

## **Einfluss des Einbauwassergehaltes auf das Langzeitverhalten von MBA-Deponien**

Kai Münnich, Jan Bauer, Klaus Fricke

Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig, Abt. Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

Der Einbau von MBA-Materialien auf Deponien sowie deren Betrieb ist immer mit dem Vorhandensein von Wasser verbunden. Zum Einen weist der Abfall nach der Behandlung einen Restwassergehalt auf, der sehr stark von der vorher eingesetzten Behandlungstechnologie abhängt und damit entsprechende Schwankungen aufweisen kann, und zum Anderen unterliegt der Abfall nach der Ablagerung den klimatischen Randbedingungen des Standortes. Beide Faktoren haben unmittelbaren Einfluss auf die an der Deponiebasis anfallenden Sickerwasservolumina sowie auch die Standsicherheit des Deponiekörpers.

Dies gilt auch für die in der Vergangenheit abgelagerten, nicht vorbehandelten Abfälle, aber durch die mechanisch-biologische Behandlung erfährt das Deponat neben den biologisch-chemischen Veränderungen auch eine grundlegende Veränderung der physikalischen Eigenschaften. Einen wesentlichen Einfluss hat hierbei die mechanische Behandlung, d.h. das Zerkleinern und das Absieben der Grobfraktion, die nachfolgend thermisch verwertet wird. Im Vergleich zum Material aus der Vergangenheit weist das MBA-Material eine um ein Vielfaches höhere Homogenität und kleinere Stückgrößen auf. Diese Änderungen in der Struktur des abgelagerten Abfalls sind ausschlaggebend für ein verändertes Setzungs- und Festigkeitsverhalten.

Die Folge ist eine deutliche Erhöhung der erzielbaren Einbaudichte der Abfälle, geringere hydraulische Durchlässigkeiten sowie eine Veränderung des Festigkeitsverhaltens des Deponiekörpers. Durch die Ausschleusung der heizwertreichen Fraktionen, die die Zugspannung aufnehmende Komponente des unbehandelten Abfalls darstellt, geht dem MBA-Material eine Tragreserve verloren, die die Standsicherheit des Deponiekörpers und somit die gesamte Deponiekonstruktion beeinflusst.

Während bei Deponien, die gemäß Abfallablagerungsverordnung genehmigt wurden, noch Vorgaben in Hinblick auf die zu erzielende Einbaudichte auf den Schüttfeldern gemacht wurden, sind in der neuen Deponieverordnung die Angaben zum Einbau in Hinblick auf die Standsicherheit sehr allgemein gehalten.

Als Referenzwert für die erzielbare Einbaudichte wird i.d.R. die Proctordichte unter definierten Randbedingungen ermittelt, wohl wissend, dass in der Einbaupraxis deutlich abweichende Dichten - sowohl höhere als auch niedrigere Werte - erzielt werden können. In der Abb. 1 ist eine für MBA typische Proctorkurve dargestellt. Der flache Kurvenverlauf deutet auf einen geringen Einfluss des Wassergehaltes auf die erzielbare Einbaudichte hin. In Bezug auf die Anforderungen gemäß Anhang 3 der AbfAbIV ergibt sich somit eine breite Spannweite der Wassergehalte mit denen 95 % der im Testfeld erzielten Einbaudichte im Betrieb zu erreichen ist. Diese Toleranz der Wassergehalte kann bei einigen MBA Materialien ca. 10 bis 15

% (FS) bedeuten. Um einerseits genügend Pufferkapazität für eindringende Niederschläge vorzuhalten, wird zudem ein möglichst trockener Einbau empfohlen (Bräcker, 2008), der auch an einigen Deponiestandorten Anwendung findet, denn auf der anderen Seite kann auch bei verhältnismäßig großen Abweichungen vom optimalen Wassergehalt auf dem trockenen Ast der Proctorkurve eine gute Verdichtung erreicht werden (Entenmann, 2007).

