

Geotechnisches Modell zur Eigenschaftsbeschreibung des MBA-Materials

E. Kammel, J. Engel, S. Al-Akel,

HTW Dresden

Zusammenfassung

Seit dem Juni 2005 ist gemäß der Abfallablagervordnung [ABFABLV, 2001] die Ablagerung von unbehandeltem Abfall nicht mehr zulässig. Der aufbereitete Abfall muss bestimmte Anforderungen erfüllen und vorgegebene Grenzwerte einhalten. Das Endprodukt des Aufbereitungsprozesses ist ein Material (MBA-Material) dessen Eigenschaften wesentlich von den Abläufen beim Sortieren, der Zerkleinerung und der Verrottung bestimmt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Definition eines zeitabhängigen Stoffmodells zur Quantifizierung und Überwachung der Einbauparameter von MBA-Material“ wurden in der Laufzeit von 05/2006 bis 12/2007 gezielt die Stoffeigenschaften des MBA-Materials der Deponie Cröbern durch Labor- und Felduntersuchungen ermittelt.

1 Einleitung

Seit dem 1. Juni 2005 ist gemäß Abfallablagervordnung der anfallende Restmüll vorbehandelt zu deponieren. Die mechanisch-biologische Aufbereitung (MBA) gehört zum Stand der Technik auf diesem Gebiet. Für das Ablagern der MBA-Materialien auf Deponien sind Vorgaben für die Kontrolle des Einbaus und die Prognose des Langzeitverhaltens erforderlich. Grundlage dafür sind Stoffgesetze, die das mechanische und hydraulische Verhalten quantifizieren. Durch ein Stoffgesetz werden Kennwerte definiert, die aus experimentellen Untersuchungen oder Messungen ermittelt werden müssen. Auf Grund der großen Unterschiede zwischen unterschiedlichen Materialien haben sich Klassen von Stoffgesetzen herausgebildet, die die charakteristischen Phänomene des jeweiligen Materials zutreffend beschreiben können. Ein universelles Stoffgesetz, das für alle Böden bzw. Lockergesteine anwendbar ist und die zeitabhängigen und hydraulischen Aspekte gleichermaßen gut erfasst, existiert nicht.

Für MBA-Materialien liegen noch keine ausreichend abgesicherten Stoffgesetze vor. Die in der Bodenmechanik übliche Klassifikation der Böden kann hier nur bedingt eingesetzt werden, da sich einige Kennwerte an MBA-Materialien nicht bestimmen lassen. Im Rahmen eines Forschungsprojekt wurde ein Stoffmodell entwickelt, das die zahlenmäßige Beschreibung des Verhaltens von MBA-Material der Deponie Cröbern ermöglicht. An diesem Projekt waren neben dem Fachgebiet Geotechnik die Projektpartner

GGB Gesellschaft für Geomechanik und Baumeßtechnik mbH, Espenhain und FCB Fachbüro für Consulting und Bodenmechanik GmbH Espenhain beteiligt.

2 Modell zur Quantifizierung der Materialeigenschaften

2.1 Grundlage des Modells

Grundlage des Modells ist die Idealisierung der Bodenzusammensetzung. Es wird in die feste, die flüssige und die gasförmige Phase unterteilt und die Kennwerte zur Quantifizierung der Massen- bzw. Volumenanteile werden als Kennwerte der Phasenzusammensetzung bezeichnet. Rudert [RUDERT, 1977] hat zur Verdeutlichung der komplexen Zusammenhänge und der Überlagerungsmöglichkeiten zwischen den Volumenverhältnissen im Dreiphasensystem eine einfache grafische Darstellung, Abbildung 1, gewählt. In diesem Dreiecksnetz können die wichtigsten Zusammenhänge im Boden definiert und dargestellt werden.

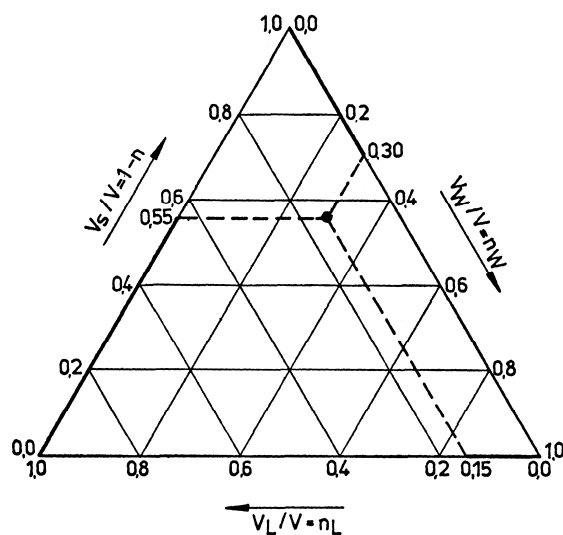


Abbildung 1 Darstellung von Volumenverhältnissen im Dreiecksnetz

2.2 $n_w/(1-n)$ Koordinatensystem (modifiziertes Dreiecksnetz)

