

Mechanische Eigenschaften von Siedlungsabfall: Entwicklung eines Klassifikationssystems

Ulrich Langer, Neil Dixon

Department of Civil and Building Engineering, Loughborough University, GB

1 Warum ist die Klassifizierung von Siedlungsabfall notwendig?

Eine Deponiekonstruktion muss während ihrer gesamten Laufzeit sowohl die Stabilität der Deponieabdichtung als auch die des Deponiekörpers gewährleisten. Beides wird von der EUROPÄISCHEN DEPONIERICHTLINIE (1999) gefordert. Um die Stabilität einer Deponie gewährleisten zu können, sollten zum einen das mechanische Verhalten und zum anderen weitere charakteristische Eigenschaften ihrer Komponenten bekannt sein. Dieses schließt Auswirkungen auf Verhalten und Eigenschaften durch wechselnde Abfallströme oder durch Abbauprozesse ein.

In einer Deponiekonstruktion repräsentiert das Ablagerungsgut das größte strukturelle Element, welches nicht nur den Deponiekörper, sondern auch die Stabilität und die Integrität des Deponieabdichtungssystems beeinflussen kann (JONES UND DIXON, 2003). Trotz dieser kritischen Rolle, die der Abfall bei einer Stabilitätsbetrachtung spielt, ist die Kenntnis von Siedlungsabfall als strukturelles Element sehr limitiert. Oft scheitern Vergleich und Interpretation von Versuchsergebnissen an uneinheitlichen Beschreibungen des Versuchsmaterials und der Versuchsrandbedingungen. Mit einem System, das Abfallkomponenten aufgrund ähnlicher mechanischer Eigenschaften klassifiziert, könnte eine Basis für Vergleiche geschaffen und somit Interpretationen erleichtert werden, die einen Beitrag zum Verständnis des mechanischen Verhaltens des Abfallkörpers leisten.

Aufgrund der signifikanten Heterogenität von Abfall und der begrenzten Anzahl von abfallmechanischen Untersuchungen ist ein Klassifikationssystem notwendig, um einen einheitlichen Rahmen für die Abfallmechanik zu entwickeln und folglich Deponieplanung und -betrieb zu verbessern. Führt man sich Veränderungen im Konsumverhalten des Abfallproduzenten, Veränderung durch Einführung von legislativen Auflagen, wie z.B. die EUROPÄISCHE DEPONIERICHTLINIE (1999), oder durch Verfahren wie die mechanisch-biologische Vorbehandlung vor Augen, dann sind Erfahrungswerte aus der Vergangenheit eine eher unsichere Basis für die Beurteilung des zukünftigen Deponieverhaltens.

Der Abfallkörper ist durch unterschiedliche Komponenten heterogen geprägt und besitzt anisotrope physikalische und variierende biologische Eigenschaften. Um eine Beurteilung des mechanischen Verhaltens (z.B. Kompressibilität und Scherverhalten) des Abfallkörpers zu ermöglichen, ist es notwendig, die Eigenschaften seiner Komponenten zu

untersuchen. Der erster Schritt ist die Entwicklung einer Klassifikation, welche die Komponenten bezüglich ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften zusammenfasst und eine Bewertung der Komponenten, die das mechanische Verhalten des gesamten Abfallkörpers potentiell beeinflussen könnten. Der zweite Schritt ist die Beschreibung der Gesamteigenschaften, wie mechanisches Verhalten oder Struktur des Abfallkörpers.

Bei der Entwicklung eines solchen Klassifikationssystems bietet sich eine Orientierung an bestehenden Bodenklassifikationen an. Allerdings müssen zusätzliche Eigenschaften des Abfalls (z. B. Abbaupotential und Kompressibilität der einzelnen Komponenten) berücksichtigt werden. WHITLOW (1983) rechtfertigt die Notwendigkeit eines Klassifikationssystems für Böden und beschreibt die Prinzipien, wie folgt:

„Das System muss umfassend genug sein, um sämtliche [...] Ablagerungen zu beinhalten, aber trotzdem angemessen, systematisch und unkompliziert sein. [...] Ohne ein Klassifikationssystem können Informationen oder Empfehlungen für Planung und Konstruktion, die auf einem bestimmt Materialtyp basieren, irreführend sein, und es könnte sich als schwierig erweisen, Erfahrungswerte auf zukünftige Planungen anzuwenden. Bis ein System mit konventioneller Nomenklatur etabliert ist, stiften widersprüchliche Interpretationen von gebräuchlichen Fachtermini Verwirrung. [...] Eine Klassifikation muss eine Reihe von Bedingungen erfüllen:

- a) Es muss entgültige Termini beinhalten, die zugleich kurz und dennoch sinnvoll sind [...]*
- b) Ihre Klassen und Unterklassen müssen durch Parameter definiert sein, die möglichst einfach quantitativ messbar sind*
- c) Ihre Klassen und Unterklassen müssen Böden klassifizieren, die gleiche Charakteristika aufweisen und somit gleiche technische Eigenschaften implizieren.*

Diese Sachverhalte gelten ebenso für ein Abfallklassifikationssystem. Wichtige charakteristische Eigenschaften werden in dieser Arbeit hervorgehoben. Durch eine Unterscheidung nach Komponentenformen wird mit Hilfe von Daten aus der Literatur in einem ersten Rahmenwerk eine geotechnische Klassifizierung von Abfallkomponenten angeregt.

2 Existierende Klassifikationssysteme

Eine Vielzahl der bestehenden Klassifikationen basieren auf Materialgruppen (z.B. SIEGEL ET AL., 1990) oder unterscheiden nur „bodenähnliche und bodenunähnliche“ oder faserige Stoffe (MANASSERO ET AL. 1997; THOMAS ET AL. 1999). Diese Ansätze erfüllen nicht die oben genannten Anforderungen einer umfassenden und dennoch einfachen

Klassifikation. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der bestehenden Klassifikationen und deren Schlüsselparameter. Einige dieser Klassifikationen werden im Folgenden diskutiert.

