

E.Kammel, J.Engel

Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT), HTW Dresden

Geotechnical models for waste processed mechanical biological treated waste

Abstract

The result of the mechanical and biological treatment of waste is a new material with special mechanical and hydraulic properties. Landfills of treated waste are similar to earth construction, like dams. To ensure the safety and the serviceability of the construction it is necessary to use calculation methods like slope stability and settlement analysis. These methods are well developed for soil mechanical proposes. An important requirement is the knowledge of the stress-strain and hydraulic behavior of the material. Different soil mechanical constitutive concepts were combined and a new concepts was developed. It is important to understand the mean influences on the behavior of the treated waste. For this reason an extensive investigation program was planed and realized with in situ and laboratory test. This paper presents the results of these tests and the first conclusions. It gives an overview about the problems and the solutions.

Zusammenfassung

Deponien sind Bauwerke, 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 Ergebnisse von Untersuchungen zur Beurteilung von MBA Material der Zentraldeponie Cröbern vorgestellt. Dies umfasst Laborversuche und Ergebnisse von Standsicherheits- und Verformungsrechnungen.

Keywords

waste, landfill, mechanical properties, stability, MBA-Material, Verdichtung, Scherversuche, Einaxiale Druckversuche, Ablagerungsverhalten

1 MBA-Material, Untersuchungen an MBA-Material Cröbern

Nach der "Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen" (Abfallablagerungsverordnung) [AbfAbIV, 2001] 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 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.

Im Folgenden werden Ergebnisse von Laborversuchen mitgeteilt und es werden erste Schlussfolgerungen abgeleitet, wobei bei einigen Kennwerten und Versuchen auf die Darstellungen in [Engel et al., 2007] verwiesen wird.

2 Stoffgesetze und Kennwerte für MBA-Material

2.1 Klassifizierung, Korngrößenverteilung

Die mittels Trockensiebungen [DIN 18123, 1996] ermittelte Korngrößenverteilung des MBA Materials Cröbern ist in Abbildung 1 dargestellt. Anhand der Sieblinie kann eine Benennung und Klassifizierung des Materials in Anlehnung an die bautechnische Vorgehensweise erfolgen. Der Feinkornanteil ($d < 0,063$ mm) liegt bei 1,3 % und damit un-

ter 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.

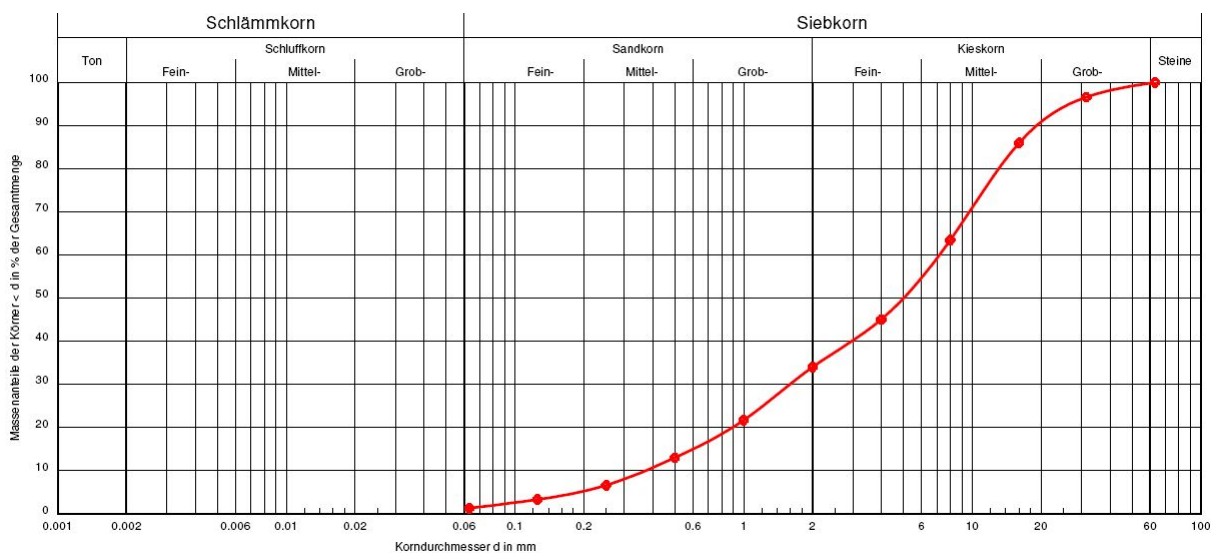


Abbildung 1 Korngrößenverteilung (Sieblinie) des MBA-Materials Cröbern

2.2 Untersuchung zur Wassergehaltsbestimmung

Nach DIN 18121 Teil 1 erfolgt die Wassergehaltsbestimmung durch Trocknung des Materials bis zur Massenkonstanz bei einer Temperatur von 105 °C im Trockenschrank. Der Wassergehalt ist definiert als Verhältnis von dem im Boden vorhandenen Wasser m_w , das bei dieser Temperatur verdunstet, zur Masse der trockenen Probe m_d .

