigenschaften sind aber in starkem Maße abhängig vom Zustand des Bodens. So nimmt die Durchlässigkeit  $k$  mit zunehmender Dichte ab, weil durch Verdichtung die Porenkanäle verringert werden. Scherfestigkeit  $\tau_f$  und Setzungswiderstand  $E_S$  nehmen dagegen mit steigender Dichte zu. Die entsprechenden Materialparameter verändern sich daher in Abhängigkeit vom Zustand. In der Bodenmechanik wird der Materialzustand mit der Lagerungsdichte oder der Konsistenz beschrieben.

Bei der Errichtung von Erdbauwerken lässt sich der Zustand des Materials gezielt durch den Vorgang des Schüttens und Verdichtens beeinflussen. Der erforderliche Zustand des Bodens, d.h. die Dichte, wird in Abhängigkeit der aus den Nachweisen abgeleiteten Mindestwerte für die Parameter  $E_S$ ,  $\varphi$ ,  $c$  und  $k$ , angegeben. In der Praxis wird damit bei der Gütekontrolle im Erdbau die Überwachung der Materialkennwerte durch die Kontrolle des Verdichtungsgrads ersetzt.

Als Bezugsgröße für die Beurteilung des Verdichtungserfolgs wird die maximal erreichbare Trockendichte bei einer bestimmten Verdichtungsenergie benutzt. Die Ermittlung der Proctordichte erfolgt mit einer Verdichtungsarbeit von  $W=600 \text{ kNm/m}^3$ . Bei Verdichtung des Bodens mit unterschiedlicher Energie liegen die Scheitelpunkte der Proctorkurven annähernd auf einer Linie gleicher Sättigung, die hier als optimale Sättigung  $S_{r,opt}$  bezeichnet wird. Für viele mineralische, bindige Böden liegt dieser Sättigungsgrad im Bereich  $0,83 \leq S_{r,opt} \leq 0,9$ .

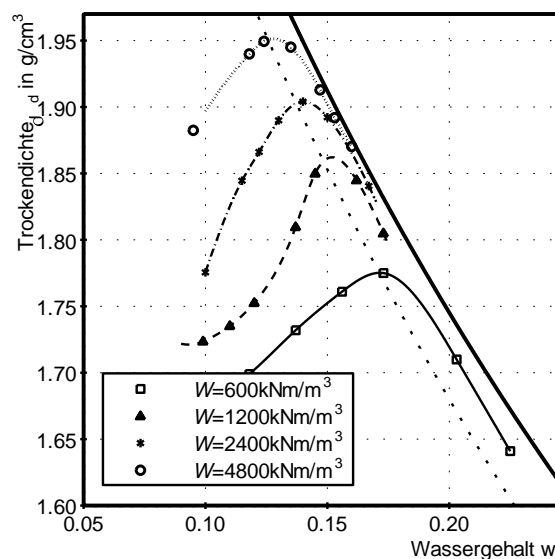


Abbildung 2: Verdichtungskurven bei unterschiedlicher Verdichtungsenergie

Zur zahlenmäßigen Erfassung der Volumen- oder Massenverhältnisse im Boden werden drei experimentell zu bestimmende Kennwerte benötigt. Dies sind der gravimetrische Wasser-

gehalt  $w$ , die Dichte  $\rho$  und die Korndichte  $\rho_s$ . Wegen der großen Bedeutung dieser Kennwerte für die Qualitätsüberwachung sind die Verfahren für ihre experimentelle Bestimmung in Normen geregelt. Diese Normen werden ständig auf dem aktuellen Stand der Technik gehalten und weiterentwickelt.

Im Zusammenhang mit der Nutzung des Proctorversuchs hat die Darstellung Trockendichte-Wassergehalt weite Verbreitung in der geotechnischen Praxis erlangt. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse von Verdichtungsversuchen bei unterschiedlichen Energien in der bekannten Auftragung dargestellt. Linien gleicher Sättigung sind gekrümmte Kurven und abhängig von der Korndichte.

## **1.4 Bewertung der Eigenschaften von Böden, Klassifizierung**

Bei der Bearbeitung von Fragestellungen in Grundbau und Bodenmechanik ist aus dem Ergebnis weniger Untersuchungen das Verhalten ausgedehnter Bereiche des Baugrunds vorherzusagen. Als Grundlage dafür wird die Benennung und Beschreibung und die Klassifizierung der Böden benutzt. Mit der Benennung werden die wichtigsten Merkmale des Untergrunds so beschrieben, dass die Zusammenfassung von Bodenschichten und damit die Vereinfachung des Schichtenaufbaus möglich sind. Die Benennung regelt DIN EN ISO 14688-1. Im Gegensatz dazu wird mit der Klassifizierung nach DIN 18196 der Boden einer Gruppe mit ähnlichen geotechnischen Eigenschaften zugeordnet. Dies ermöglicht die Übertragung der Ergebnisse von Untersuchungen sowie die Berücksichtigung von Erfahrungen, die an ähnlichen Böden gewonnen worden sind. Grundlage der Einteilung der Bodenarten sind die Korngrößenverteilung, die Anteile organischer Beimengungen, die Konsistenzgrenzen und u. U. die Grenzlagerungsdichten.

Das Prinzip der Klassifizierung ist von grundlegender Bedeutung bei der Bearbeitung geotechnischer Projekte. Bei einfachen Problemen werden die eigentlich interessierenden Berechnungskennwerte allein aus den Ergebnissen der Klassifizierung abgeleitet.