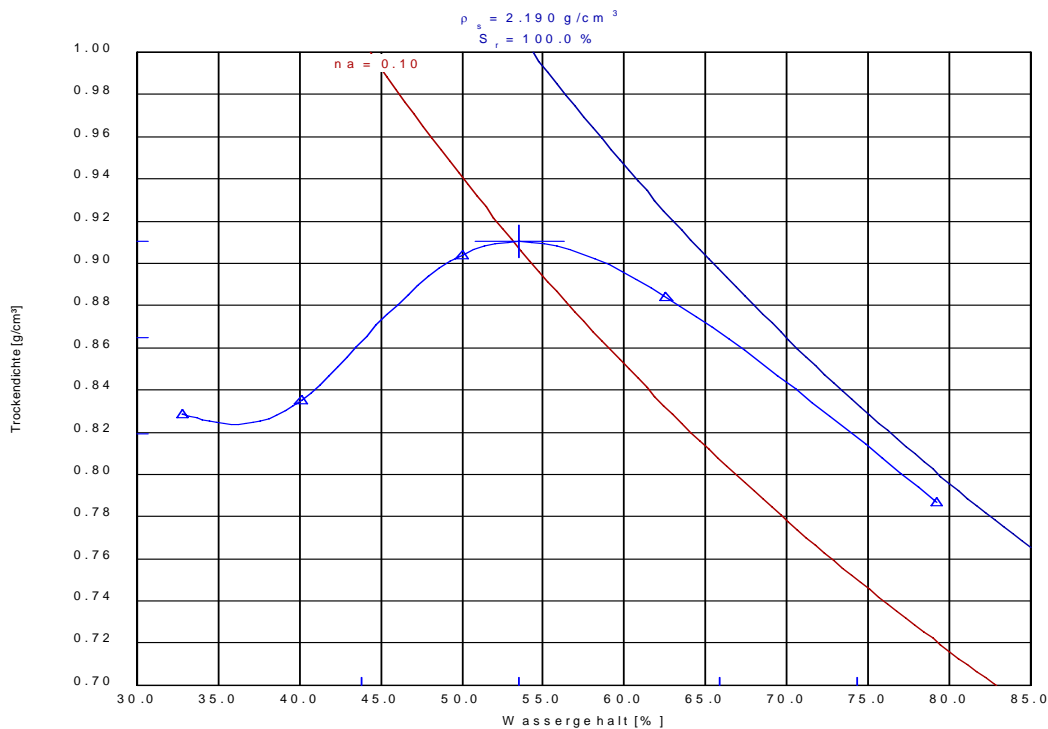


Abbildung 1: Typische Proctorkurve für MBA Material

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Einbaudichte jedoch auch einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Festigkeit besitzt, da insbesondere der Matrix-Faserverbund beeinflusst wird, d.h. die Verankerung der residualen faserigen Bestandteile. In Abhängigkeit der Einbaudichte kann der Bewehrungseffekt durch die faserigen Komponenten somit mehr oder weniger zur Gesamtscherfestigkeit beitragen. Geringere Einbaudichten haben demnach eine schlechtere Einbindung der Fasern in dem Grundmatrixmaterial zur Folge. Eine hohe Einbaudichte und eine gute Verzahnung faseriger Bestandteile sind daher für eine optimale Materialfestigkeit unerlässlich.

Testfelduntersuchungen an mehreren Deponiestandorten zeigten bei höheren Wassergehalten (in der Nähe des Proctroptimums oder darüber hinaus) nicht nur eine schlechtere Verdichtung des Abfalls, sondern vielfach war diese mit verschiedenen Verdichtungsgeräten gar nicht möglich, da die Einbaugeräte in der aufgeweichten Oberfläche versunken sind. Die Materialbeschaffenheit weist in diesem Fall eine breiige Konsistenz auf und die Tragfähigkeit geht vollständig verloren. Diese Beobachtungen konnten auch im Deponiebetrieb infolge von eindringenden Niederschlägen gemacht werden, welche die oberflächennahe Abfallschicht unbefahrbar bzw. eine Verdichtung unmöglich machten (Abb. 2).



Abbildung 2: vernässte Abfalloberfläche nach Niederschlagsereignis (links), Verdichtung einer stark vernässten Abfalloberfläche (rechts)

Der hochverdichtete Einbau des MBA Materials führt aufgrund des geringen Porenvolumens auf der einen Seite zu einer geringen Infiltrationsrate sowie gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit ( $k_f = 10^{-6}$  bis  $10^{-9}$  m/s) und auf der anderen Seite zu einer Sättigung des reduzierten Porenraums bei niedrigeren Wassergehalten.