Eine Weiterentwicklung des Systems gemäß Abbildung 1 ist das gleichschenklige, rechtwinklige Dreieck nach Abbildung 2. Mit Hilfe des rechtwinkligen Koordinatensystems kann man den Zustand des Bodens im Dreiphasensystem mit 2 Bestimmungsgrößen ($1-n$ und n_w) beschreiben. Im Gegensatz zur verbreiteten Auftragung der Trockendichte ρ_d über dem Wassergehalt w bietet diese Form der Darstellung viele Vorteile. Der Einfluss der Korndichte ist über den Porenanteil n und der des Wassergehalts über den wassergefüllten Porenanteil n_w bereits berücksichtigt. Diese Methode erlaubt es, den Zusammenhang zwischen Phasenzusammensetzung, Formänderung, Spannungen und Scherfestigkeit, s. Abbildung 3 und Abbildung 4, einfach und übersichtlich darzustellen, Fachtagung Geotechnik an der HTW Dresden (FH)

da sich diese Zusammenhänge mit Geraden gleicher Eigenschaften beschreiben lassen. So sind z.B. Linien gleicher Sättigung, gleicher Wassergehalte, gleicher Spannungen, gleicher Verdichtung, als Geraden in dem Diagramm darstellbar.

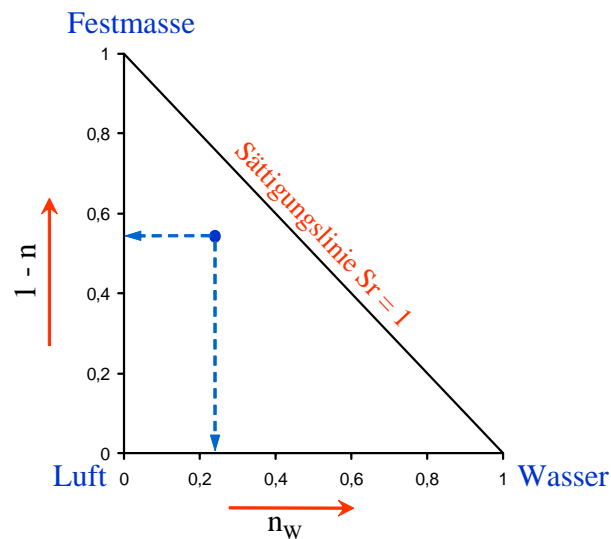


Abbildung 2 Modifiziertes Dreiecksnetz nach RUDERT

Die Linien gleicher Spannung sind in Abbildung 4 dargestellt. Das Bild zeigt die Ergebnisse von Kompressionsversuchen (Ödometerversuche) im teilgesättigtem Zustand, [ENGEL, 2003], bei denen der Wassergehalt konstant gehalten wurde. Die Verbindung der Endpunkte der Phasenzusammensetzung nach jeweils der gleichen Belastung und bei unterschiedlichen Wassergehalten ergibt Linien gleicher Konsolidationsspannungen bzw. äquivalenter Spannungen.