# **2 Stoffgesetze und Kennwerte für MBA-Material**

## **2.1 Klassifizierung, Zustandsbeschreibung**

MBA-Material entsteht als Ergebnis einer technischen Abfallbehandlung, die sich aus unterschiedlichen Verfahrensschritten zusammensetzt. Die entsprechenden Produktionsanlagen sind sehr komplex aufgebaut und die eingesetzten Methoden der Trennung, Zerkleinerung und Verrottung des Materials können sich im Detail unterscheiden. Die Eigenschaften des Endprodukts werden von diesem Prozess wesentlich beeinflusst. Ähnlich wie bei Böden ist die Einteilung des MBA-Materials in Gruppen nötig. Auch die zutreffende Beschreibung des Zustands ist sinnvoll, da die Eigenschaften neben der Zusammensetzung auch von der Dichte und dem Wassergehalt abhängen.

Da die Korngrößenverteilung, speziell der Anteil der groben Fraktion, einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des MBA-Materials hat, ist die Kenntnis dieses Klassifikationsmerkmals für Vergleichszwecke wichtig. Der maximale Korndurchmesser wird durch die Absiebung in der mechanischen Behandlungsstufe und der mechanischen Nachbehandlung bestimmt. Die biologische Behandlung beeinflusst dagegen auch die Kornvertei-

lungskurve insgesamt. Mit zunehmender Rottedauer nimmt nach [1] der Anteil der Kornfraktion < 20 mm zu. In Abbildung 3 sind beispielhaft Sieblinien von Material der MBA Lüneburg mit unterschiedlicher Rottedauer sowie von Grobsand und Kies 8/16 dargestellt. Es ist der Einfluss der Behandlungsdauer auf die Kornverteilung des MBA Materials zu erkennen.

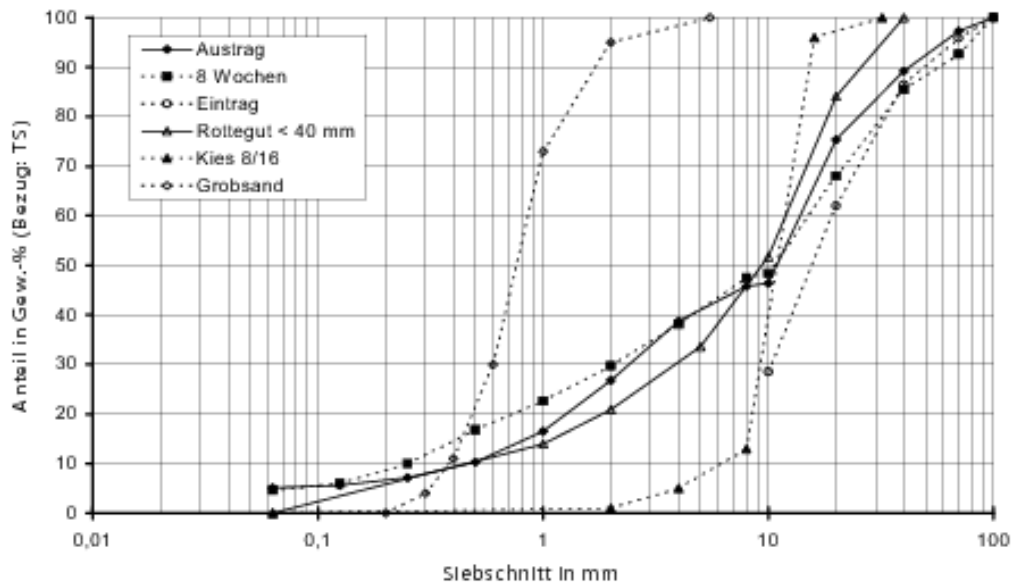


Abbildung 3: Korngrößenverteilung von MBA-Material und von Grobsand und Kies [1]

## 2.2 Grundlagen der Verdichtungskontrolle

Die Verdichtung von MBA-Material ist vom Wassergehalt abhängig und unterliegt prinzipiell ähnlichen Gesetzmäßigkeiten wie mineralische Böden. Proctorversuche nach DIN 18127 [4] lassen sich als Grundlage der Beschreibung des Verdichtungsverhaltens auch für MBA-Material einsetzen. Der Verlauf der Proctorkurve und die Proctorkennwerte sind für ein Material charakteristisch und können u. U. für die Klassifizierung genutzt werden. Proctordichte und der Proctorwassergehalt von MBA-Materialien streuen relativ weit.

In der Abfallwirtschaft wird der Wassergehalt im Gegensatz zur Bodenmechanik häufig als Massenanteil bezogen auf die Feuchtmasse (Feuchtsubstanz FS) angegeben. In der Praxis werden Einbautrockendichten von 1,0 bis 1,2 g/cm<sup>3</sup> erreicht. Üblich ist der Einbau des MBA Materials mit einem Wassergehalt auf der trockenen Seite [9], [10] der Proctorkurve. Dies wird empfohlen, um mögliche Niederschläge während des Einbaus kompensieren und das Auftreten von Porenwasserdrücken vermeiden zu können.

## 2.3 Zusammendrückbarkeit

Wird ein Material einer Belastung durch Druckspannungen ausgesetzt, führt dies zu einer Volumenabnahme. Bei mineralischen Böden beruht diese Zusammendrückung praktisch vollständig auf der Verringerung des Porenraums. Demgegenüber ist bei MBA Material die Kompressibilität der einzelnen „Partikel“ nicht vernachlässigbar, so dass sich die Volumenabnahme aus der Abnahme des Porenraums und der Zusammendrückung der festen Abfallbestandteile zusammensetzt [8]. Vor allem die Grobfraktion von MBA-Material enthält einen großen Anteil an komprimierbaren Kunststoffen, was die Zusammendrückung beeinflusst.