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (1.1)$$

Der in der DIN 18121 festgeschriebene Stand der Technik gilt für mineralische Böden und setzt bestimmte Anforderungen an die Mindestprobenmenge und die Herstellung repräsentativer Teilproben. Es wird darauf hingewiesen, dass bei Böden die organische Bestandteile enthalten, eine Verfälschung des Ergebnisses eintritt. Ursache dafür sind chemische Prozesse wie Oxidation oder andere Reaktionen. Aus diesem Grunde wurden im Rahmen des Versuchsprogramms an dem MBA-Material zunächst Untersuchungen zur Bestimmung des Wassergehalts durchgeführt. Durch Bestimmung der Trockenmasse nach Ofentrocknung bei unterschiedlichen Temperaturen sollten Hinweise auf den Einfluss der Temperatur festgestellt werden. Die Versuche wurden über

einen längeren Zeitraum fortgesetzt und sind für 105°C in Abbildung 3 und für 60°C in Abbildung 2 dargestellt.

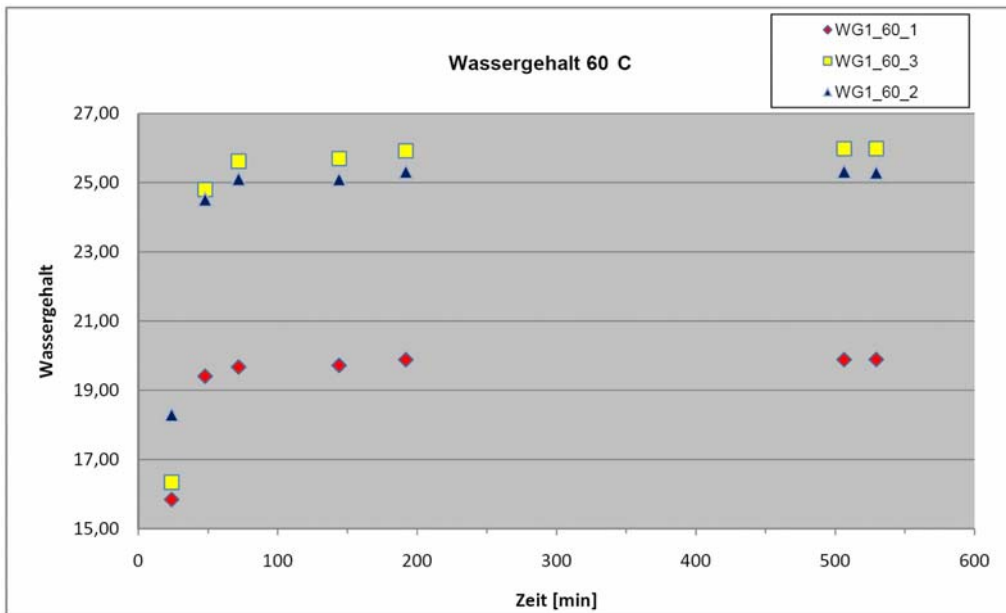


Abbildung 2 Ergebnisse zur Wassergehaltsbestimmung bei 60°C

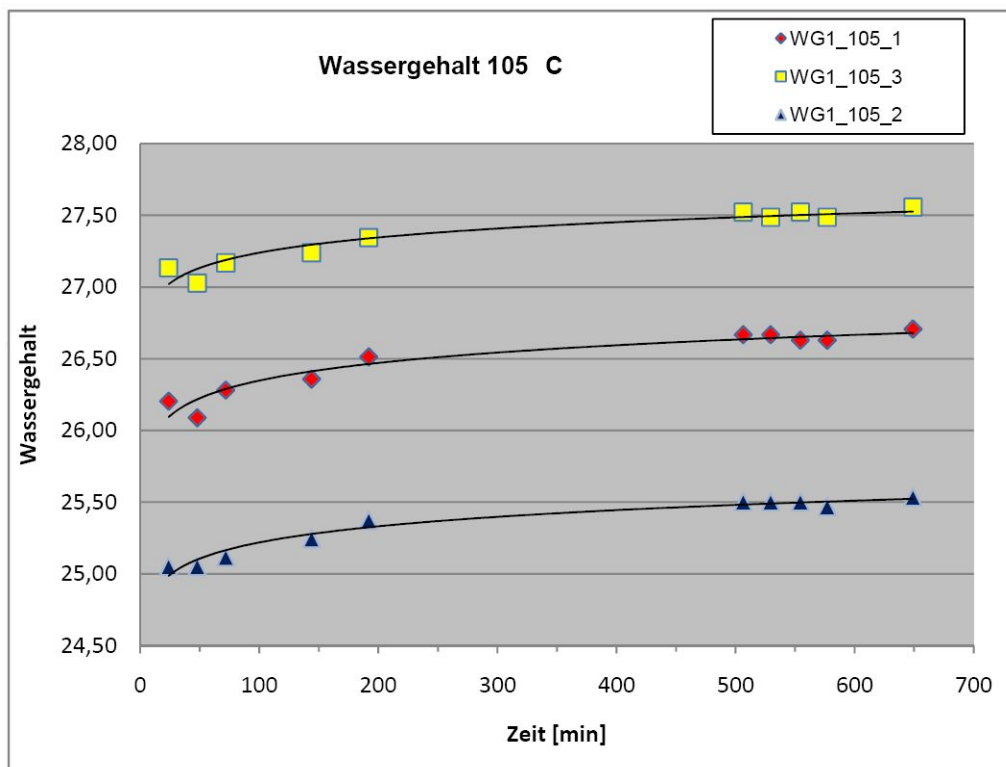


Abbildung 3 Ergebnisse zur Wassergehaltsbestimmung bei 105°C

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Trocknung bei 60 °C einen etwas niedrigeren Wassergehalt und eine langsamere Abnahme der Masse ergibt als bei 105°C. Eine näherungsweise Massenkonstanz war bei beiden Temperaturen nach spätestens 24 Stunden festzustellen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Bestimmung

des Wassergehalts nach 48 Stunden bei 60 °C zu ähnlichen Ergebnissen führt wie bei 105 °C nach 24 Stunden.

2.3 Verdichtungsverhalten

2.3.1 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 [DIN 18127, 1997]. Es wurden pro Versuch fünf Proben mit unterschiedlichen Wassergehalten in drei Lagen eingebaut und mit jeweils 22 Schlägen und einem Fallgewicht von 4,5 kg verdichtet. Im Anschluss ist die Dichte und der Wassergehalt bestimmt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 und in Abbildung 4 dargestellt. Auffallend ist der unterschiedliche Verlauf der Kurven und die unterschiedliche Streubreite.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Proctorversuche

Versuch	Proctorwassergehalt	Proctordichte
Nr.	w_{Pr} [-]	ρ_{Pr} [g/cm ³]
1	0,33	1,11
2	0,33	1,08