Tabelle 1 Zusammenfassung existierender Klassifikationssysteme

Autor	Klassifizierung nach:	Parameter
TURCZYNSKI, 1988	Fest/flüssig/plastisch; mineralisch/organisch; Abfallart	Dichte, Durchlässigkeit, Scherparameter
SIEGEL ET AL., 1990	Materialgruppen	Massenverteilung der Komponenten
LANDVA UND CLARK, 1990	Organische, anorganische Materialien	Abbaubarkeit (schnell, langsam, nicht); Form (hohl, flach, lang, sperrig)
GRISOLIA ET AL., 1995	Abbaubare, inerte, verformbare Materialgruppen	Festigkeit, Verformbarkeit, Abbaubarkeit
KÖLSCH, 1996	Materialgruppen	Größe, Form (Dimension)
MANASSERO ET AL., 1997	Bodenähnliche, andere Materialien (ETC8, 1993)	Index Eigenschaften (Wassergehalt, Raumgewicht, Durchlässigkeit, etc.)
THOMAS ET AL., 1999	Bodenähnliche, bodenunähnliche Materialien	Materialgruppen

LANDVA UND CLARK (1990) schlagen eine Klassifikation vor, die zwischen **organischen** und **anorganischen** Komponenten unterscheidet. Die organischen Komponenten werden zusätzlich in biologisch abbaubar und biologisch nicht abbaubar gegliedert, während die anorganischen Komponenten in chemisch abbaubar und chemisch stabil unterteilt werden. Auch werden hohlraumbildende Komponenten in jeder der Unterteilungen berücksichtigt. Diese Klassifikation beinhaltet detaillierte Informationen über Abbaubarkeit und Kompressibilitätspotential, berücksichtigt jedoch Materialeigenschaften, wie z.B. Zugfestigkeit.

GRISOLIA ET AL. (1995) definiert **abbaubare**, **inerte** und **verformbare** Komponentengruppen und klassifiziert Abfall, in dem die prozentualen Anteile jeder dieser Gruppen in einem Dreiecksdiagramm aufgetragen werden. Die Stärke dieses Systems ist die Information über Abbaubarkeit und Kompressibilität der Komponenten. Einige Komponenten können jedoch nicht eindeutig einer Gruppe zugeordnet werden. So sind beispielsweise organische Abfälle abbaubar und gleichzeitig stark verformbar. Auch wird hier nicht die Form der Komponenten in Betracht gezogen.

Das Klassifikationssystem von KÖLSCH (1996) unterscheidet **Materialgruppen**, **Größe** und **Form (Dimension)** der Komponenten. Der Vorteil dieses Systems ist die genauere Betrachtung der Komponenteneigenschaften, was sehr gut mit den bekanntlich stark variierenden Komponentenformen und -eigenschaften vereinbar ist. Der Nachteil ist die Vielzahl von Informationen, die für diese detaillierte Betrachtung zur Verfügung stehen müssen. Darüber hinaus wird jedoch die Abbaubarkeit nicht berücksichtigt. Dieses Klassifikationssystem eignet sich daher eher für Forschungszwecke als für den praktischen Gebrauch.

Keines der existierenden Systeme erfüllt die Anforderungen einer abfallmechanischen Klassifikation; sie beinhalten jedoch sehr nützliche Kriterien. Die erforderlichen Informationen für eine Klassifizierung der Komponenten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Informationen über Komponentenform sind erforderlich, um zwischen dreidimensionalen kompressiblen und inkompressiblen Komponenten und zweidimensionalen Bewehrungskomponenten zu unterscheiden. Diese Unterscheidung würde eine Klassifikation der Komponenten bezüglich deren potentiellen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Abfallkörpers erlauben.
- Für jede Materialgruppe ist eine Komponentengrößenverteilung erforderlich.
- Die Unterscheidung in Materialgruppen basierend auf Materialeigenschaften, und die Festlegung von dominierenden Gruppen ist in Verbindung mit den Gewichtsverhältnissen der Materialgruppen bezogen auf Größe und mechanische Eigenschaften der Komponenten erforderlich.
- Notwendig ist eine Einschätzung der Kompressibilität und des Potentials der Komponenten ihre Form zu ändern.
- Notwendig ist eine Einschätzung des abbaubaren Potentials für sowohl organische als auch anorganische Komponenten (z. B. Korrosion, chemische Zersetzung).

3 Elemente des Klassifikationssystems

3.1 Beschreibung der Komponenten

3.1.1 Materialgruppen

Zu Beginn der Klassifizierung müssen die Hauptabfallkomponenten bezüglich ihres Materialtyps identifiziert werden. Aufgrund der Vielzahl von Materialien im Abfall ist die Identifikation von Materialgruppen ein praktischer Ansatz. In einer Studie über die Abfallzusammensetzung in Oregon, USA, (DEQ, 1998) wurden folgende Gruppen untersucht: Organisches Material, Papier, Holz, Kunststoffe, Metall (Fe und Nicht-Fe), bo-

denähnliche Stoffe, Keramik, Glas, inertes Material und Gummi. Die Abfallzusammensetzung ist definiert durch den prozentualen Massenanteil einer Materialgruppe in der Probe. Der Gebrauch von nicht einheitlich definierten Materialgruppen bei Klassifizierung von Abfallproben für experimentelle Programme stellt sich als ein signifikantes Hindernis beim Vergleich von Informationen über das Abfallverhalten dar. Da in vielen Fällen der Hintergrund, vor dem die spezifischen Materialgruppen gewählt wurden, nicht erläutert wird, können die auf das mechanische Verhalten wirkenden Einflussfaktoren nicht richtig verstanden und bewertet werden.

3.1.2 Mechanische Eigenschaften der Materialgruppen

Die Auswahl geeigneter Materialgruppen erfordert die Betrachtung der mechanischen Materialeigenschaften. In diesem Fall werden die Komponenten in ihrem Zustand vor der Ablagerung auf der Deponie betrachtet. Der Grund für die Festlegung dieses Initialzustandes ist die Veränderung der mechanischen Eigenschaften sowie Form und Größe der Komponenten durch den Ablagerungsprozess (z.B. durch Verdichtung) und durch Auflasten, wie darüber liegende Abfallschichten, oder Belastungsumlagerungen, die durch die Kompression bestimmter Abfallkomponenten oder in der Langzeitsicht durch Abbauprozesse zustande kommen. Das Klassifikationssystem muss daher die Möglichkeit bieten, die Komponenten bei der Betrachtung unterschiedlicher Zustände umzugruppieren. Des Weiteren sollten die Gruppen für jede Abfallart passend sein. Folgende Materialeigenschaften werden bei der Gruppierung berücksichtigt:

- Scherfestigkeit
- Zugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Bruchdehnung (bei gegebener Belastung)
- Kompressibilität
- Elastizitätsmodul

Abbildung 1 zeigt Scher-, Zug- und Druckfestigkeit sowie Elastizitätsmodul und Bruchdehnung für die vom DEQ (1998) untersuchten Materialgruppen. Diese Daten könnten zur Identifikation der Komponenten mit ähnlichen Eigenschaften dienen, um sie in Gruppen zusammenzufassen und damit die Menge an Informationen für ein einfaches, aber aussagekräftiges Klassifikationssystem zu minimieren. Zusätzlich können aus Abbildung 1 Gruppen abgeleitet werden, die das mechanische Verhalten (Kompressibilität und Scherverhalten) dominieren könnten. Dieses hängt jedoch auch vom Massenanteil in der Abfallzusammensetzung ab, welche ebenfalls in Abbildung 1 abgebildet ist, und von der Struktur und des Belastungszustand des Abfalls.