Experimentell lässt sich die Zusammendrückbarkeit am einfachsten im Ödometerversuch untersuchen. Es wird bei diesem Versuch eine zylindrische Probe, deren radiale Verformungen durch einen Ring behindert werden, vertikal belastet und die Verformungen in Abhängigkeit der Belastung und der Zeit werden gemessen [14]. Die Auswertung der Drucksetzungs-Linie liefert den Steifemodul  $E_s$  gemäß Gl. 1.1 und die Auswertung der Zeitsetzungs-Kurven liefert Kennwerte, mit denen die Konsolidation und das Kriechverhalten des Materials beschrieben werden kann.

## 2.4 Scherfestigkeit

Die Grundlage der Quantifizierung der Scherfestigkeit ist das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium mit den Parametern Reibungswinkel  $\phi'$ , der Kohäsion  $c$  und gegebenenfalls dem Dilatanzwinkel  $\psi$ . Aufgrund von faserartigen Anteilen kommt es bei Abfall zu einem Bewehrungseffekt, der den Scherwiderstand erhöht.

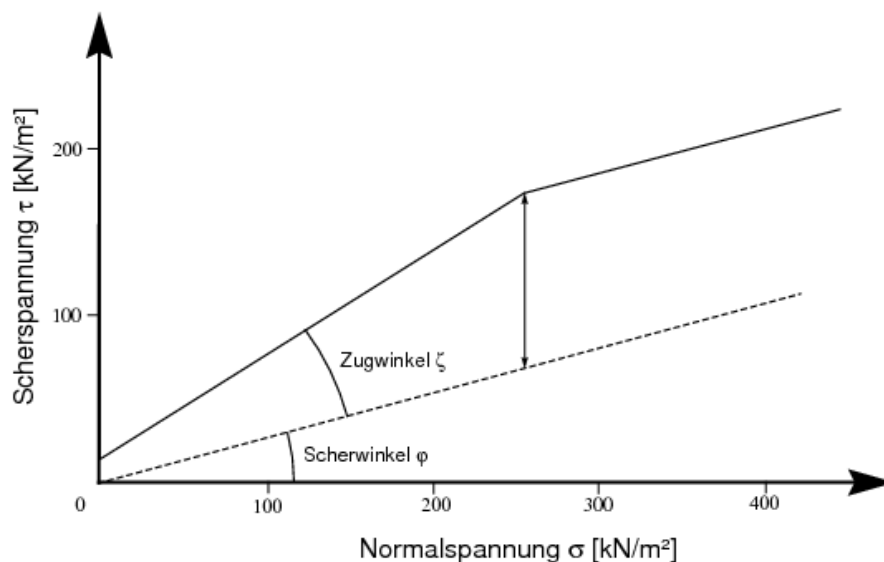


Abbildung 4: Scherfestigkeit von Abfall

In der Abfallwirtschaft wird dafür der Zugspannungswinkel  $\zeta$  als zusätzlicher Parameter eingeführt [11]. Mit diesem lässt sich die Zugfestigkeit des Abfalls erfassen. In Abbildung 4 ist das entsprechende Festigkeitsmodell dargestellt. Die Höhe des Zugspannungswinkels wird durch den Anteil und die Beschaffenheit der faserartigen Elemente bestimmt. Infolge der mechanisch-biologischen Behandlung des Abfalls werden diese Anteile allerdings deutlich reduziert, was mit einer Abminderung des Zugwinkels einhergeht. Bei Absiebung der groben Bestandteile auf einen Siebschnitt  $<60$  mm geht der Zugwinkel gegen null. Nach [8] ist davon auszugehen, dass dies bei den meisten zukünftigen MBA Materialien so sein wird, d. h. der Zugspannungswinkel  $\zeta$  darf hier vernachlässigt werden und das Bruchkriterium geht über in das klassische Mohr-Coulomb-Modell.

### 3 Ergebnisse der Untersuchungen an MBA Material Cröbern

#### 3.1 Klassifizierung, Korngrößenverteilung

Die mittels Trockensiebungen [3] ermittelte Korngrößenverteilung des MBA Materials Cröbern ist in Abbildung 5 dargestellt. Anhand der Sieblinie kann eine Benennung und Klassifizierung des Materials in Anlehnung an die bautechnische Vorgehensweise erfolgen. Der Feinkornanteil ( $d < 0,063 \text{ mm}$ ) liegt bei 1,3 % und damit unter der 5 %-Grenze, weshalb das Material als nichtbindig einzustufen ist. Nach den Partikelgrößen wäre das Material ein Kies, grobsandig, schwach mittelsandig (G, gs, ms'). Aufgrund der Ungleichförmigkeitszahl von  $U > 6$  und der Krümmungszahl  $C_c < 1$  ist das MBA-Material hinsichtlich der Bodengruppe als intermittierend gestuft einzuordnen. Inwieweit sich diese Klassifizierungsparameter für die näherungsweise Angabe der Berechnungskennwerte nutzen lassen, kann nur durch die Sammlung von Erfahrungen mit unterschiedlichen MBA-Materialien untersucht werden.