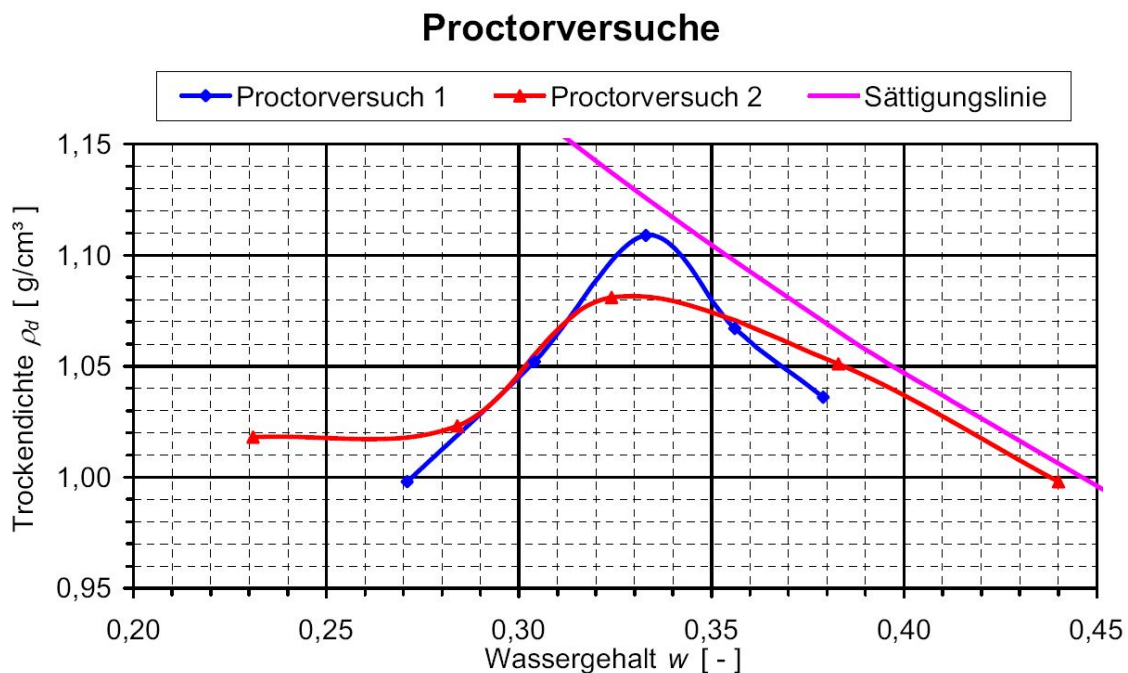


Abbildung 4 Proctorkurven des MBA-Materials Cröbern

2.3.2 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 vermessen. Zur Feststellung der lokalen Dichte des MBA Materials sind außerdem Proben mit dem Densitometerverfahren (Wassersatzmethode) 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 ρ [g/cm ³]	Trockendichte ρ_d [g/cm ³]
Planierraupe	0,30	1,40	1,08
Kompaktor	0,31	1,47	1,13

Beim Einbau mit dem Kompaktor wurde die größere Dichte erzielt. Mit der Annahme eine Korndichte von $\rho_s=1,80$ g/cm³ ergibt sich eine rechnerische Dichte bei Sättigung von 1,48 bzw. einer Dichte von 1,50 g/cm³.

2.4 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 25 Schlägen je Lage 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.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengestellt. Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte liegen im Mittel bei ca. $7 \cdot 10^{-10}$ m/s. Dies entspricht einem „sehr schwach durchlässigen“ Material [DIN 18130-1, 1998]. 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 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.

Tabelle 3 Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche

Nr.	Größtkorn d_{Max} [mm]	Anfangswassergehalt w_A [-]	Anfangstro- ckendichte ρ_{dA} [g/cm ³]	Durchlässig- keitsbeiwert k_{10} [m/s]	Durchlässig- keitsbeiwert 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	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$8,7 \cdot 10^{-10}$
7	10	0,24	0,97	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$
8	4	0,492	0,80	$4,1 \cdot 10^{-9}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$
9	10	0,251	0,96	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$
10	4	0,557	0,90	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$
11	4	0,568	0,90	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$
12	4	0,46	1,02	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$
13	4	0,46	1,01	$4,8 \cdot 10^{-11}$	$6,2 \cdot 10^{-11}$
14	4	0,48	1,00	$9,9 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$

In Abbildung 5 ist die zeitliche Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwerts grafisch dargestellt. Deutlich zu erkennen ist hierbei die Abhängigkeit der Durchlässigkeit von den Einbauparametern. Die zwei gemessenen Durchlässigkeiten im Bereich von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ m/s sind auf den geringen Wassergehalt beim Einbau zurückzuführen.

