

Grundvoraussetzung zur Standsicherheitsberechnung von Deponien ist die Ermittlung und Festlegung der geomechanischen Kennwerte. In der Praxis bereitet die Festlegung der geomechanischen Kennwerte des Abfalls immer wieder große Schwierigkeiten, da wegen der unterschiedlichen eingelagerten Abfallarten je nach deren Zersetzungsgrad bzw. -prozess Inhomogenitäten vorliegen und zeitliche Veränderungen im Deponiekörper stattfinden. Häufig ist die Standsicherheit mit wenig befriedigenden, weil verallgemeinerten, Kennwerten zu berechnen. Auch die anerkannten Untersuchungsmethoden der Bodenmechanik lassen sich nicht ohne weiteres auf die Untersuchung von Abfällen übertragen. Von der IGU mbH, Uelzen, und den Berliner Stadtreinigungsbetrieben (BSR), Berlin, wurde ein Versuchsaufbau für In-Situ-Scherversuche entwickelt, bei dem die Stabilität aus vorhandener Struktur erhalten bleibt. Im Rahmen eines Feldversuchs wurden auf der Siedlungsabfalldeponie Wernsdorf die geomechanischen Kennwerte der eingelagerten Altabfälle bestimmt.

Einleitung und Vorbemerkungen

Die Deponie Wernsdorf liegt im Umland von Berlin und ist mit ca. 25 ha die kleinste der drei Deponien der Berliner Stadtreinigungsbetriebe. Der Untergrund der Deponie ist in einem kleinen Teilbereich am Deponiefuß belastet und muss saniert werden. Die Entnahme des Kontaminationsschwerpunktes stellt eine ökologisch hochwertige Alternative zu einer langjährigen hydraulischen Sicherung dar. Zur Herstellung der Baugrube am Deponiefuß sind umfangreiche Abfallumlagerungen erforderlich. Da der Anteil der umzulagernden Abfallmasse stark von der maximal zulässigen Böschungsneigung des anstehenden Abfallkörpers abhängt, waren Standsicherheitsuntersuchungen durchzuführen.

„Senkrechte Wände“ sind im Deponiebau für temporäre Maßnahmen keine ungewöhnliche Erscheinung. Durch den üblicherweise geschichteten Einbau der Abfälle auf der Deponie kommt es zu einer horizontalen Orientierung des Deponiegutes. Die Einlagerung von faser- und folienähnlichen Bestandteilen verursacht ferner in Verbindung mit den übrigen Abfallstoffen ein Verbundsystem, vergleichbar dem System „Bewehrte Erde“. Dieses Tragverhalten kann in Abhängigkeit der Zugfestigkeit der Fasermatrix zu extrem steilen Böschungsneigungen führen. Werden aber die üblichen bodenmechanischen Parameter in die Berechnung eingeführt, wird dieser Tatsache nicht Rechnung getragen.

Zur Bestimmung der geomechanischen Eigenschaften sollte daher bei den Untersuchungen auf der Deponie Wernsdorf nicht auf allgemeine Literaturwerte zurückgegriffen, sondern in einem Feldversuch möglichst realitätsnahe Werte ermittelt werden. Dabei sollten als Berechnungsgrundlage die Parameter Dichte, Reibungswinkel und Kohäsion der eingelagerten Altabfälle bestimmt werden.

Versuchsbeschreibung

Vergleichbar dem Scherversuch nach DIN 18 137 („Rahmenscherversuch“) wurden zur Bestimmung des Reibungsverhaltens des Deponiegutes für den Feldversuch quaderförmige Probekörper mit jeweils konstanter Normalspannung belastet und durch eine horizontale Scherkraft abgeschert. Anders als beim Laborversuch wurde bei dem Feldversuch die vorhandene Struktur des Abfalls nicht gestört und somit die Stabilität aus bodenähnlichem Material und Fasermatrix erhalten. Dieser Anforderung ist dann besondere Aufmerksamkeit zu schenken, wenn für die weiterführenden realitätsnahen Standsicherheitsbetrachtungen ein Anteil an Kohäsion in die Berechnungen einfließen soll.