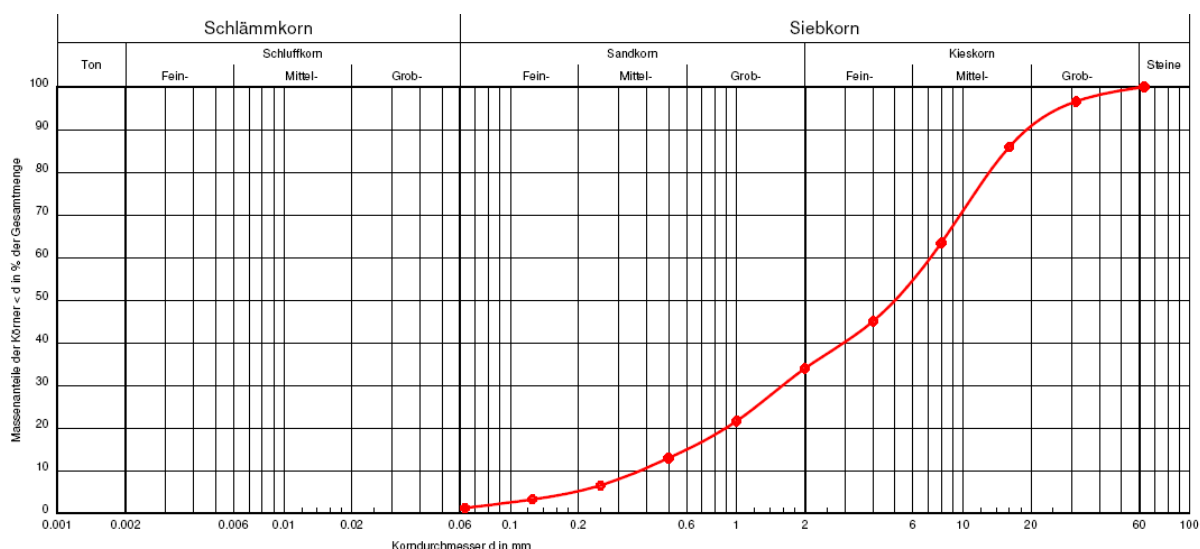


Abbildung 5: Korngrößenverteilung (Sieblinie) des MBA Materials Cröbern

#### 3.2 Verdichtungsverhalten

##### 3.2.1 Proctordichte

Zur Ermittlung der Proctordichte wurden zwei Versuche an Material mit einem Größtkorn von 31,5 mm im B-Proctorzylinder mit einem Innendurchmesser von 150 mm durchgeführt [4]. Es wurden pro Versuch fünf Proben mit unterschiedlichen Wassergehalten in drei Lagen eingebaut, die mit jeweils 22 Schlägen und einem Fallgewicht von 4,5 kg verdichtet wurden. Im Anschluss ist die Dichte und der Wassergehalt bestimmt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt und die Proctorkurven befinden sich in Abbildung 6. Auffallend ist der unterschiedliche Verlauf der Kurven und die unterschiedliche Streubreite.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Proctorversuche

Versuch Nr.	Proctorwassergehalt $w_{Pr} [-]$	Proctordichte $\rho_{Pr} [\text{g}/\text{cm}^3]$
1	0,33	1,11
2	0,33	1,08



### 3.2.2 Einbaudichte in situ

Zur Untersuchung des Verdichtungsverhaltens in situ sind auf der Zentraldeponie Cröbern Testfelder angelegt und beprobt worden. Diese wurden vor dem Befüllen, unmittelbar nach Einbau des Materials und nach 7 Tagen geodätisch eingemessen. Zur Feststellung der lokalen Dichte des MBA Materials sind außerdem Proben mit dem Densitometerverfahren (Wasserersatzmethode) entnommen worden, wobei der Durchmesser der Entnahmeform 45 cm betrug. Tabelle 2 enthält die gemittelten Einbaudichten bei unterschiedlichen Verdichtungsgeräten.

Tabelle 2: Ergebnisse der Einbauversuche im Testfeld

Verdichtungsgerät	Wassergehalt $w$ [-]	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Trockendichte $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Planierraupe	0,30	1,40	1,08
Kompaktor	0,31	1,47	1,13

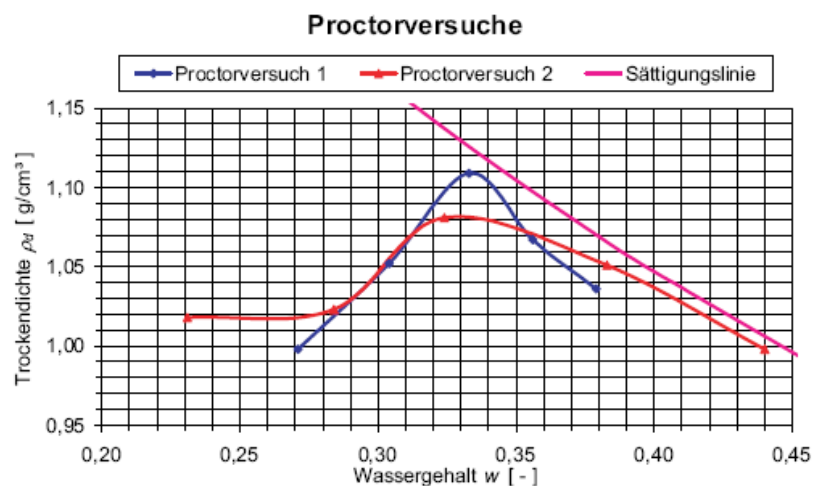


Abbildung 6: Proctorkurven des MBA Materials Cröbern

Beim Einbau mit dem Kompaktor wurde die größere Dichte erzielt. Mit der Annahme einer Korndichte von  $\rho_s=1,80$  g/cm<sup>3</sup> ergibt sich eine rechnerische Dichte bei Sättigung von 1,48 bzw. 1,50 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3 Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit des MBA-Materials Cröbern wurde im Labor an sechs gestörten Proben mit unterschiedlichem Größtkorn (4 mm und 10 mm) untersucht. Zur Herstellung der Probekörper wurde das Material in einem Proctorgerät unter Verwendung eines A-Zylinders in drei Lagen eingebaut und mit je 25 Schlägen verdichtet. Die Bestimmung der Durchlässigkeit erfolgte anschließend bei einem konstanten hydraulischen Gefälle von  $i=30$ , wobei die Durchströmung von unten nach oben stattfand. Es wurde solange durchströmt, bis ein konstanter Durchfluss festgestellt werden konnte.