Die Informationen über die mechanischen Eigenschaften der Komponenten wurden verschiedenen Quellen entnommen und weisen teilweise eklatante Unterschiede auf. Für die Materialgruppen wurde daher mit gemittelten Werten gearbeitet. Um die Genauigkeit der Datensätze zu verbessern, wäre eine detailliertere Untersuchung der Materialeigenschaften erforderlich.

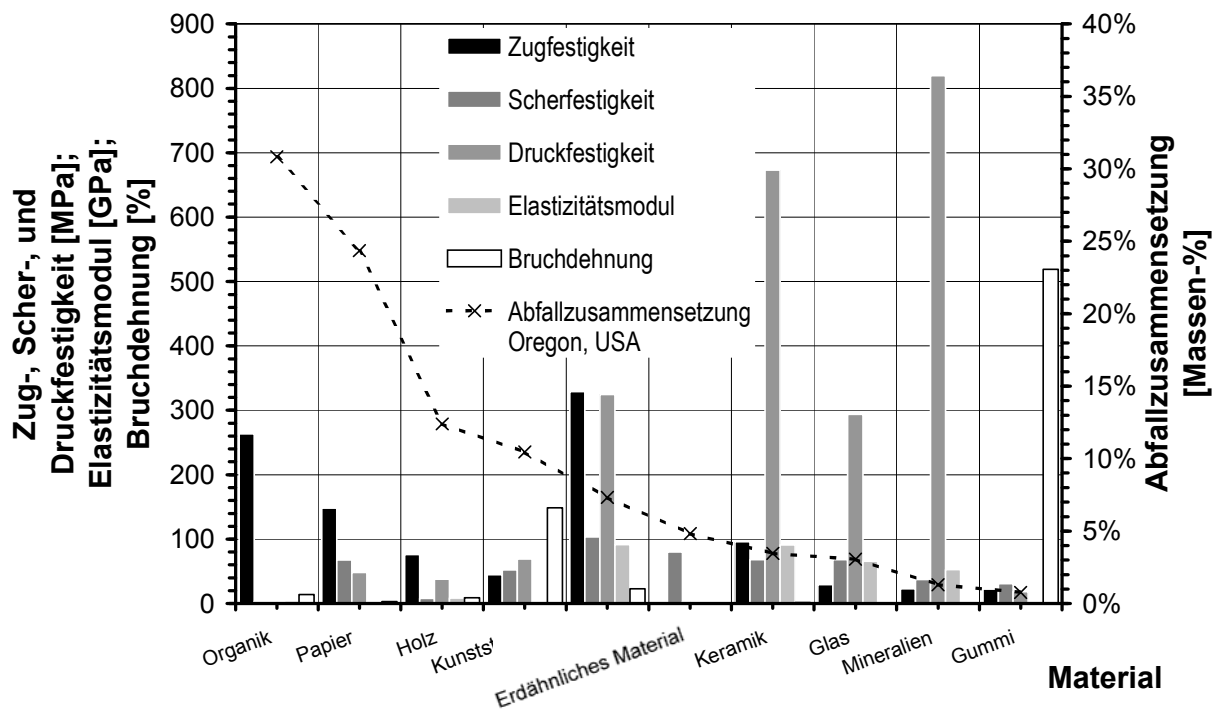


Abbildung 1 Mechanische Eigenschaften der gewählten Materialgruppen

Bei der Zugfestigkeit sind Metall, Papier und organisches Material die dominanten Materialgruppen. Zur Erklärung sei hinzugefügt, dass bei letzterem Material die organischen Fasern großen Einfluss auf den Mittelwert der Zugfestigkeit haben. Bezüglich der Druckfestigkeit zeigt Keramik einen sehr hohen Wert, Glas und Metall hohe bis mittlere Werte, während Papier, Holz und Kunststoffe eher geringe Werte aufweisen. In Abbildung 1 weist organisches und erdähnliches Material keine Druckfestigkeit auf. Im Fall des erdähnlichen Materials ist diese Angabe irreführend, da individuelle Erdpartikel (und in diesem Fall auch Abfallkomponenten) eine hohe Druckfestigkeit aufweisen können. Wichtig ist, dass die Eigenschaften der individuellen Komponenten und nicht die einer Ansammlung von Komponenten, wie z. B. bodenähnliche Stoffe als Quantität, betrachtet werden.

3.1.3 Form der Komponenten

Die Form der Komponenten wird durch drei Klassen charakterisiert, die auf formbezogenen Eigenschaften basieren:

- Inkompressible Komponenten, dreidimensional
- Bewehrungskomponenten, ein- und zweidimensional¹
- Kompressible Komponenten, dreidimensional
 - a) Leicht kompressible Komponenten
 - b) Schwer kompressible Komponenten

Die Unterteilung in leicht und schwer kompressible Komponenten ist für die Einschätzung der aus Ablagerungsprozess oder Mehr-Belastung durch weitere Abfallschichten hervorgerufenen Veränderungen, und damit Klassifizierung der Komponenten, notwendig. Durch das Belasten der kompressiblen Komponenten kann es zum Scheren und Stauchen kommen. Insbesondere organische Abfallkomponenten (z.B. Küchenabfälle) könnten sich in dieser Art und Weise verhalten. Eine vereinfachte Unterscheidung zwischen leicht und schwer kompressiblen Komponenten könnte eine passende Lösung für eine kurzzeitige (Belastungszustand aus Einbringung übersteigt die maximale Druckfestigkeit der leicht kompressiblen Komponenten) und langzeitige (Belastungszustand aus wachsender Ablagerung überschreitet die maximale Druckfestigkeit der schwer kompressiblen Komponenten) Betrachtung sein. Dennoch sind derzeit ungenügend experimentelle Daten vorhanden, um die Anwendbarkeit dieser Unterscheidung vollends zu untermauern.