In der Abbildung 3 sind die Gesamtporositäten von MBA-Materialien verschiedener Stückgröße und verschiedener Einbauwassergehalte als Funktion der Trockendichte dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass mit zunehmender Trockendichte die Gesamtporosität abnimmt. Im Gegensatz zu Bodenmaterial zeigt sich hier, dass feinere Materialien nicht grundsätzlich größere Gesamtporositäten aufweisen müssen als die gröberen Materialien. Die geringsten Einbaudichten und damit die höchsten Porositäten konnten hier bei dem Grobmaterial erzielt werden. Bei gleicher Trockendichte sind die Porositäten des Materials < 30 mm geringfügig höher als beim Material < 8 mm.

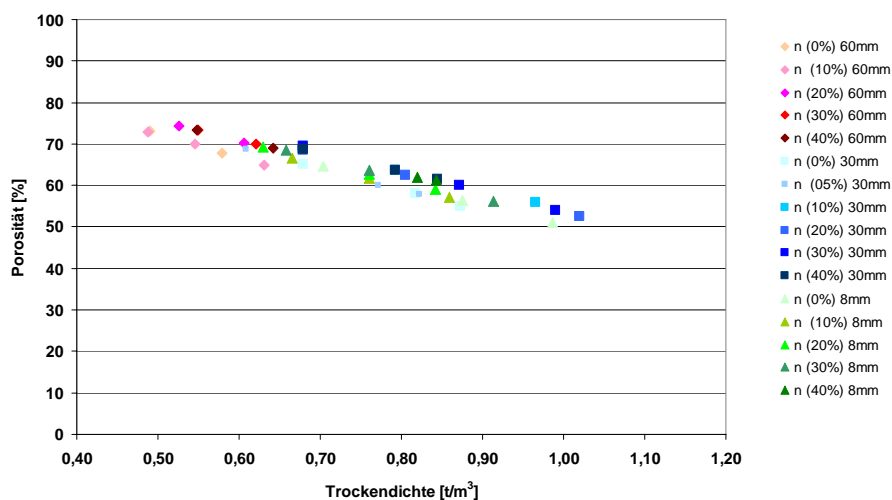


Abbildung 3: Gesamtporositäten von verschiedenen MBA-Materialien und verschiedenen Einbauwassergehalten

In Hinblick auf das nach einem Niederschlagsereignis speicherbare Wasservolumen ist die Sättigung des Porenraumes beim Einbau von Interesse. In der Abbildung 4 ist der Grad der Wassersättigung des Porenraumes für Abfälle verschiedener Stückgröße und Einbauwassergehalte in Abhängigkeit der erzielten Trockendichte dargestellt. Es zeigt sich für gleiche Einbauwassergehalte unabhängig von der Materialstückgröße ein linearer Zusammenhang zwischen der Trockendichte und dem Sättigungsgrad. Des Weiteren wird ersichtlich, dass bereits bei den gemäß AbfAbIV maximal zulässigen Einbauwassergehalten von 35 % bei hohen geforderten Einbaudichten eine Sättigung von über 50 % erreicht werden kann. Für die Praxis bedeutet dies, dass die obersten Schichten dieser Abfälle sehr schnell nach Niederschlagsereignissen vollständig gesättigt werden. In der Folge kommt es bei einer entsprechenden Ausbildung der Oberfläche zu einem Oberflächenabfluss oder zu einer Pfützenbildung. Die gesamte Abfallschicht wird auch langfristig nur geringe Volumen speichern können.