Tabelle 3: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche

Zi.	Größtkorn $d_{Max}$ [mm]	Anfangswasser- gehalt $w_A$ [-]	Anfangstrocken- dichte $\rho_{dA}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Durchlässigkeits- beiwert $k_{10}$ [m/s]	Durchlässigkeitsbe- iwert $k_{20}$ [m/s]
1	4	0,38	0,93	$8,0 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
2	4	0,41	0,88	$5,7 \cdot 10^{-10}$	$7,4 \cdot 10^{-10}$
3	4	0,38	0,89	$6,8 \cdot 10^{-10}$	$8,8 \cdot 10^{-10}$
4	4	0,38	0,90	$8,3 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
5	10	0,34	0,98	$7,9 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
6	10	0,34	0,97	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$8,7 \cdot 10^{-10}$

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Versuche dargestellt. Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte liegen im Mittel bei ca.  $7 \cdot 10^{-10}$  m/s. Dies entspricht einem „sehr schwach durchlässigen“ Material [5]. Nur bei mineralischen Böden mit hohem Feinkornanteil sind diese geringen Durchlässigkeiten zu erwarten.

Die Bezeichnungen  $k_{10}$  bzw.  $k_{20}$  in Tabelle 3 bedeuten den Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Temperatur von 10°C bzw. 20°C. Innerhalb des abgelagerten MBA-Materials kommt es infolge restlicher chemischer Prozesse zu einer Wärmeentwicklung, was mit einem Anstieg der Wassertemperatur einhergeht. Die Annahme des  $k_{20}$ -Werts ist demnach zumindest während der restlichen Rotteprozesse realistischer.

### 3.4 Einaxiale Druckfestigkeit

Zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit wurden insgesamt 15 einaxiale Druckversuche an MBA-Material durchgeführt. Die Probenabmessungen entsprechen hinsichtlich des Verhältnisses der Probenhöhe  $h_A$  zu Probendurchmesser  $d_A$  nicht immer den Empfehlungen der DIN 18136 [6] von  $h_A/d_A=2$ . In Tabelle 4 sind die Randbedingungen und Ergebnisse der einzelnen Versuche angegeben.

Tabelle 4: Übersicht über die durchgeführten einaxialen Druckversuche

Ver- such	Größt- korn [mm]	Belastungsge- schwindigkeit $v$ [mm/min]	Anfangs- dichte $\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Druckfestig- keit $q_{u,korr}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Axiale Ver- formung $\varepsilon$ [%]	Ver- hältnis $h/d$ [-]	Verformungs- modul $E_u$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	4	1,30	1,36	76,32	4,01	1,30	3781
2	4	1,25	1,46	62,02	2,86	1,30	3372
3	4	1,30	1,24	93,64	9,33	1,30	2416
4	4	1,30	1,47	62,40	2,62	1,30	3461
5	10	1,30	1,40	115,78	19,51	1,30	2633
6	60	0,40	1,55	90,32	16,59	2,00	815
7	60	2,00	1,54	172,23	16,40	2,00	1327
8	16	2,00	1,57	99,84	10,31	2,00	1163
9	16	2,00	1,56	168,82	8,43	2,00	2553
10	16	2,00	1,57	188,28	8,52	2,00	2599
11	16	2,00	1,56	139,78	9,72	2,00	1710
12	16	2,00	1,48	136,62	9,60	2,00	1782
13	16	2,00	1,39	91,86	8,77	2,00	1238
14	16	2,00	1,32	68,71	8,65	2,00	948
15	16	2,00	1,44	204,02	8,56	2,00	2855

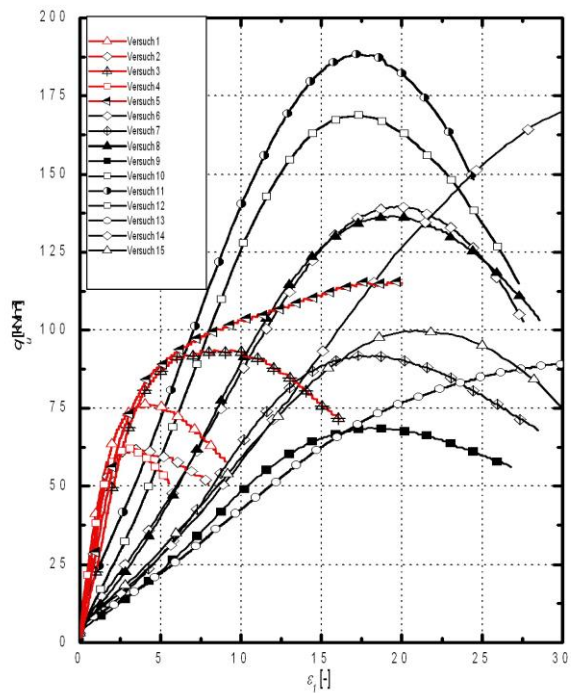


Abbildung 7: Ergebnisse von einaxialen Druckversuchen

### 3.5 Scherfestigkeit

#### 3.5.1 Rahmenscherversuche

Zur Bestimmung der Scherparameter von MBA-Material wurden Großrahmenscherversuche (100 cm x 100 cm) durchgeführt. Es wurde dafür Material mit der Körnung 0 - 60 mm verwendet. Die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  wurde mit 10 mm/h in Anlehnung an die GDA-Empfehlungen [13] gewählt. Bei der Auswertung ist der veränderliche Wassergehalt berücksichtigt worden. Dazu wurden die Versuche in zwei Versuchsreihen unterteilt.