Aus dem anstehenden Abfall wurde je Einzelversuch ein Prüfkörper freigelegt. Die Lage und der Abstand der Prüfkörper wurde zur Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungszeiträume und Abfallarten sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung variiert. Dazu wurden aus der anstehenden Böschung zunächst Berme abgeschoben, aus deren horizontaler Oberfläche die Prüfkörper mit dem Tieföffelbagger und geeignetem Handgerät behutsam herausgearbeitet wurden. Beim Freilegen der Prüfkörper galt es darauf zu achten, dass insbesondere die Probefläche, der Bereich der späteren Scherfuge, nicht gestört wird. Hierdurch konnte gewährleistet werden, dass exakte Ergebnisse hinsichtlich der Scherwiderstände zu erwarten waren.

Zur Bestimmung der Scherfläche wurden die auf der jeweiligen Prüffläche freistehenden Probekörper vor Versuchsbeginn vermessen. Die Kantenlängen der Probekörper betragen im Mittel ca. 1,0 m Höhe, 0,9 m Breite und 1,1 m Länge. Als Scherrahmen kam ein speziell für diesen Versuch aus doppel T-Profilen konstruierter Stahlrahmen zum Einsatz.

Die Abmessungen der Probekörper gegenüber den Innenmaßen des Stahlrahmens waren so gewählt, dass während des Anlegens des Rahmens um den Prüfkörper keine Beschädigung stattfand. Um einen allseitigen Kraftschluss zu gewährleisten, wurde der Zwischenraum um den Probekörper herum mit Sand ausgefüllt (Bild 1). Eine Beeinflussung der eigentlichen Prüfung war hieraus nicht zu erwarten, da die aufgebrachte Normalspannung nur auf den Müllkörper wirkte.



Bild 1: Freigelegter Probekörper, durch Scherrahmen eingefasst und im Randbereich mit Sand kraftschlüssig ausgefüllt.



Bild 2: Probekörper mit aufgebrachtter Belastung

Die Belastung des Prüfkörpers mit Normalspannung erfolgte mittels Betonplatten, deren Gewicht im Vorwege bestimmt wurde. Eine Haltevorrichtung für den Scherrahmen verhinderte Reibungswiderstände des Rahmens gegenüber dem Planum. Im Laborversuch werden hierzu, wie z.B. beim Großrahmenscherversuch, üblicherweise Stellschrauben verwendet, mit denen durch Anheben des oberen Scherrahmens der Scherspalt eingestellt werden kann. Für den hier modifizierten Feldversuch konnte eine einfache Lösung gefunden werden, indem der Rahmen mittels Spanngurten über die Betonplatten hinweg angehängt wurde (Bild 2). Der Rahmen wurde soweit angehoben, dass kein Kontakt zum Planum der Prüffläche vorlag.

Bei der so gewählten Konstruktion war zu berücksichtigen, dass die in der Scherfuge wirkende Normalspannung sich aus der Last der Betonplatten, der Last des Probekörpers und der des angehängten Stahlrahmens zusammensetzt. Die horizontale Bewegung wurde durch einen mechanischen Zahnstangenantrieb realisiert. Dabei wurde der gesamte Scherrahmen mit einer Geschwindigkeit von ca. 4 cm pro Minute gezogen. Als Zugwiderlager diente eine entsprechend schwere Raupe (Bild 3). Während des gesamten Versuchverlaufs wurde eine mögliche Verschiebung des Widerlagers kontrolliert. Bei keinem Einzelversuch konnte eine Verschiebung des Zugwiderlagers festgestellt werden.