3.1.4 Größe der Komponenten

Ein weiteres Schlüsselement der Klassifikation ist die Sieblinie des Abfalls bzw. die Größe seiner Komponenten. Um die Massenverteilung innerhalb eines Größenbereichs zu demonstrieren, wurden die Daten von KÖLSCH (1996) herangezogen. Abbildung 2 zeigt die größenbezogene Massenverteilung von Frischmüll aus einem Stadtbezirk mit getrennter Biomüllabfuhr. KÖLSCH (1996) unterscheidet die Komponenten nach Materialart, Form und Größe, wobei folgende Materialgruppen verwendet wurden:

1. Papier/Pappe
2. Weiche Kunststoffe
3. Harte Kunststoffe
4. Metalle
5. Mineralien

¹ Eindimensional: $L \gg B, H$
Zweidimensional: $L, B \gg H$

6. Holz/Leder
7. Vegetabilien
8. Mischmaterial <40mm

Aus Abbildung 2 ist die höchste Massenkonzentration im Bereich 40-120mm ersichtlich. Mutmaßlich sind dies schwere Komponenten wie Glas, Steine, etc. Der Anteil der Feinfraktion <40mm würde ohne getrennte Biomüllsammlung mit Komponenten wie Teebeutel, Kaffeefilter oder Essensresten wahrscheinlich höher ausfallen. Obwohl hier einige Übereinstimmungen mit den Materialgruppen des DEQ (1998) zu erkennen sind, bestehen dennoch signifikante Unterschiede, die einen direkten Vergleich erschweren und die Notwendigkeit einer einheitlichen Klassifizierung unterstreichen.

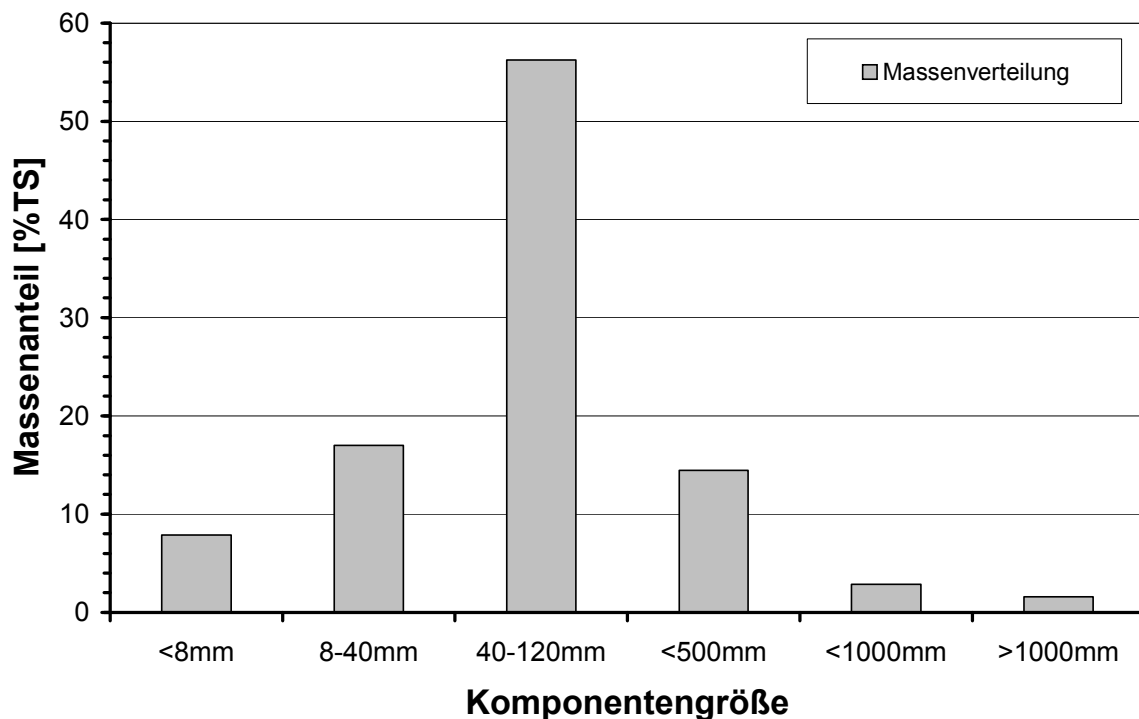


Abbildung 2 Größenbezogene Massenverteilung der Komponenten

Die Materialgruppen wurden basierend auf ihren Eigenschaften in formbezogene Klassen unterteilt, d.h. in Bewehrungs-, kompressible und inkompressible Komponenten. In diesen Klassen wurden als letzter Schritt, wie in der Gesamtprobe, die Komponenten der Materialgruppen auf ihre Größe untersucht: <8mm, 8-40mm, 40-120mm, <500mm, <1000mm, >1000mm. Abbildung 3 zeigt die Massenverteilung in der Klasse der Bewehrungskomponenten. Sehr gut zu erkennen ist die Massenkonzentration in den Materialgruppen Papier und weiche Kunststoffe, die im Größenbereich von 40-120mm liegen und die Bewehrungskomponenten dominieren.