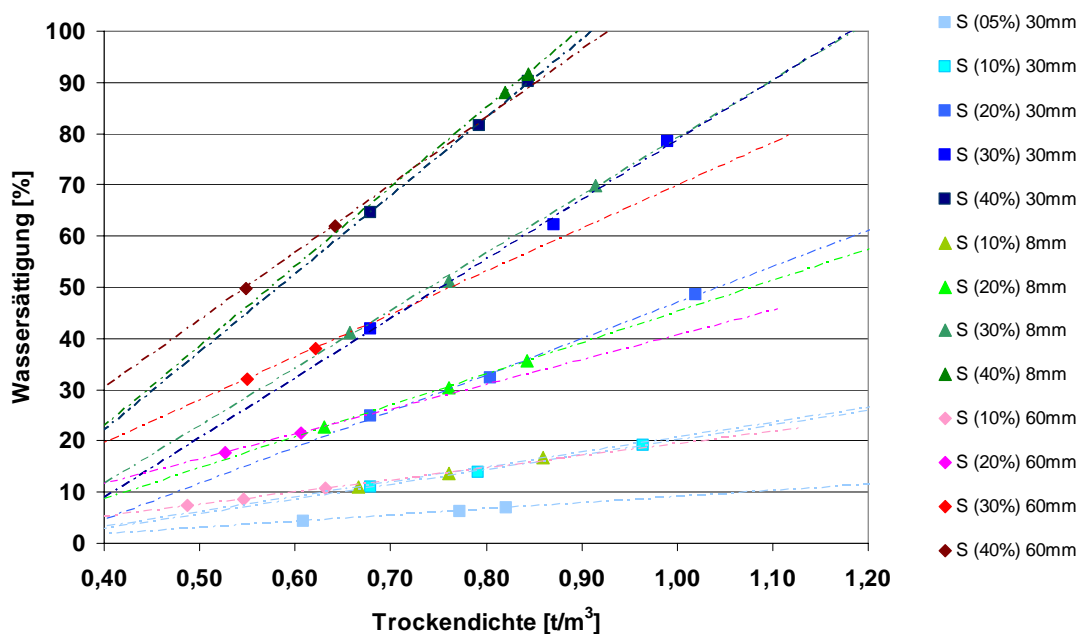


Abbildung 4: Wassersättigung des Porenraumes für Abfälle verschiedener Stückgröße und Einbauwassergehalte

Für die langfristige Speicherung ist die Kenngröße der Wasserhaltekapazität entscheidend, d.h. das Wasservolumen, das entgegen der Schwerkraft im Abfall gehalten werden kann. Kommt es zu einem Überschreiten der Wasserhaltekapazität, so erfolgt ein Wasserabfluss an der Basis. Die Wasserhaltekapazität hängt maßgeblich von der Porosität und der Porengröße ab. In der Abbildung 5 sind die Wasserhaltekapazitäten für verschiedene MBA-Materialien im Vergleich zu unvorbehandelten Abfällen als Funktion der Einbaudichte (trocken) dargestellt. Bei dem MBA-Material < 25 mm ist zu beachten, dass der Inertanteil im Vergleich zu den anderen Abfällen hoch war, d.h. das Wasserbindevermögen des Abfalls dadurch geringer ist. Bei allen Abfällen wird deutlich, dass mit zunehmender Trockendichte die Wasserhaltekapazität teilweise deutlich reduziert wird. Die Ursache hierfür ist darin zu sehen, dass durch die Verdichtung die Anzahl der kleinen Poren und damit die Kapillarität

des Abfalls zwar erhöht werden, aber die gleichzeitige Reduktion der Gesamtporosität jedoch größer ist. Für diese Abfälle liegt die Wasserhaltekapazität im Bereich von ca. 30 - 50 Vol.-%. Der Einbau der Abfälle mit einem Wassergehalt nahe dem optimalen Proctorwassergehalt bedeutet daher in vielen Fällen, dass die Wasserhaltekapazität erreicht wird, so dass langfristig nur noch geringe Volumen gespeichert werden können. Andererseits führt ein Einbau auf dem trockenen Ast der Proctorkurve zu u.U. hohen speicherbaren Wasservolumen, so dass es auch nach mehrjährigem Einbaubetrieb noch zu keinen Basisabflüssen kommt (Entenmann, 2009).