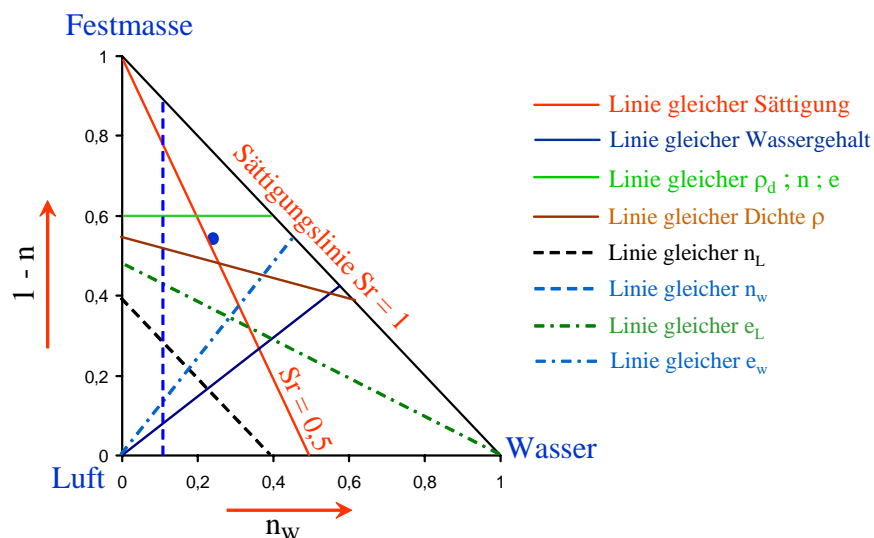


Abbildung 3 Geraden gleicher Eigenschaft im modifizierten Dreiecksnetz nach RUDERT

Der Vergleich der Phasenzusammensetzung mit der Phasenzusammensetzung bei Erstbelastung und gleichem Überlagerungsdruck lässt die Vorhersage von Sacken oder Schwellen, Abbildung 4, zu.

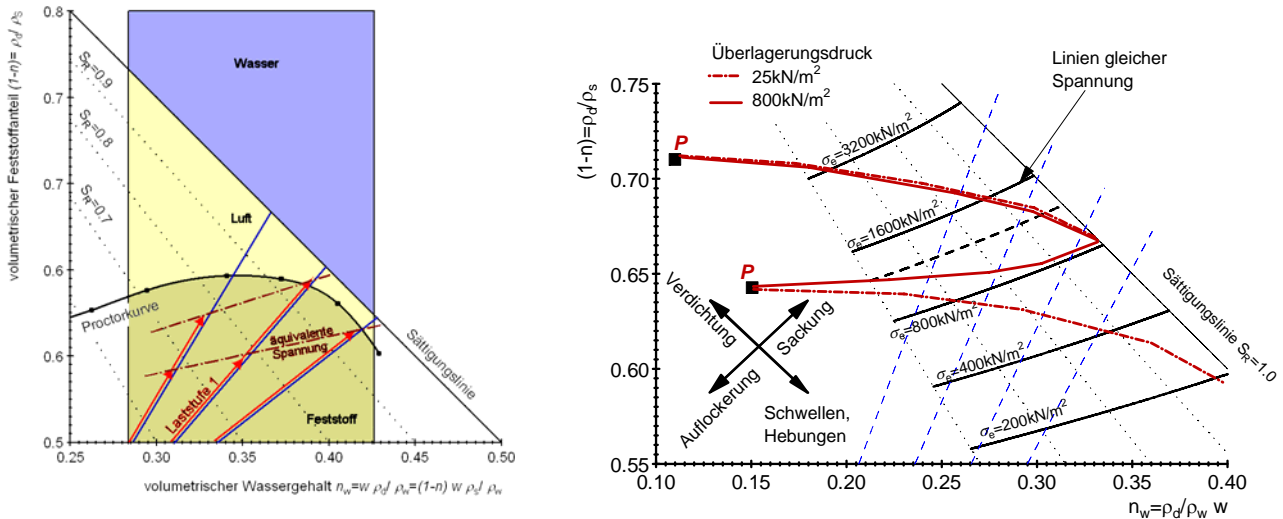


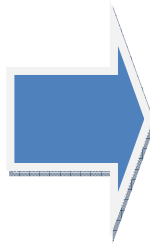
Abbildung 4 Linien äquivalenter Spannungen sowie Sacken und Schwellen künstlich verdichteter Böden in Abhängigkeit von Phasenzusammensetzung und Spannungszustand, [ENGEL, 2003]

Von RUDERT [RUDERT, 1977] wurde diese Darstellung genutzt um die Kennwerte der mechanischen Eigenschaften künstlich verdichteter Böden mit den Parametern der Phasenzusammensetzung zu verknüpfen. Von Engel [ENGEL, 2002 u. 2003] wurde diese Methode zur Beschreibung der Scherfestigkeit und Zusammendrückbarkeit teilgesättigter, feinkörnig-bindiger Böden benutzt und mit Verfahren zur zahlenmäßigen Vorhersage der mechanischen Eigenschaften des Bodens auf Grundlage von wenigen, leicht bestimmbareren Klassifikationskennwerten erweitert.

3 Eigenschaften von MBA-Material

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.