Bild 3: Aufbau mit angehängter Raupe als Widerlager

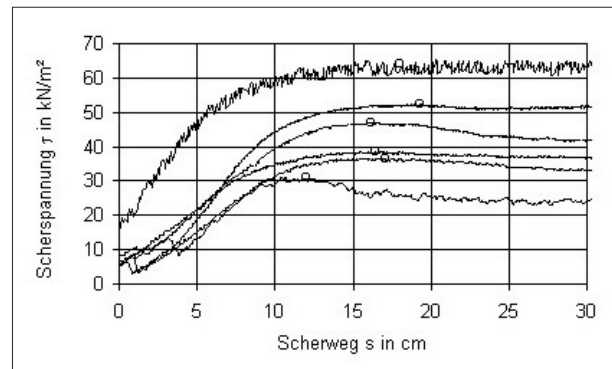


Bild 4: Scherspannungs - Wegdiagramm

Versuchsergebnisse und Beurteilung

Der auf der Deponie Wernsdorf untersuchte Abfall besteht hauptsächlich aus Hausmüll und Bauschutt mit hohem Ascheanteil. Die Dichte des untersuchten Mülls wurde mit $\rho = 1,15 \text{ t/m}^3$ ermittelt und liegt damit im Bereich üblicher in der Literatur genannter Dichten.

In Anlehnung an die DIN 18 137 wurden drei Belastungsstufen mit einer linearen Laststeigerung durchgeführt. Um einer zunächst erwarteten großen Streuung der Versuchsergebnisse entgegen zu wirken, wurde mit zwei weiteren Einzelversuchen der Bereich der untersuchten Normalspannung nach oben und unten erweitert. Anhand einer weiteren Laststufe (ca. 40 kN/m^2) wurde die Reproduzierbarkeit überprüft, so dass insgesamt 6 Einzelversuche durchgeführt wurden. Während der Versuchsdurchführung erfolgte die Aufzeichnung der horizontalen Scherkraft und des zurückgelegten Weges kontinuierlich mit Kraft- und Wegaufnehmern. Die Auflösung der Messung des Verschiebungsweges erfolgte im Millimeterbereich. Die Messwerte wurden direkt vor Ort mittels anwendungsbezogener EDV aufgenommen und kontrolliert. Dies brachte den Vorteil, dass Erkenntnisse zur Modifizierung der jeweils gewählten Versuchsparameter in die Folgeversuche einfließen konnten.

In dem nachstehend abgebildeten Scher-Weg-Diagramm ist für die jeweils durchgeführten Einzelversuche der Verlauf der Scherspannung über den Scherweg dargestellt.