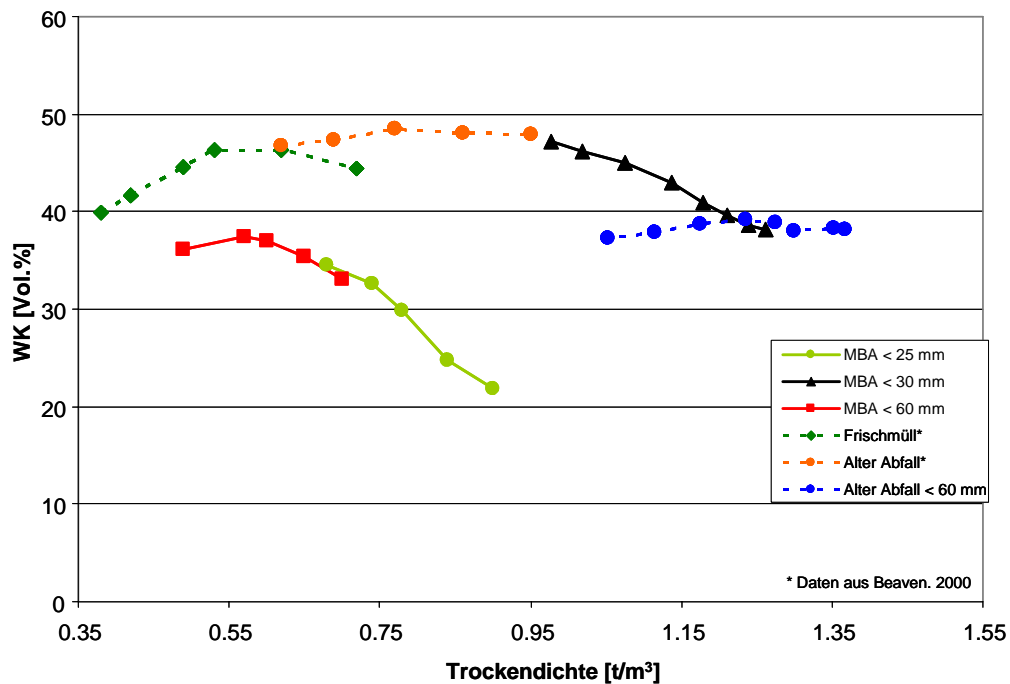


Abbildung 5: Wasserhaltekapazität für verschieden Abfälle

Die hohen Wassergehalte können dazu führen, dass lokal Porenwasserdrücke in der Deponie entstehen werden, die bei der Standsicherheitsberechnung zu berücksichtigen sind. Untersuchungen zur Entstehung von Porenwasserdrücken als Folge von Auflasten in gesättigten Systemen liegen für MBA-Materialien nur wenige vor (Entenmann, 2009 und Münnich et al., 2007). Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zu den Kenntnissen aus der Bodenmechanik die Porenwasserüberdrücke im Abfall bei gleicher zusätzlicher vertikaler Auflast deutlich geringer sind. Die Ursache für dieses abweichende Verhalten kann bisher nicht angegeben werden. Die Versuche zeigen aber auch, dass in Abhängigkeit von den hydraulischen Randbedingungen der Porenwasserüberdruck nach dem Aufbringen der Last auch schnell wieder abgebaut werden kann. Zusätzlich durchgeführte Untersuchungen an teilgesättigten MBA-Materialien zeigen, dass auch dort Porenwasserüberdrücke auftreten können, deren Betrag jedoch noch deutlich unter den Werten bei gesättigten Verhältnissen liegt. Für Standsicherheitsberechnungen sollte Porenwasserüberdruck im Bereich von Außenböschung berücksichtigt werden, da dadurch die Sicherheiten u.U. deutlich reduziert werden.

Ein Einfluss des Wassergehaltes der Abfälle auf die Gesamtscherfestigkeit ist von zahlreichen Autoren (z.B. Gallenkemper und Rohring, 2007) bei direkten Scherversuchen beobachtet worden. Ergebnisse aus einer Versuchsreihe von drainierten Scher- bzw. Zugversuchen an MBA-Material mit variierenden Wassergehalten (Bauer et al., 2007) zeigen eine Reduktion der mobilisierten Scherfestigkeit bei Wassersättigungen im Bereich der Feldkapazität auf. Diese Beobachtungen konnten in großmaßstäblichen Triaxialversuchen verifiziert werden. Unter konsolidierten drainierten Versuchrandbedingungen wurde der Einfluss unterschiedlicher Wassergehalte auf das Festigkeitsverhalten von verschiedenen MBA Materialien ermittelt. Insgesamt konnte bei allen untersuchten MBA Abfällen ein Festigkeitsverlust bei höheren Wassergehalten festgestellt werden, der sich in Abhängigkeit der Abfallzusammensetzung in Form einer Reduzierung der Scherparameter zeigte (Abb. 6).