In Abbildung 8 sind die Scherspannungs-Scherweg-Diagramme und in Abbildung 9 die Scherspannungs-Normalspannungs-Diagramme für beide Versuchsreihen dargestellt.

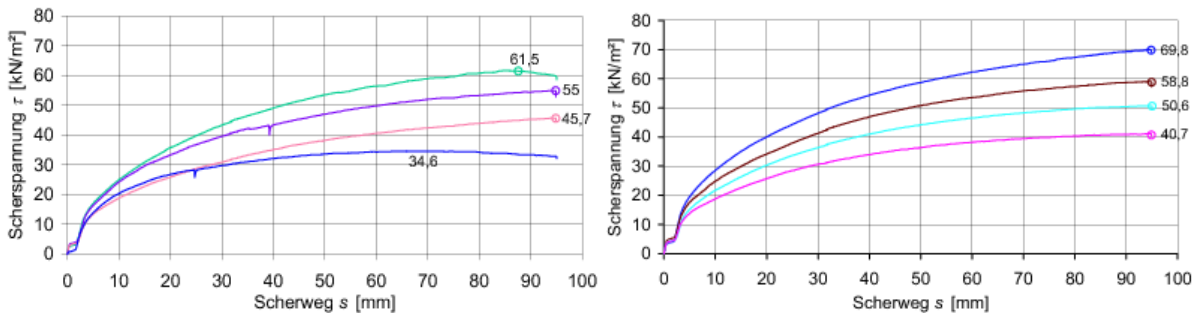


Abbildung 8: Mobilisierung der Scherfestigkeit im Rahmenscherversuch

Aus den  $\tau$ - $s$ -Diagrammen ist ersichtlich, dass bei einem Großteil der Versuche kein klarer Bruch erkennbar ist, die Scherspannung also bis zum Ende des maximalen Scherwegs von 95 mm ansteigt. Alle Proben wurden mit einer Dichte  $\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$  eingebaut, woraus sich

die mittleren Trockendichten  $\rho_d = 0,93 \text{ g/cm}^3$  bei Versuchsreihe 1 und  $0,96$  bei Versuchsreihe 2 ergeben.

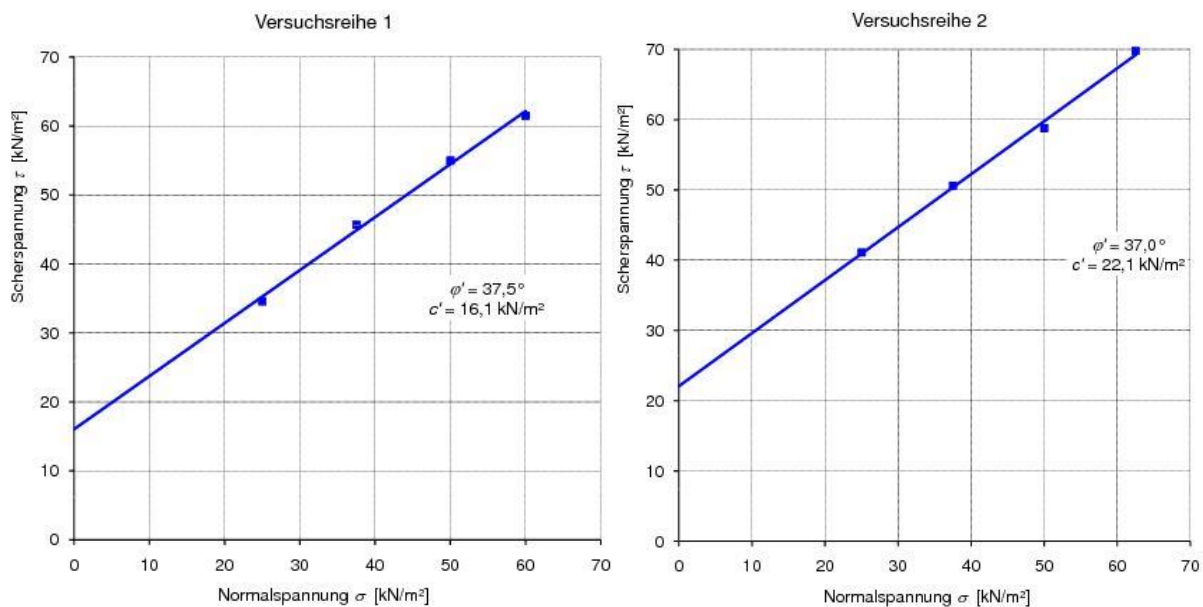


Abbildung 9: Ergebnisse der Scherversuche, Scherspannung gegen Normalspannung

Während der Reibungswinkel  $\varphi$  bei beiden Versuchsreihen annähernd konstant ist, kann bei der Versuchsreihe 2, die einen geringeren mittleren Wassergehalt aufweist, eine etwas höhere Kohäsion festgestellt werden (siehe Abbildung 9).