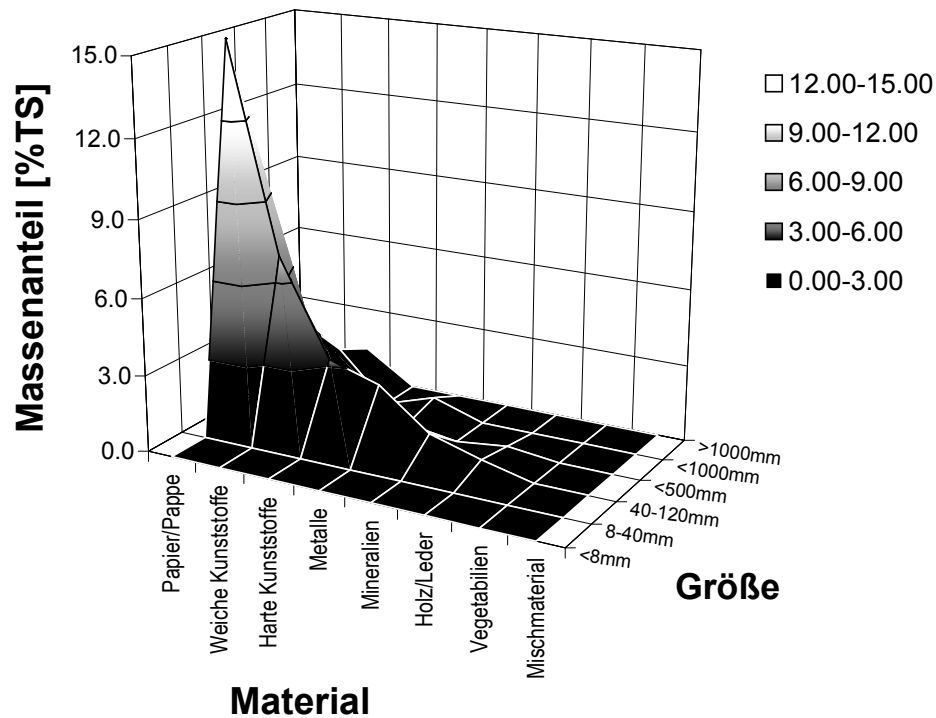


Abbildung 3 Massenverteilung der Bewehrungskomponenten

3.1.5 Abbaupotential

Um die durch den biologischen Abbau hervorgerufenen Veränderungen in der Klassifikation repräsentieren zu können, sind Informationen über das tatsächliche Abbaupotential der Komponenten notwendig. Für die Einschätzung des Abbaupotentials ist die Unterscheidung zwischen schnell, mittelfristig und langfristig abbaubaren Materialien vorteilhaft.

Da der Abfall seinen größten Wandel durch biologischen Abbau erfährt, ist nur dieser im Folgenden berücksichtigt. Prozesse wie Korrosion oder andere chemische Reaktionen hängen vom umgebenden Milieu ab. Bei physikalischem Verfall oder Verwitterung spielen Temperatur, Wassergehalt und Bewegungsvorgänge eine wichtige Rolle. Jedoch sind Informationen in der Literatur diesbezüglich momentan nicht ausreichend.

Kombiniert mit den ursprünglichen mechanischen Eigenschaften der Komponenten stellt das Abbaupotential einen ausschlaggebenden Parameter dar, um potentielle Veränderungen des mechanischen Verhaltens zu bewerten, da die Komponenteneigenschaften durch den Abbau im Laufe der Zeit variieren. Die Unterscheidung verschiedener Abbaustadien kann ebenso an Materialien geknüpft werden. Beispielsweise sind organische Abfälle (vorzugsweise Vegetabilien) schneller abbaubar als Papier oder Kunststoff. In einem umfassenden Klassifikationssystem sollten diese Faktoren berücksichtigt werden.

4 Gliederung des Klassifikationsrahmenwerks

Abbildung 4 zeigt einen Entwurf der Abfallklassifikation. Durch die Kombination von Messungen, bereits veröffentlichten Informationen und Abschätzungen werden die Komponenten einer Abfallprobe auf Materialtyp (und somit Eigenschaften), Größe und Form untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen werden die Komponenten in Gruppen zusammengefasst, um die Anzahl der potentiellen Klassifikationskategorien zu minimieren.

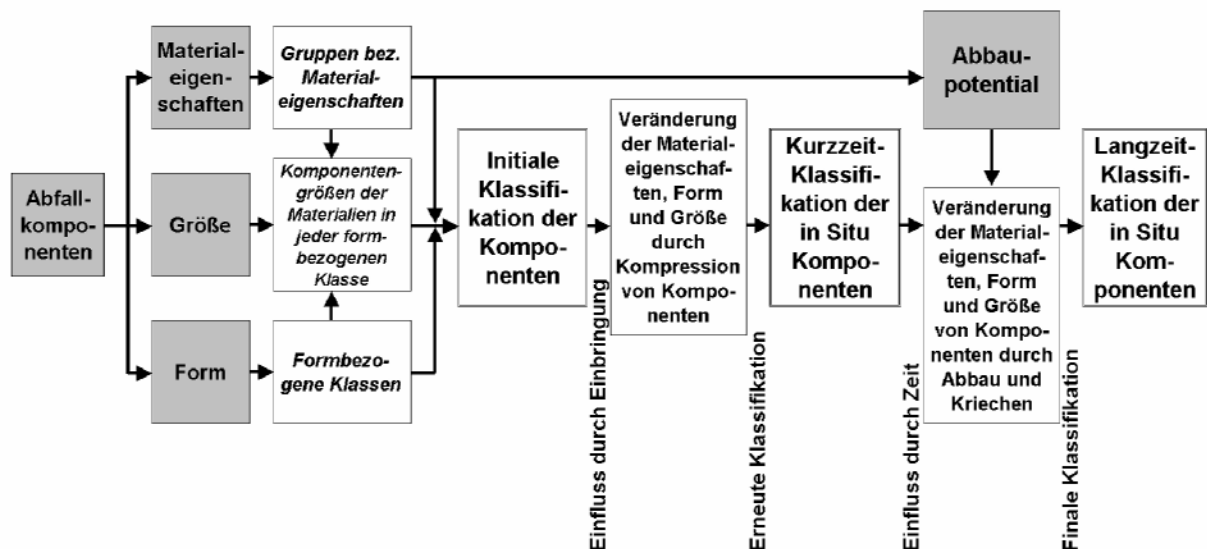


Abbildung 4 Klassifikationsrahmenwerk

Informationen über Form und Größe der Komponenten werden verwendet, um diese den formbezogenen Klassen der Bewehrungs-, kompressiblen und inkompressiblen Komponenten zuzuordnen. Der nächste Schritt beinhaltet die Größenanalyse der Komponenten für jede Materialgruppe in jeder der drei formbezogenen Klassen. Das Abbaupotential ist in jeder Klasse pro Materialgruppe definiert. Es beinhaltet lediglich den tatsächlich biologisch abbaubaren Anteil an Organik. Eine Unterscheidung zwischen kurz-, mittel- und langfristiger Abbaubarkeit wurde bislang nicht berücksichtigt.