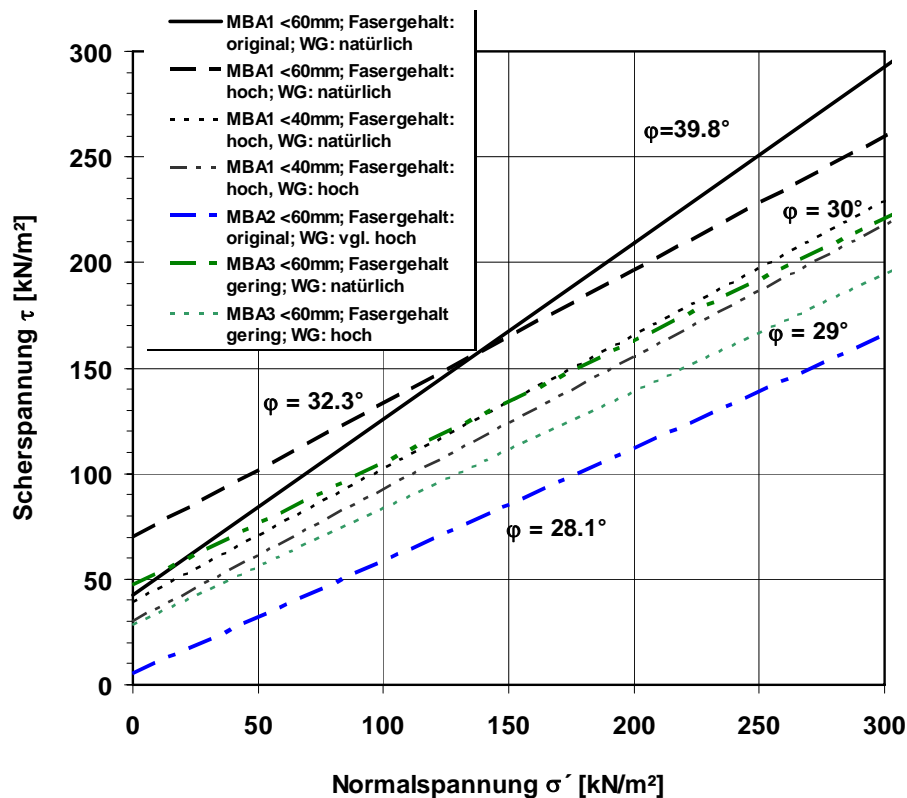


Abbildung 6: CD Triaxialversuche verschiedener MBA Materialien

Mit den Ergebnissen aus den Scherversuchen wurde eine Abschätzung des Einflusses einer hohen Wassersättigung auf die Stabilität einer Deponieböschung durchgeführt und eine Reduktion der Standsicherheit um bis zu 20% festgestellt, wobei nur die Reduktion der Scherparameter und kein zusätzlicher Wasseraufstau und daraus resultierender hydrostatischer Porenwasserdruck im Deponiekörper berücksichtigt wurde, der die Standsicherheit zudem reduzieren würde.

Bei weiterer Reduzierung des Porenraums, z.B. durch weitere Auflasterhöhung, und behindertem Wasserabfluss können bei zu geringer hydraulischer Durchlässigkeit temporär Porenwasserüberdrücke entstehen, die sich in Abhängigkeit der Durchlässigkeit mit der Zeit abbauen, jedoch die Festigkeit des Materials reduzieren. Die Wirkung von Porenwasser-

überdruck auf die Festigkeit kann in undrainierten großvolumigen Triaxialversuchen mit der Ermittlung von effektiven Scherparametern untersucht werden. Bei einem MBA Material, welches beispielsweise im drainierten Triaxialversuch einen Reibungswinkel von  $30^\circ$  aufwies, reduzierte sich der Reibungswinkel unter undrainierten Bedingungen durch die Entstehung von Porenwasserüberdruck auf ca.  $22^\circ$ .

Untersuchungen zur Wirkung von Porenwasserüberdruck auf die Festigkeit liegen bis jetzt nur wenige vor (Bauer et al., 2009). Die Stückgrößen von MBA-Deponat erfordern jedoch die Verwendung von größeren Versuchsgeräten, die die konventionellen bodenmechanischen Geräteabmessungen übersteigen und somit nur in den seltensten Fällen verfügbar sind. Am Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig steht eine Groß-Triaxialzelle zur Verfügung, die speziell für die Anforderungen und die Randbedingungen der MBA-Reststoffe entwickelt wurde. Sie ermöglicht großmaßstäbliche Versuche an MBA-Reststoffen, ohne einen weiteren Siebschnitt für die Laboruntersuchungen vornehmen zu müssen, in einem verhältnismäßigen Aufwand. Die Probekörperabmessungen sind mit einem Probendurchmesser von 475 mm und Probenhöhe von 980 mm bei gestört hergestellten Probekörpern optimal an die Materialgröße der MBA-Reststoffe angepasst.