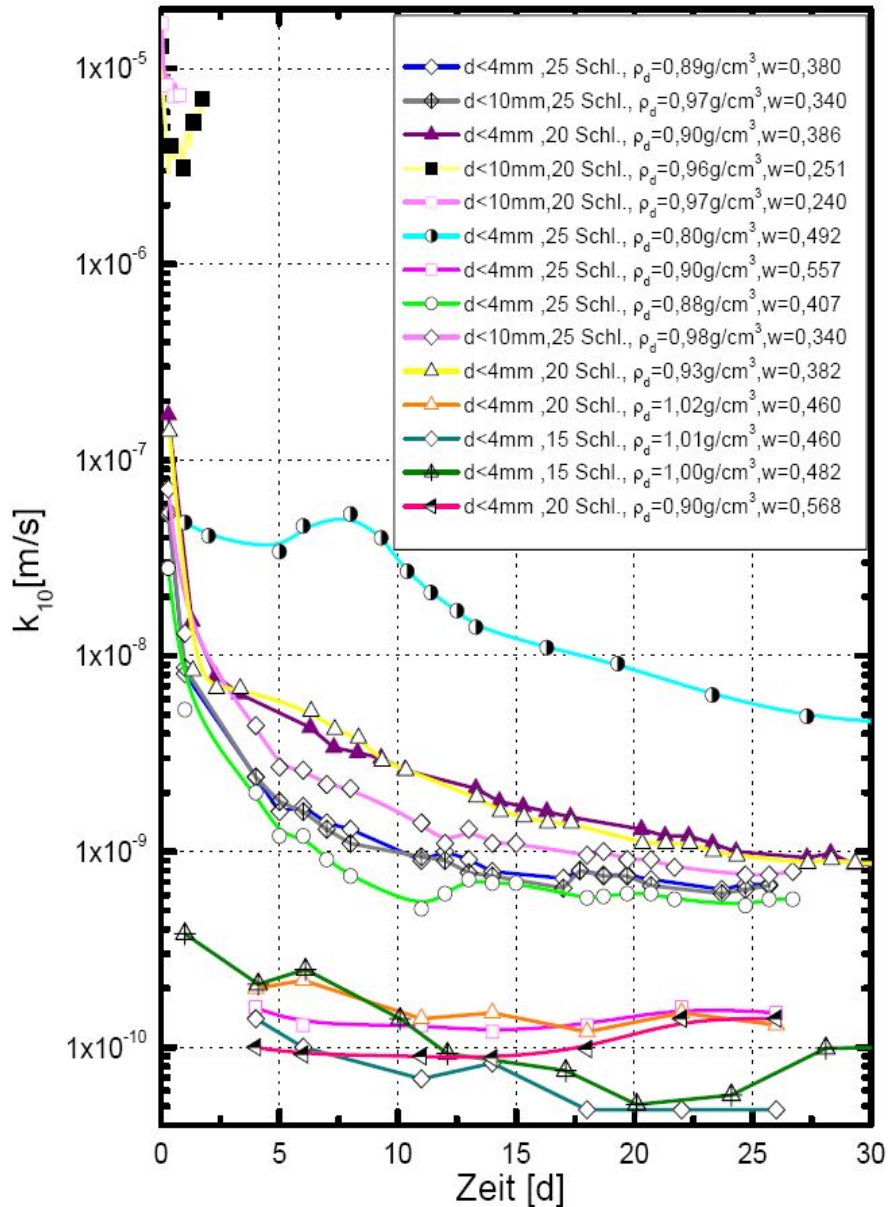


Abbildung 5 Ergebnisse der Durchlässigkeit

2.5 Rahmenscherversuch

Die Bestimmung der Scherparameter des MBA-Materials erfolgte durch Großrahmenscherversuche (100 cm x 100 cm). Dafür ist der Anteil des Materials mit der Körnung 0 - 60 mm verwendet worden. Die Vorschubgeschwindigkeit v wurde mit 10 mm/h in Anlehnung an die GDA-Empfehlungen [GDA-Empfehlungen, 1997] gewählt. Bei der Auswertung ist der veränderliche Wassergehalt berücksichtigt worden. Dazu wurden die Versuche in zwei Versuchsreihen unterteilt.

In Abbildung 6 sind die Scherspannungs-Scherweg-Diagramme und in Abbildung 7 die Scherspannungs-Normalspannungs-Diagramme für beide Versuchsreihen dargestellt.