Kurzfristige (Einbringung der Abfälle) und langfristige Einflüsse (Abbau) sollten in die Überlegungen mit eingeschlossen werden, insbesondere im Bezug auf ihren Einfluss auf die Veränderung der Komponentenform und -größe und den damit verbundenen mechanischen Eigenschaften. Neu-Klassifizierungen müssen durchgeführt werden, um den wechselnden Randbedingungen (z. B. Veränderung der Auflast durch Einbringung weiterer Abfallschichten) derart gerecht zu werden, dass die Komponenten den adäquaten Materialgruppen, Größenbereichen und Formklassen zugeordnet bleiben.

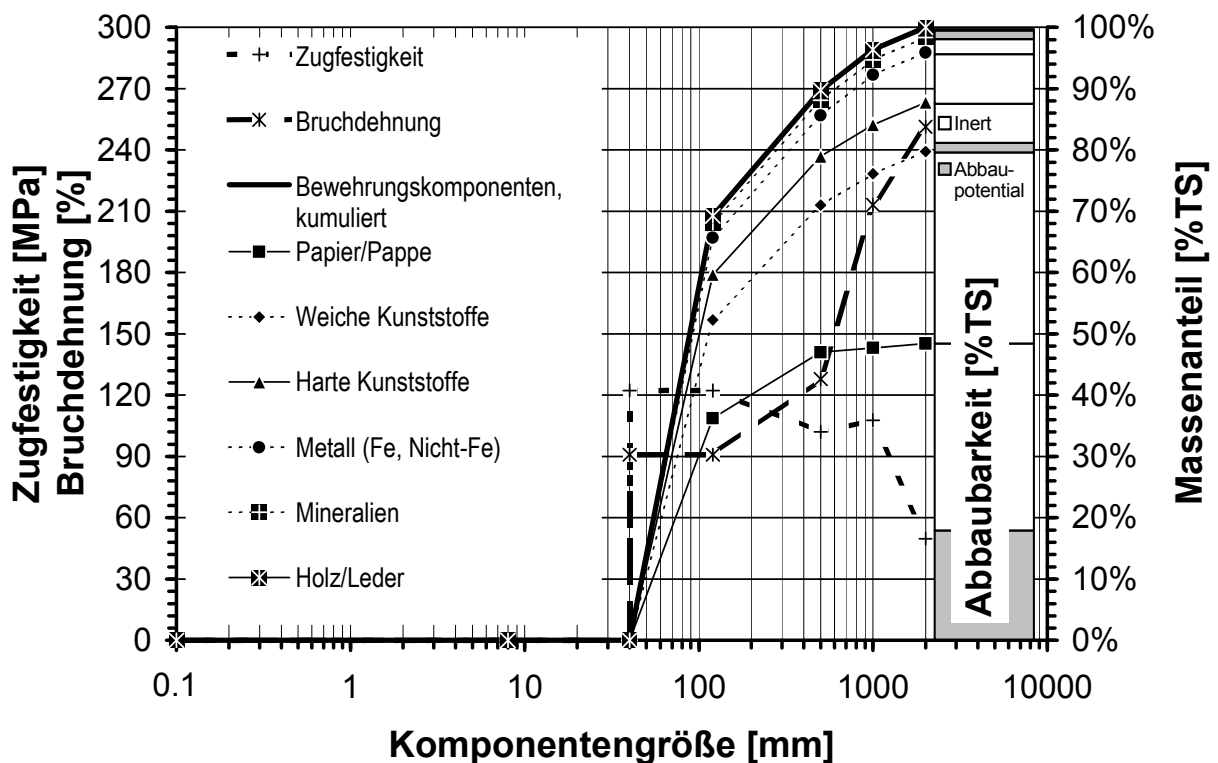


Abbildung 5 Materialgruppen, Größenverteilung, Abbaupotential und Zugfestigkeit formbezogene Gruppen der Bewehrungskomponenten

Die von KÖLSCH (1996) erhobenen Daten wurden zur Demonstration des Auswertungsansatzes und für die initiale Klassifikation vor der Abfalleinbringung verwendet. Abbildung 5 zeigt Informationen über die Klasse der Bewehrungskomponenten. Dargestellt sind die Materialgruppen, denen eine Bewehrungseigenschaft zugesprochen wurde, deren Komponentengrößenverteilung, das Abbaupotential jeder Materialgruppe und eine gewichtete Zugfestigkeit für jeden Größenbereich. Für die Klassen der kompressiblen und inkompressiblen Komponenten wären mit Ausnahme der Zugfestigkeit dieselben Parameter dargestellt. Anstelle der Zugfestigkeit wäre hier die Druckfestigkeit darzustellen. Die Werte für die Zugfestigkeit stammen aus einer Gewichtung der materialspezifischen Zugfestigkeit in Bezug auf deren Anteil an der Gesamtmasse. Mit Informationen über das Abbaupotential wird eine Einschätzung der denkbaren Massenreduzierung ermöglicht und damit die Veränderungen der Materialproportionen in der gesamten Abfallprobe bzw. in den formbezogenen Klassen, was wiederum einer Langzeit-Klassifikation nach Abbau der Organik dienlich ist.

Die Auswertung der Daten von KÖLSCH (1996) resultiert in eine Klassifikation des Abfalls basierend auf den formbezogenen Klassen (Bewehrungs-, kompressible und inkompressible Komponenten), wie Abbildung 6 zeigt. Zusätzlich demonstriert dieses Diagramm die Verschiebung des Abfalls innerhalb der Klassen aufgrund der Betrachtung

tung verschiedener Ablagerungsstadien (direkt vor und nach der Ablagerung und nach einer langzeitigen Betrachtung unter Einfluss des biologischen Abbaus). Der Initialzustand resultiert direkt aus den ursprünglichen form- und materialspezifischen Daten. Einzig die Gruppe der Mischmaterialien wurde zu gleichen Teilen in kompressible und inkompressible Komponenten aufgespalten.

Für den Materialzustand nach Einbringung der Abfälle wurde die Annahme getroffen, dass der prozentuale Anteil von Bewehrungs- und inkompressiblen Komponenten ansteigt, da Komponenten wie Papier, Verpackungsmaterial aus weichem Kunststoff und organische Materialien schon beim Ablagerungsvorgang komprimiert werden können. Bei der Komponentengrößen wurde zwischen <40mm und >40mm unterschieden. Der Grund dafür liegt im Bewehrungspotential der Komponenten; den größeren Komponenten wurde nach Kompression eine Bewehrungsfunktion zugesprochen, während die Komponenten <40mm nach Kompression den inkompressiblen Komponenten zugeordnet wurden. Die Auswirkungen des biologischen Abbaus wurden nicht berücksichtigt, da die Ablagerung als kurzzeitiger Vorgang definiert ist. Für stabile Materialien wie harte Kunststoffen, Holz, Leder und der definierte Anteil des Mischmaterials wurde die Annahme getroffen, dass sie nach Ablagerung in ihrem Initialzustand verbleiben, ebenso wie Metall und Mineralien.