Bei Untersuchungen zur Wirkung von Porenwasserüberdruck auf die Festigkeit in undrainierten Triaxialversuchen wiesen verschiedene MBA Materialien infolge unterschiedlicher Behandlungsverfahren und den daraus resultierenden strukturellen Zusammensetzungen einen signifikant verschiedenen Effektivspannungsverlauf auf. Stark strukturierte MBA Materialien, die einen Anteil faseriger Abfallkomponenten von ca. 20 Gew.-% besitzen, weisen nach der Entstehung von Porenwasserüberdruck und Überschreiten eines Maximalwertes immer noch Festigkeitsreserven auf, bevor es zu einem Probenversagen kommt. Im Gegensatz dazu fehlen bei strukturarmen MBA Materialien die bewehrungsähnlichen Komponenten und ein Probenversagen tritt ein, bevor sich der Porenwasserüberdruck zu einem Maximum entwickeln kann.

Die Abfallzusammensetzung, insbesondere im Hinblick auf die bewehrungswirksamen faserigen Abfallbestandteile, nimmt auch unter undrainierten Versuchsrandbedingungen bedeutenden Einfluss auf das Spannungsverformungsverhalten und die Festigkeitseigenschaften des Abfallmaterials. Erwartungsgemäß weisen MBA Materialien mit größeren Anteilen faseriger Komponenten auch höhere Scherparameter auf, d.h. eine Absiebung der heizwertreichen Fraktion wirkt sich nachteilig auf die Festigkeitseigenschaften aus. Dieser Verlust kann durch verbesserte Reibungseigenschaften nur teilweise kompensiert werden (Kölsch, 2006).

Die Ausbildung von Schichten, die einen erhöhten Wassergehalt, der über dem optimalen Wert der Proctorkurve liegt, lässt sich in der Ablagerungspraxis kaum vermeiden. Das Aufbringen einer wasserundurchlässigen Schicht in Zeiten hoher Niederschlagsraten oder in Zeiten, in denen nicht unmittelbar ein Abfalleinbau erfolgt, führt zu einer Kondenswasserbildung unterhalb der Folie und damit zu einer starken Vernässung der obersten Abfallschichten. Wird stattdessen eine semipermeable Membran aufgebracht, so kann die Kondenswasserbildung stark gemindert werden. Das Einbringen von dränierenden Zwischenschichten im Abfallkörper wird seit langem diskutiert (z.B. Kühle-Weidemeier, 2005; Hupe et al, 2008), eine breite Anwendung haben sie bisher nicht gefunden. Bei der Standsicherheitsberechnung des Deponiekörpers kann durch das Einfügen der Dränschichten die erforderliche Standsicherheit nachgewiesen werden. Inwieweit in der Praxis Wasser über die Dränschichten abgeleitet wird, kann bisher nicht angegeben werden. Es muss hierbei bedacht werden,

dass aufgrund der sehr geringen Volumenflüsse aus der MBA-Schicht nicht sichergestellt ist, dass ein Abfluss in der Dränschicht überhaupt erfolgt und das Sickerwasser nicht in die darunter liegende MBA-Schicht vollständig infiltriert.

### **Zusammenfassung**

Der Siedlungsabfall erfährt durch die mechanisch-biologische Behandlung neben den biologisch-chemischen Veränderungen auch eine grundlegende Veränderung seiner Struktur und der physikalischen Eigenschaften. MBA ist homogener und die Materialstückgrößen im Vergleich zu dem bisherigen Deponat deutlich geringer. Dies führt zu größeren Einbau- und Lagerungsdichten sowie einem deutlich verringerten Porenraum und wirkt sich somit auf die hydraulischen Eigenschaften Wasserhaltekapazität, Sättigung und Durchlässigkeit aus. Der Einbau der Abfälle erfolgt unter dem Aspekt einer möglichst hohen Einbaudichte, die unmittelbar mit dem dazugehörenden optimalen Wassergehalt verbunden ist. Die Gesamtporosität des Abfalls ist mit ca. 50 - 70 % hoch, doch bei hohen Einbaudichten ist der Sättigungsgrad der Poren mit Wasser bereits sehr hoch, so dass der Abfall bereits nach dem Einbau nur noch wenig Wasser aus Niederschlägen aufnehmen kann, bzw. er schnell Wasser an tiefere Schichten abgibt, da die Wasserhaltekapazität dann überschritten ist. Hohe Sättigungsgrade können somit schon bei verhältnismäßig niedrigen Wassergehalten auftreten und bei weiterer Reduzierung des Porenraumes durch den fortschreitenden Deponieaufbau ist die Bildung von temporären Porenwasserüberdrücken möglich.