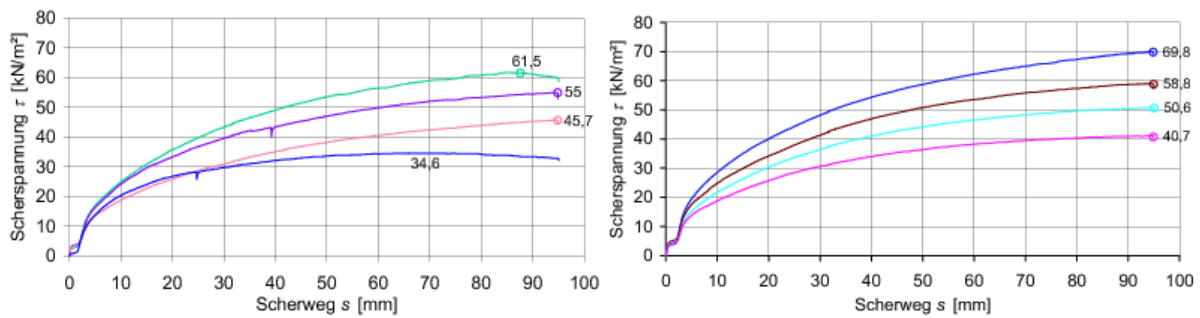


Abbildung 6 Mobilisierung der Scherfestigkeit im Rahmenscherversuch

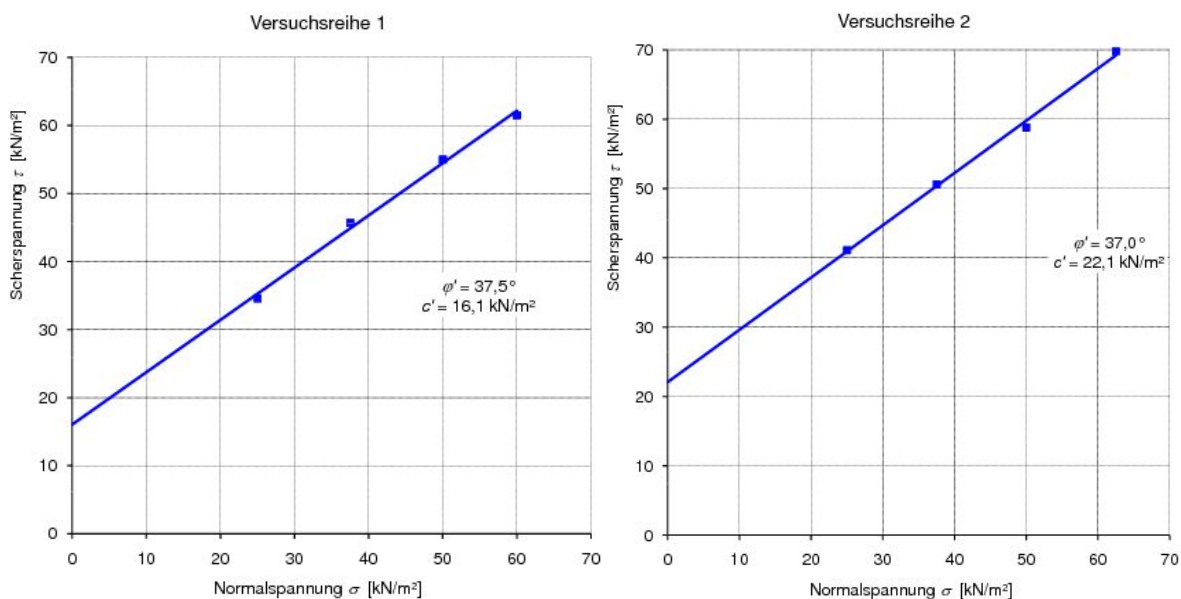


Abbildung 7 Ergebnisse der Scherversuche, Scherspannung gegen Normalspannung

Aus den τ - 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.

2.6 Spannungsabhängige Dichte

Bei Belastung eines zunächst locker geschütteten Bodens oder eines anders körnigen locker gelagerten Materials kommt es bei der statischen Belastung der Probe zu einer Verdichtung. Wie groß die Dichte nach Lastaufbringung ist, hängt unter anderem vom Boden, der Anfangsdichte und dem Wassergehalt ab. Der Zusammenhang zwischen der Auflastspannung und der Dichte wird hier als „Spannungsabhängige Dichte“ bezeichnet und zur Charakterisierung des Materialverhaltens benutzt. Die Abhängigkeit der Dichte von der Normalspannung bei unterschiedlichen Wassergehalten lässt sich mit der spannungsabhängigen Dichte beschreiben und ist typisch für ein Material. Da-

durch ist es möglich, das Setzungsverhalten von abgelagertem MBA-Material 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 durchgeführt. Nach gezielter Einstellung des Wassergehalts ist das MBA-Material in einen Proctortopf C locker geschüttet eingebaut worden. Anschließend wurde die Auflast über eine gelochte 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/m²) aufgegeben und die Setzungen nach Erreichen der jeweiligen Auflastspannung abgelesen. 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 kN/m². Bei einem zu hohen Wassergehalt kommt es 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.