Die Durchführung der Versuche erfolgte bei Normalspannungen bis  $75 \text{ kN/m}^2$ . Auf einer Deponie sind Auflasten in Größenordnungen zu erwarten, die sehr viel höhere Normalspannungen erzeugen. In [1] ist in den Anforderungen zur Bestimmung der Festigkeit von Abfällen geregelt, dass die einzustellenden Laststufen die auftretenden Vertikalspannungen im Deponekörper umfassen müssen. Beim Mohr-Coulombschen Bruchkriterium wird von einem linearen Zusammenhang zwischen der Scherspannung  $\tau$  und der Normalspannung  $\sigma$  ausgegangen, so dass die Parameter Reibungswinkel und Kohäsion unabhängig vom Spannungsniveau sind.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Scherversuche

Parameter	Schergerade 1	Schergerade 2
Wassergehalt [-]	0,41	0,36
Dichte [ $\text{g/cm}^3$ ]	1,31	1,31
Reibungswinkel [ $^\circ$ ]	37,5	37,0
Kohäsion [ $\text{kN/m}^2$ ]	16,1	22,1

### 3.5.2 Triaxialversuche

Triaxialversuche ermöglichen die Untersuchung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens unter radialsymmetrischen Spannungszuständen. Mit dieser Versuchstechnik ist es außerdem möglich, die Porendrücke zu kontrollieren. An dem MBA-Material ist ein Triaxialversuch als konsolidierte, undrainierte Versuche (CU) durchgeführt worden. Dafür wurde das Material auf ein Größtkorn von  $10 \text{ mm}$  abgesiebt. Zur Vermeidung von Beschädigungen der Gummihülle mussten außerdem die vorhandenen Glasscherben entfernt werden. Da die Probenherstel-

lung sehr aufwendig ist, wurden alle drei Belastungsstufen des Versuchs an einer Probe durchgeführt (Mehrstufenversuch). Nach Abschluss der Konsolidationsphase wurde das Abscheren eingeleitet, wobei der Vorgang vor Eintreten des Bruchs unterbrochen und die Probe unter der nächsten Belastungsstufe erneut konsolidiert wurde. Es sind drei Spannungsniveaus (Laststufen) untersucht worden. Erst bei der letzten (dritten) Abscherphase wurde die Probe vollständig abgeschert. Die Ergebnisse sind für verschiedene Dehnungen in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Scherparameter aus Triaxialversuche

Dehnung [%]	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]
3,5	40,9	8,5
7	49,6	3,1

### 3.6 Kompressionsversuche

Das Last-Verformungsverhalten des MBA-Materials wurde mit Kompressionsversuchen in einem Großödometergerät untersucht.

Tabelle 7: Ergebnisse der Kompressionsversuche bei Erstbelastung

Parameter	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
$w_A$ [-]	0,31	0,258	0,293
$\rho_{dA}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,57	0,62	0,61
$E_{s100}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	581	698	804
$E_{s200}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1434	1201	1232
$E_{s400}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	2106	2328	2367
$E_{s800}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5520	4974	-

Die Proben sind dafür mit Anfangswassergehalten von  $w_A = 25,8$  % bis  $w_A = 31$  % locker geschüttet eingebaut worden. Aus der Auftragung des Steifemoduls  $E_s$  in Abhängigkeit von der Normalspannung  $\sigma$  auf lassen sich die Steifemodulparameter des empirischen Stoffgesetzes nach Ohde (siehe Gl. 1.1) bestimmen. Die Ergebnisse für die Erstbelastung sind in Tabelle 7 angegeben.

### 3.7 Spannungsabhängige Dichte

Neben den Kompressionsversuchen im Ödometer wurde die Abhängigkeit der Dichte von der Normalspannung bei unterschiedlichen Wassergehalten ermittelt. Dadurch ist es möglich, die Neigung von abgelagerten MBA-Material zur Zusammendrückung bei Änderung der Auflast oder Änderung des Wassergehalts zu beurteilen. Diese Aussagen sind insbesondere während des Betriebs von Deponien wichtig.

Zur Ermittlung der spannungsabhängigen Dichte sind mehrere Teilversuche mit unterschiedlichem Wassergehalt erforderlich. Die Versuche wurden an MBA-Material mit einem Siebschnitt von 0-60 mm Cröbern durchgeführt. Nach gezielter Einstellung des Wassergehalts ist das MBA-Material in einen Proctortopf C locker geschüttet eingebaut worden. Anschließend wurde die Auflast über eine gelochten Metallplatte aufgebracht. Die seitliche Ausdehnung ist wie im Ödometerversuch behindert, eine Entwässerung des Materials nach oben ist möglich. Nach Bestimmung der Ausgangshöhe  $h_A$  wurden die Laststufen (25, 50, 100, 200, 400, 800 kN/m<sup>2</sup>) aufgegeben und die Setzungen nach Erreichen der jeweiligen Auflastspannung abge-

lesen. Die Zeitabhängigkeit der Setzungen wurde nicht berücksichtigt. Die Setzungen wurden direkt nach Auftragen der Spannung abgelesen und entsprechen demnach den Anfangssetzungen, wie sie auf einer Deponie nach der Überfahrt mit einem Verdichtungsgerät, z.B. einem Kompaktor, entstehen. Der Kompaktor verursacht eine Auflastspannung von ca.  $300 \text{ kN/m}^2$ . Bei einem zu hohen Wassergehalt kommt unter diesen Spannungen bereits zu einer Vernässung, wodurch die Befahrbarkeit verringert wird. Die festgestellten Hebungen des Versuchsmaterials bei Entlastung deuten auf teilweise elastische Eigenschaften hin.