Siedlungsabfall



MBA Material



Abbildung 5 Ergebnis der Behandlung von Siedlungsabfällen

3.1 Klassifizierung, Korngrößenverteilung

Die mittels Trockensiebungen [DIN 18123, 1996] ermittelte Korngrößenverteilung des MBA Materials Cröbern ist in Abbildung 6 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 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 $C_U > 6$ 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.

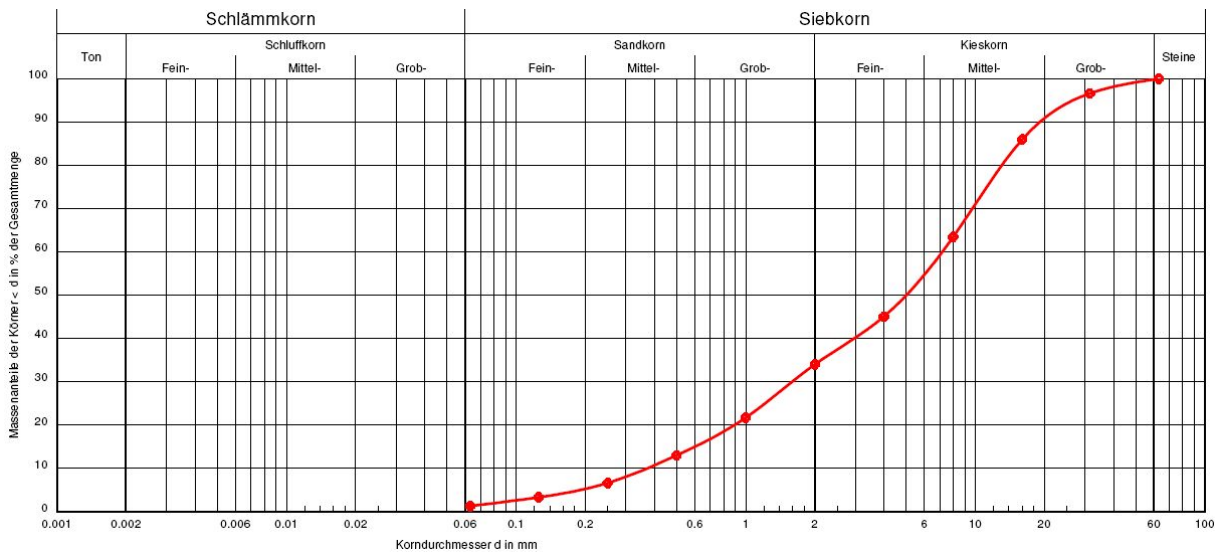


Abbildung 6 Korngrößenverteilung des MBA-Materials Cröbern

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 [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 7 dargestellt. Auffallend ist der unterschiedliche Verlauf der Kurven und die unterschiedliche Streubreite.