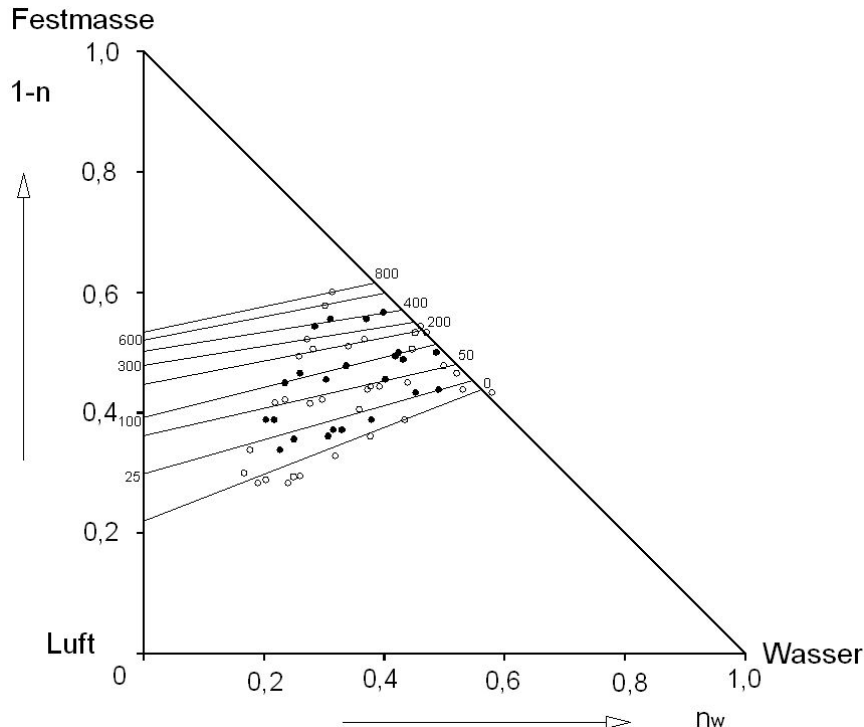


Abbildung 8 Spannungsabhängige Dichte im Koordinatensystem $1-n = \rho_d / \rho_s$; $n_w = w \rho_d / \rho_w$

3 Modell zur Beschreibung der Verdichtung

Das Ablagerungsverhalten des MBA-Materials auf der Deponie und im Labor kann mit Hilfe eines von Rudert entwickelten Dreiecknetzes beschrieben werden (siehe [Engel, 2003] und [Rudert, 1977]). Zur Erfassung der Volumen- oder Massenverhältnisse im Boden werden die Korndichte ρ_s , der Wassergehalt w und die Dichte ρ benötigt. Die Darstellung der Massen- und Volumenverhältnisse erfolgt durch Auftragung des Feststoffanteils ($1-n$) gegen den wassergefüllten Porenraum (volumetrischer Wassergehalt) n_w . Der Vorteil der Auftragung ($n_w, 1-n$) liegt vor allem darin, dass Linien gleicher Eigenschaften, z.B. Linien gleicher Sättigung, gleicher Wassergehalte, gleicher Spannungen, gleicher Verdichtung, als Geraden in dem Diagramm darstellbar sind. Die Ergebnisse der Labor- und Feldversuche sind in das Dreiecknetz eingezeichnet worden. Abbildung 9 zeigt die durchgeführten Proctorversuche und die Linien gleicher Wassergehalte bei $w=0,30$ und $w=0,40$. Zusätzlich wurde der Versuche zur Ermittlung der spannungsabhängigen Dichte bei einer Spannung von 400 kN/m^2 eingetragen. Hieraus wird deutlich das der Einbau des MBA-Materials auf der Deponie in Cröbern mit einem Wassergehalt von $w=0,30$ und $w=0,40$ erfolgen sollte.

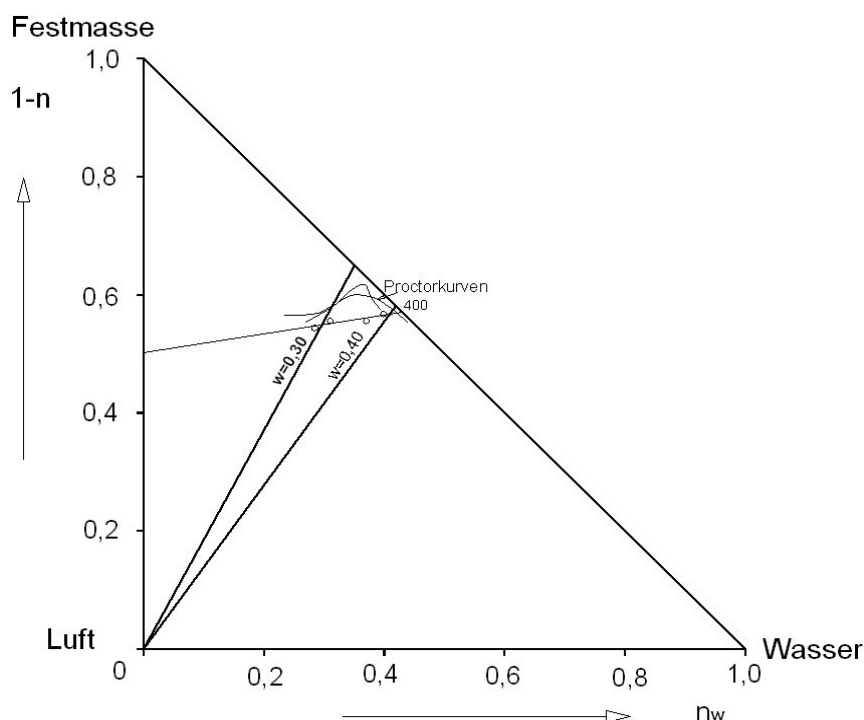


Abbildung 9 Einbauverhalten der Laborversuche, Darstellung im Koordinatensystem 1-