Der Finalzustand des Abfalls wurde auf Grundlage des Abbaupotentials der Materialien in jeder formbezogenen Klasse kalkuliert. Massenverluste durch Methan- und Kohlendioxidbildung und die Umwandlung von organischem in mineralisches Material wurden mit Hilfe von Angaben über das Abbaupotential der relevanten Materialien berechnet (FRICKE ET AL., 1999, Tabelle 2). Eine Reihe von Annahmen musste aufgrund fehlender Informationen getroffen werden. Die verbleibenden kompressiblen Komponenten (harte Kunststoffe, Holz/Leder und Mischmaterialien) wurden nach Annahme von Kompressionsvorgängen durch Belastung aus weiteren Ablagerungsschichten wiederum in Bewehrungskomponenten (>40mm) und inkompressible Komponenten (<40mm) unterschieden. Es wurde angenommen, dass diese Belastung die maximale Druckfestigkeit der verbleibenden kompressiblen Komponenten übersteigt und damit ein Zusammendrücken verursacht. Wegen ihrer Materialeigenschaften blieben Metalle und Mineralien in ihrem Initialzustand.

Tabelle 2 Tatsächlich abbaubarer Anteil ausgewählter Materialien (modifiziert nach FRICKE ET AL., 1999)

Material	Abbaupotential [%TS]
Papier/Pappe	76
Weiche Kunststoffe	0
Harte Kunststoffe	23
Metall	0
Mineralien	0
Holz/Leder	85
Organik	76
Mischmaterial	28

Aufgrund der Lage der drei Zustände in Abbildung 6 ist eine Verschiebung der Klassenverhältnisse ersichtlich. Es sollte angemerkt werden, dass der Finalzustand, der größtenteils vom biologischen Abbau dominiert wird, durch den resultierenden Massenverlust verzerrt ist, da sich dadurch die Massenrelationen der drei formbezogenen Unterteilungen ändern (Tabelle 3). Der Gebrauch des ternären Diagramms erfordert die Darstellung der Achsenrubriken in Prozent, was bedeutet, dass ein Massenverlust nicht sichtbar ist, da die Summe der Rubriken 100% ergibt.

Eine umfassendere Definition des Zustands nach Ablagerung und des Langzeit-Zustands erfordert eine detailliertere Untersuchung der potentiellen Veränderungen von Komponentengröße und -form sowie der mechanischen Eigenschaften der Materialien durch biologischen Abbau, Kompressions- und Kriecheinflüsse.

Tabelle 3 Zahlenwerte der formbezogenen Klassen für die Zustände im Ternärdiagramm

Formbezogene Klassen	Bewehrung	Inkompressibel	Kompressibel	Summe
Betrachtung	[%TS]	[%TS]	[%TS]	[%TS]
Initialzustand	43.4	26.0	30.6	100
Zustand nach Einbringung	56.3	28.2	15.5	100
Finalzustand relativ ²	52.9	37.1	0.0	90
Finalzustand absolut	58.7	41.3	0.0	100