Tabelle 1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Proctorversuche

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

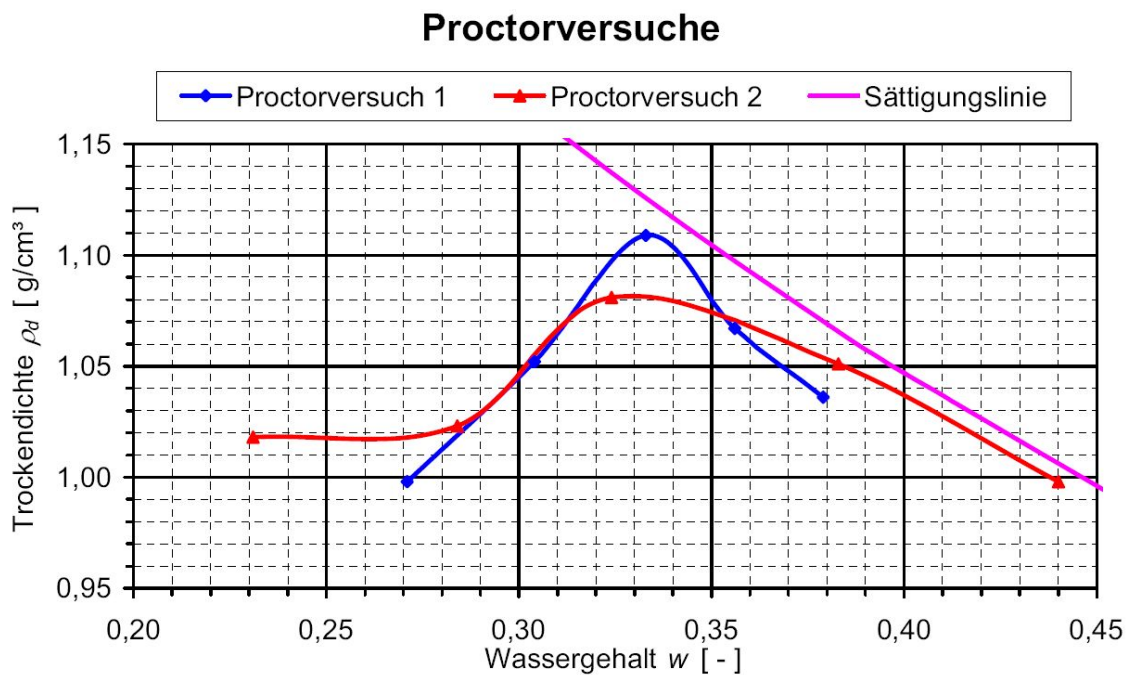


Abbildung 7 Proctorkurven des MBA-Materials Cröbern

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 vermessen. 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 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.

3.3 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. Dadurch 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 Hebung des Versuchsmaterials bei Entlastung deuten auf teilweise elastische Eigenschaften hin. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind Abbildung 8 aufgezeigt.

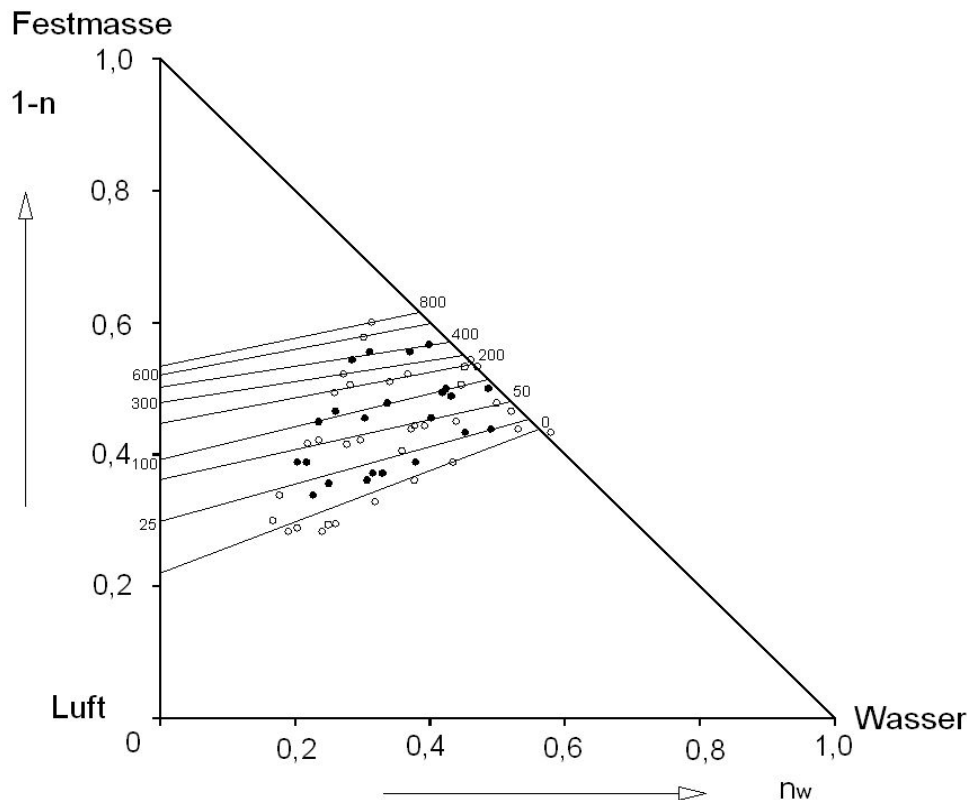


Abbildung 8 Spannungabhängige Dichte im Koordinatensystem $1-n=\rho_d/\rho_s$; $n_w=w \rho_d/\rho_w$

3.4 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 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 dass der Einbau des MBA-Materials auf der Deponie in Cröbern mit einem Wassergehalt von $w=0,30$ und $w=0,40$ erfolgen sollte.

Weiterhin ist in Abbildung 9 das Einbauverhalten durch Eintragung der Feldversuche eingezeichnet. 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 Planierraupe führt.