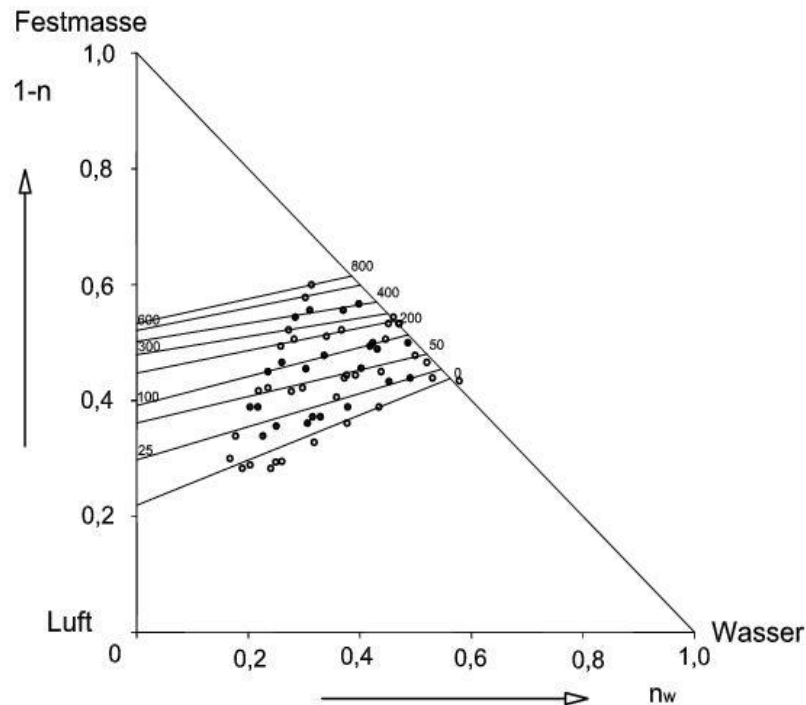


Abbildung 10: Spannungsabhängige Dichte, Darstellung im Koordinatensystem  $1-n = \rho_d / \rho_s$ ;  $n_w = w \cdot \rho_d / \rho_w$

## 4 Zusammenfassung, Ausblick

Im Rahmen des hier vorgestellten Projekts werden die bodenmechanischen Eigenschaften von MBA-Material untersucht. Die vorliegenden Ergebnisse lassen eine zahlenmäßige Beschreibung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des MBA-Materials von der Zentraldeponie Cröbern zu. Es ist vorgesehen, die Erfahrungen bei der Untersuchung und der Bewertung der Ergebnisse in Empfehlungen zusammenzufassen und zu einem späteren Zeitpunkt komplett zu veröffentlichen. Mit den Modellen, die entwickelt worden sind, ist es auch möglich, den Einfluss der Teilsättigung und der Strömungs- und Verformungsprozesse zu berücksichtigen.

Auf der Grundlage der nunmehr vorliegenden, abgesicherten Kenntnisse zu den Materialkennwerten und Lastannahmen, werden gegenwärtig rechnerische Untersuchungen zur Prognose der Standsicherheit und der Verformbarkeit durchgeführt. Dafür wird neben anderen, klassischen Programmen, auch die FEM benutzt. Für die Simulationen mit dem FEM-Programm PLAXIS müssen geeignete Stoffgesetze ausgesucht und die Kennwerte auf Grundlage der Versuchsergebnisse neu bestimmt werden. Die Berechnungen stehen kurz vor dem Abschluss. Auch hierüber wird in einer späteren Veröffentlichung berichtet.

## Schrifttum

- [1] H. Doedens and D. von Felde and C. Cuhls and K. Ketelsen and E. Broeker and E. Fehre and B. Giebel.: Wissenschaftliche Begleitung der drei großtechnischen Demonstrationsanlagen zur mechanisch-biologischen Vorbehandlung von Restabfällen in Niedersachsen. Endbericht. Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Hannover und Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Entsorgung, Hannover
- [2] Hupe, K.; Leikam, K.; Heyer, K.; Stegmann, R.: Auswirkungen der mechanisch biologischen Vorbehandlung von Restabfällen auf die Deponietechnik. Müll und Abfall. Heft 3. S. 159 - 165. (1998)
- [3] DIN18123: Bestimmung der Korngrößenverteilung. (1996)
- [4] DIN18127: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch. (1997-11-00)  
DIN EN ISO 14688-1 Geotechnische Erkundung und Untersuchung, Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1: Benennung und Beschreibung
- [5] DIN18130-1: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. Teil 1: Laborversuche. (1998)
- [6] DIN18136: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch. (2003)
- [7] AbfAbIV: Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfalldeponien (Abfallablagerungsverordnung-AbfAbIV). 20. Februar 2001 (BGBl. I S. 305).(2001)
- [8] Kühle-Weidemeier, M.: Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Restabfälle in Deutschland. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover. Dissertation. Heft 127. (2005)
- [9] Kühle-Weidemeier, M.; Langer, U.: Deponien für mechanisch-biologische Abfälle. Müll und Abfall. Heft 4. S. 202 - 209. (2006)
- [10] Münnich, K.; Bauer, J.; Fricke, K.: Ablagerung von MBA-Material - Konsequenzen für Bau und Betrieb der Deponie. Deponietechnik 2006. Hamburger Berichte 29. S. 143 - 158. (2006)
- [11] Kölsch, F.: Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Mitteilungen, Heft 133/1996. (1996)
- [12] Ziehmann, G.: Veränderung des mechanischen Verhaltens durch die mechanische und biologische Vorbehandlung. In: Deponierung von vorbehandelten Siedlungsabfällen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 14, S. 1 - 9. (1999)
- [13] GDA: Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten. E 3-8: Bestimmung des Scherverhaltens von kombinierten Abdichtungsschichten. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Fachsektion 6 Umweltgeotechnik. GDA Empfehlungen 3. Auflage. (1997)

- [14] DIN18135: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch.(2003)