$$n = \rho_d / \rho_s ; n_w = w \rho_d / \rho_w$$

In Abbildung 10 ist zusätzlich das Einbauverhalten durch Eintragung der Feldversuche dargestellt. Es sind die Volumenveränderungen dargestellt, die beim Einbau im Feld mittels eines Feldkompaktors und einer Feldraupe festgestellt worden sind. Deutlich wird dabei, dass der Einbau im Feld oberhalb der Proctordichte und auf dem trockenen

Ast der Proctorkurve liegt. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Einbau mit dem Feldkompaktor zu höheren Dichten als der Einbau mittels Planierdraupe führt.

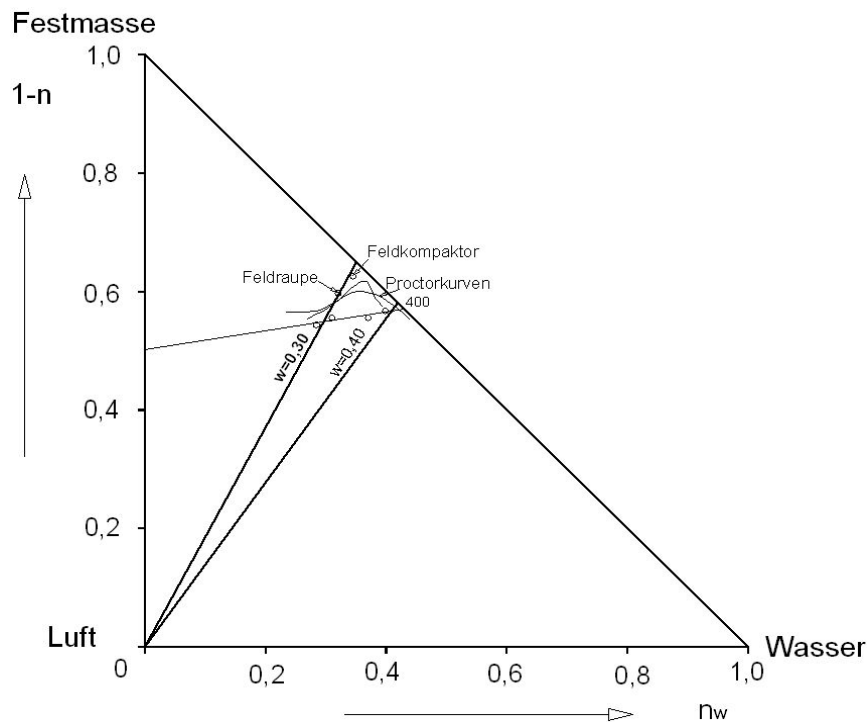


Abbildung 10 Einbauverhalten in Labor- und Feldversuchen, $1-n = \rho_d / \rho_s$; $n_w = w \rho_d / \rho_w$

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 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 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.

5 Literatur

- DIN 18121-1 1998 Baugrund – Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt , Teil1 : Bestimmung durch Ofentrocknung
- DIN 18123 1996 Bestimmung der Korngrößenverteilung
- DIN 18121-1 1998 Baugrund – Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt , Teil1 : Bestimmung durch Ofentrocknung
- DIN 18130-1 1998 Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. Teil 1: Laborversuche
- DIN 18127 1997 Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch
- AbfAbIV 2001 Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfalldeponien (Abfallablagerungsverordnung-AbfAbIV). 20. Februar 2001
- GDA Empfehlungen 1997 GDA-Empfehlungen, Geotechnik der Deponien und Altlasten, Ernst & Sohn, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., ISBN 3-433-01318-7.
- Engel, J. ; Geß, S. ; Kam- 2007 Deponieworkshop Zittau- Liberec 2007. Geotechnische Probleme bei mechanisch-biologisch aufbereitetem Abfall. Tagungsband, Heft 96 der Wissenschaftlichen Berichte der Hochschule Zittau / Görlitz, Zittau, ISBN 978-3-9811021-6-1.
- Rudert, J. ; 1977 TU Dresden. Beitrag zur quantitativen Erfassung der Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften feinkörnig – bindiger Lockergesteine von Lockergesteinsart und Phasenzusammensetzung. Habilitation,