Untersuchungen im Labor wie auch die Anlage von Testfeldern haben einen maßgeblichen Einfluss des Wassers auf das Festigkeitsverhalten aufgezeigt. Insbesondere auftretender Porenwasserüberdruck infolge geringer oder behinderter Durchlässigkeiten wirkt sich in Abhängigkeit der Abfallzusammensetzung unterschiedlich auf das Festigkeitsverhalten aus. Die Ausschleusung der heizwertreichen Abfallkomponenten führt zu einem signifikanten Festigkeitsverlust. Dem Abfallmaterial gehen Festigkeitsreserven verloren, die in der Vergangenheit eine maßgebende Tragkomponente des Abfalls darstellten und insbesondere in Bauzuständen bei temporären Böschungen ausgenutzt wurden. Im Vergleich zu den in der Vergangenheit abgelagerten unbehandelten Siedlungsabfällen weist mechanisch-biologisch behandelter Restabfall den großen Vorteil auf, dass Laboruntersuchungen zur geotechnischen Charakterisierung des Deponates in einem verhältnismäßigen Aufwand durchgeführt werden können. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass in der zum 16.07.2009 in Kraft getretenen Neufassung der Deponieverordnung (Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechtes) keine konkreten Anforderungen an die Festigkeit des Ablagerungsmaterials mehr gemacht werden besteht die Notwendigkeit das Ablagerungsverhalten des MBA-Deponates fachlich zu bewerten und erforderlichenfalls geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Es bestehen weiterhin die Forderungen eines standsicheren Deponiekörpers (Anhang 5 Nr. 4 Ziffer 7) und dessen regelmäßige Überprüfung, insbesondere in Bezug auf die Abfallkenn-  
daten für den Standsicherheitsnachweis.



---

**Literatur**

Bauer, J., K. Münnich, K. Fricke, 2009: "Response of MBT residues in large scale triaxial compression tests", In: Sardinia 2009, 12th International Waste Management and Landfill Symposium Cagliari, Italien

Bräcker, W., 2008: "Deponietechnik für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle", Abfallwirtschaftsfakten 4.2, Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, Zentrale Unterstützungsstelle Abfall, Gentechnik und Gerätesicherheit (ZUS AGG)

Entenmann, W., 2007: Einbau von MBA-Material auf Deponien, Deponietage Minden, DWA 2007, Hennef

Entenmann, W., 2009: Geotechnische Untersuchungen an MBA-Material - Ermittlung bodenmechanischer Kennziffern, Porenwasserdrücke, Standsicherheitsuntersuchungen. Fachgespräch MBB-Deponien. Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 19.10.2009 (unveröffentlicht)

Gallenkemper, B., D. Rohring, 2007: "Praxiserfahrungen mit dem Einbau von MBA-Deponat im Deponiebetrieb", Müll und Abfall, 12, Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 580-584

Hupe, K.; W. Oltmanns; K.-U. Heyer; R. Jäger; R. Stegmann (2008): MBA-Deponie Hillern: Aufbau und Standsicherheit der Deponie. Müll und Abfall H. 10

Kölsch, F., K. Münnich, 2006: "Deponierung stabilisierter Restabfälle", Proceedings of the 5th International Conference of the ORBIT Association "Biological Waste Management - from Local to Global", Weimar

Kühle-Weidemeier, M. (2005): Bedarf, Konstruktionsgrundlagen und Betrieb von Deponien für mechanisch – biologisch behandelte Siedlungsabfälle. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Band 127.

Münnich, K., J. Bauer, K. Fricke, 2007: "Investigations of pore water pressures in MBT waste material", In: Sardinia 2007, 11th International Waste Management and Landfill Symposium Cagliari, Italien

Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV); Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27. April 2009 (BGBl I Nr. 22 vom 29. April 2009 S. 900)