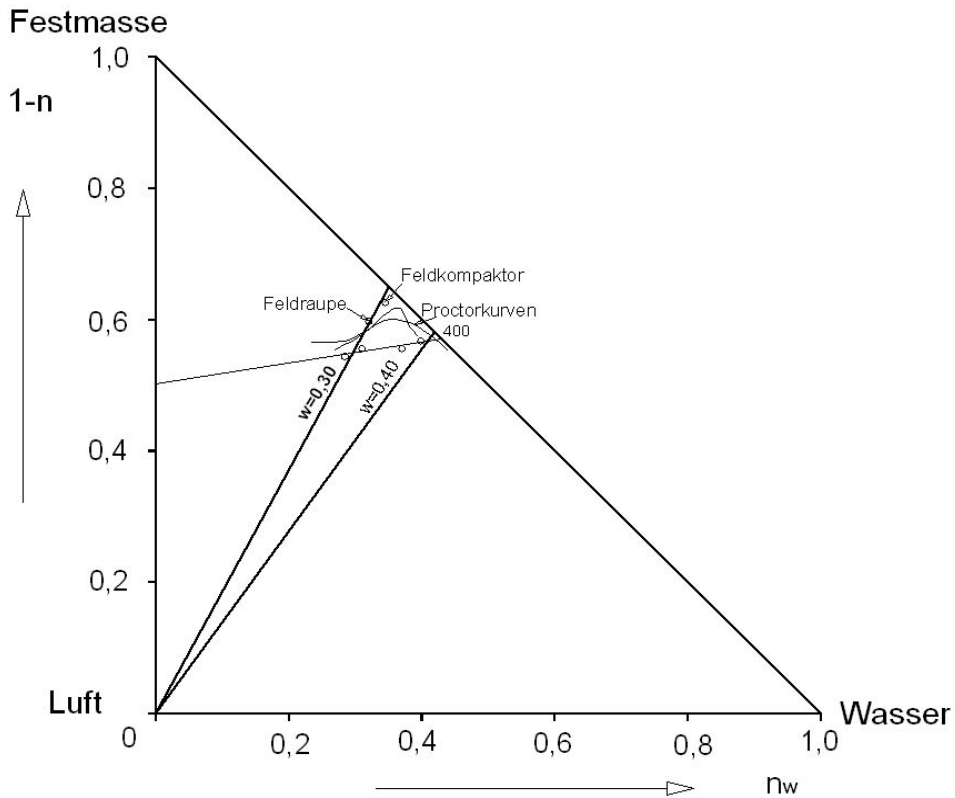


Abbildung 9 Einbauverhalten in Labor- und Feldversuchen $1-n = \rho_d / \rho_s$; $n_w = w \rho_d / \rho_w$

4 Schlußfolgerung

Im diesem Beitrag wurden die Eigenschaften von MBA-Material kurz vorgestellt und es konnte gezeigt werden, dass Laborversuche zur Bestimmung von Parametern und eine zahlenmäßige Beschreibung des Verhaltens von MBA-Material der Deponie Cröbern durch das modifizierte Dreiecksnetz möglich ist. Dazu wurden einige Laborversuche und Feldversuche aufgezeigt und ausgewertet. Auf dieser Grundlage wurde festgestellt, dass ein Einbau des MBA-Materials auf der Deponie in bestimmten Grenzen möglich und erforderlich ist.

5 Literatur

AbfAbIV	2001	Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfalldeponien (Abfallablagerungsverordnung-AbfAbIV). 20. Februar 2001
DIN 18123	1996	Bestimmung der Korngrößenverteilung
DIN 18127	1997	Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch

- | | | |
|------------|------|---|
| Rudert, J. | 1977 | Beitrag zur quantitativen Erfassung der Abhängigkeit mechanischer Eigenschaften feinkörnig - bindiger Lockergesteine von Lockergesteinsart und Phasenzusammensetzung, Habilitation, TU Dresden, |
| Engel, J. | 2002 | Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für bodenmechanische Nachweise. Institut für Geotechnik, TU Dresden, Mitteilungsheft 10 |
| Engel, J. | 2003 | Verfahren zur Vorhersage der Eigenschaften verdichteter Böden, Workshop Bodenverdichtung, Technische Universität Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb |

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. (FH) Enrico Kammel
Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT)
an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Friedrich-List-Platz 1
D-01069 Dresden
Telefon +49 351 4623667
Email: kammel@htw-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Engel
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Friedrich-List-Platz 1
01069 Dresden
Telefon +49 351 4622352
E-Mail: engel@htw-dresden.de

Dr.-Ing. Said Al-Akel
Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT)
an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Friedrich-List-Platz 1
D-01069 Dresden
Telefon +49 351 4623647
Email: al-akel@htw-dresden.de