² Massenverlust durch biologischen Abbau

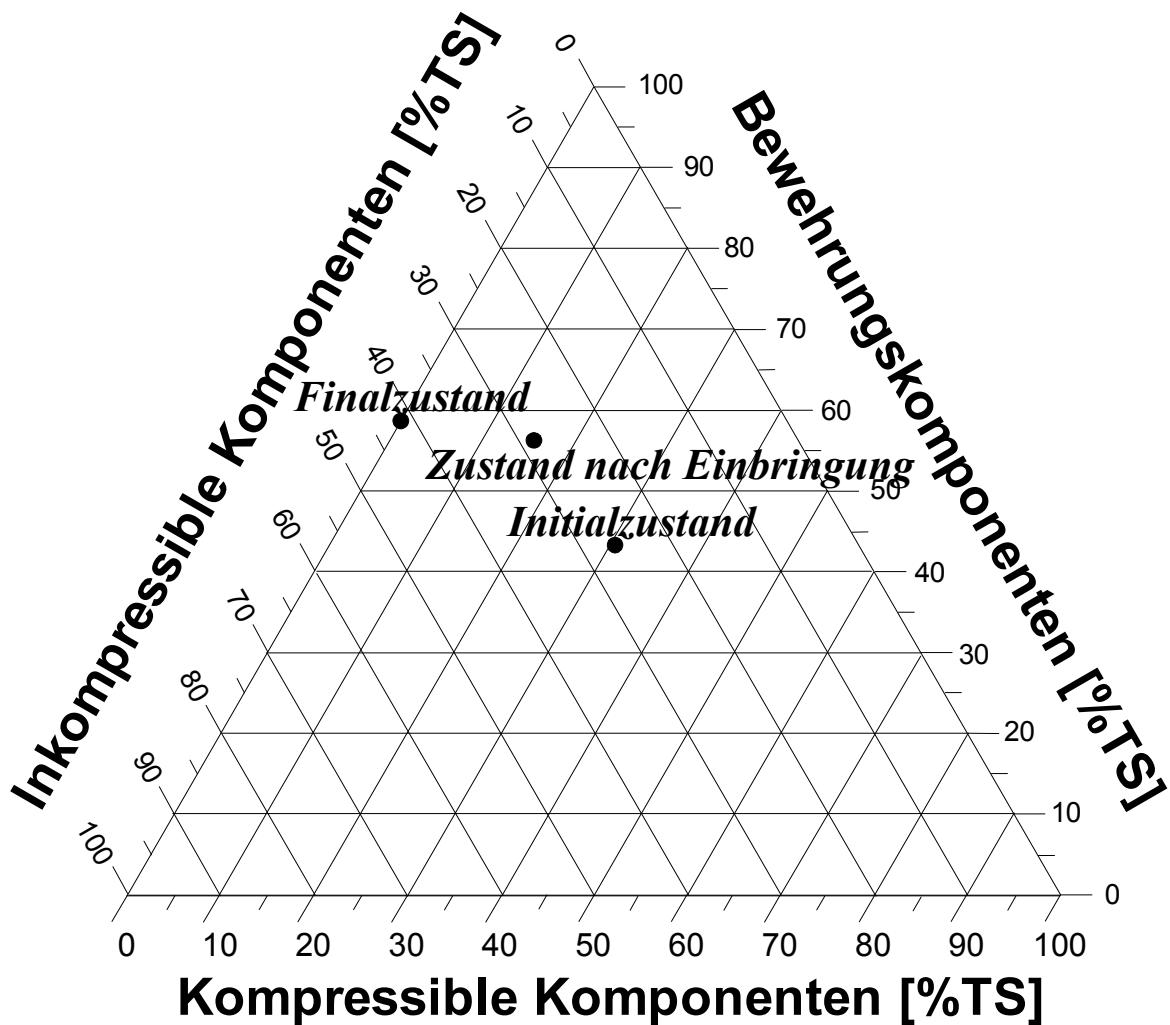


Abbildung 6 Klassifikation von Abfall basierend auf den Verhältnissen der formbezogenen Unterteilungen

5 Schlussbetrachtung

Es wurde ein Rahmenwerk zur Klassifizierung von Abfallkomponenten entwickelt und vorgestellt. Dieses bietet nützliche Informationen über Zustand der Komponenten bei Anlieferung (Initialzustand), direkt nach der Ablagerung (Zustand nach Einbringung unter Einfluss von Kompression) und nach einer Langzeitbetrachtung (Finalzustand unter Einfluss von Kompression und biologischem Abbau). Das Rahmenwerk klassifiziert die Komponenten basierend auf technischen Materialeigenschaften, Größe, Abbaupotential und Form. Zudem wurde ein Ansatz zur Demonstration der relevanten Informationen dargestellt. Dieses Verfahren ist vorzugsweise für den Austausch und die Benutzung von experimentellen Daten über die mechanischen Eigenschaften von Abfall von Nutzen und könnte zur Entwicklung eines einheitlichen Verständnisses der Abfallmechanik beitragen. Dieser Forschungsbereich wird derzeit durch variierende Interpretationen

dominiert, die zu widersprüchlichen und uneinheitlichen Schlussfolgerungen führen können.

Für eine klare Definition der Klassifikationsparameter sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, um Abfallkörper in Bezug auf ihr potentielles mechanisches Verhalten (z.B. Scherverhalten, Kompressibilität, Steifigkeit) und hinsichtlich ihrer Abbaubarkeit zu kategorisieren. Der Gebrauch einer Klassifikation begrenzt Unsicherheiten im mechanischen Verhalten von Abfall durch Definition, Einschätzung und Bewertung der einflussnehmenden Faktoren, wie z.B. Abfallzusammensetzung, Größe, Form und mechanische Eigenschaften der Komponenten und kann somit zum Verständnis des Verhaltens des Abfallkörpers beitragen.

6 Literatur

NAME	Jahr	Titel
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY (DEQ)	1998	Oregon Solid Waste Characterization and Composition 1998. Oregon; abrufbar unter: http://www.deq.state.or.us/wmc/solwaste/wcrep1998 [letzter Zugriff: 17 Februar 2004]
DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION	1999	Richtlinie 1999/31EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L182(1).
EUROPEAN TECHNICAL COMMITTEE NO. 8	1993	Geotechnics of Landfill, Design and Remedial Works, Technical Recommendations – GLR. 2nd Edition, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
FRICKE, K.; MÜLLER, W.; BARTETZKO, C.; EINZMANN, U.; FRANKE, J.; HECKENKAMP, G.; KELLNER-ASCHENBRENNER, K.; KÖLBL, R.; MELLIES, R.; NIESAR, M.; WALLMANN, R.; ZIPFEL, H.	1999	Biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen: Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponierung; Endbericht zum BMBF-Verbundvorhaben „Biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen“
GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G.	1995	Contribution to a Technical Classification of MSW. 5th International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italien, CISA. 703-710
JONES, D.R.V.; DIXON, N.	2003	Stability of Landfill Lining Systems: Report I, Literature Review. Environment Agency, P1-385. R&D Technical Report
KÖLSCH, F.	1996	Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Dissertation Leichtweiss-Institut, Technische Universität Braunschweig

- | | | |
|--|------|---|
| LANDVA, A.O.;
CLARK, J.I. | 1990 | Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice. ASTM STP 1070; Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice. Landva, A.O. and Knowles, G.D. Philadelphia, USA, American Society for Testing and Materials: 86-103. |
| MANASSERO, M.;
VAN IMPE, W.F.;
BOUAZZA, A., | 1997 | Waste Disposal and Containment. Environmental Geotechnics. Kamon, M. Rotterdam, Balkema, A.A.: 1425-1474. |
| SIEGEL, R.A.;
ROBERTSON, R.J.;
ANDERSON, D.G. | 1990 | Slope Stability Investigations at a Landfill in Southern California. ASTM STP 1070; Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice. Landva, A.O. and Knowles, G.D. Philadelphia, USA, American Society for Testing and Materials: 259-284. |
| THOMAS, S.; ABOURA, A.A.;
GOURC, J.P.; GOTTELAND, P.;
BILLARD, H.; DELINEAU, T.;
GISBERT, T.; OUVRY, J.F.;
VUILLEMIN, M. | 1999 | An In Situ Waste Mechanical Experimentation on a French Landfill. 7th International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CISA. 445-452 |
| TURCZYNSKI, U. | 1988 | Geotechnische Aspekte beim Aufbau von Mehrkomponentendeponien. Bergakademie Freiberg (Sachsen) |
| WHITLOW, R. | 1983 | Basic Soil Mechanics. 4th Edition 2001, Pearson Education Limited. |

Anschrift der Verfasser

Ulrich Langer

Department of Civil and Building Engineering
Loughborough University
GB, Leicestershire LE11 3TU, Loughborough
Telefon 0044 (0)1509 263171 Ext. 4133
Email U.Langer@lboro.ac.uk
Website: <http://www-staff.lboro.ac.uk/~cvul/>

Dr. Neil Dixon

Department of Civil and Building Engineering
Loughborough University
GB, Leicestershire LE11 3TU, Loughborough
Telefon 0044 (0)1509 228542
Email N.Dixon@lboro.ac.uk
Website: <http://www.lboro.ac.uk/departments/cv/staff/profile/24.html>