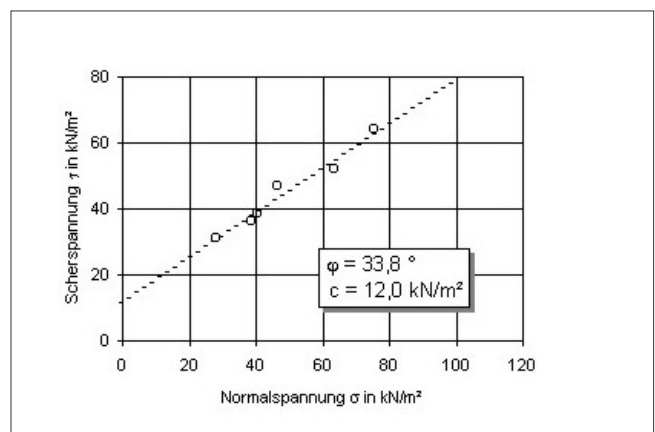


Bild 5: Scherspannungs-Normalspannungsdiagramm

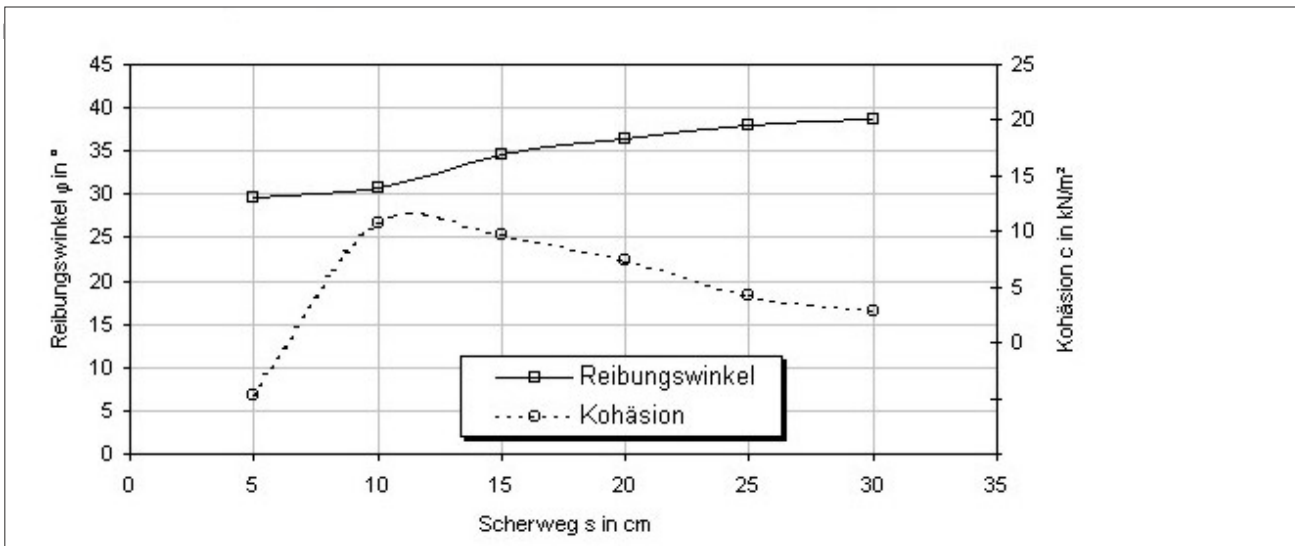


Bild 4: Scherspannung - Wegdiagramm

Die Ergebnisse zeigen für alle durchgeführten Einzelversuche einen für Scherversuche charakteristischen Verlauf. Die beobachtete maximale Scherspannung liegt bei den einzelnen Probekörpern mit recht geringer Streuung bei Scherwegen von $s = 12$ bis 19 cm.

Die im Bruchzustand maximal gemessenen Scherspannungen wurden im nachstehenden Scherdiagramm über die entsprechenden Normalspannungen aufgetragen.

Aus den aufgezeichneten Daten ergeben sich für die Scherparameter Reibung und Kohäsion nachstehende Werte im Bruchzustand:

$$\begin{aligned} \text{Bruch} &= 33,8^\circ \\ c_{\text{Bruch}} &= 12,0 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Das Bestimmtheitsmaß für die ermittelten Scherpunkte beträgt $R^2 = 0,97$ und zeigt somit eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf.

Zur weiteren Beurteilung wurden für den Gleitzustand nach einem Scherweg von ca. 25 cm nachstehende Scherparameter ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Gleit} &= 38,6^\circ \\ c_{\text{Gleit}} &= 2,8 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Das Ergebnis zeigt, dass mit Zunahme des Scherweges offensichtlich durch Strukturänderung ein deutlicher Verlust an Kohäsion zu verzeichnen ist. Dies wird zunächst einmal auf ein Herausreißen und Reißen der Fasermatrix aus dem Gesamtsystem zurückgeführt. Anders als bei Laborscherversuchen an mineralischen Böden kann aber im selben Zuge ein erheblicher Anstieg des Reibungsanteils an der Gesamtscherfestigkeit festgestellt werden. Zur weitergehenden Untersuchung wurde in der nachstehenden Grafik dieses Verhalten über die Auswertung der Scherparameter nach unterschiedlichen Scherwegen dargestellt.

Während der Kohäsionsanteil erwartungsgemäß mit zunehmendem Scherweg sehr schnell abnimmt, ist ein Anstieg des Reibungswinkels deutlich erkennbar.

In der nachfolgenden Grafik wurde nunmehr versucht, das Scherverhalten durch die Ermittlung des Ersatzreibungswinkels bei unterschiedlicher Normalspannung unter Zugrunde-

legung der ermittelten Scherparameter bei unterschiedlichen Verformungswegen zu beurteilen.

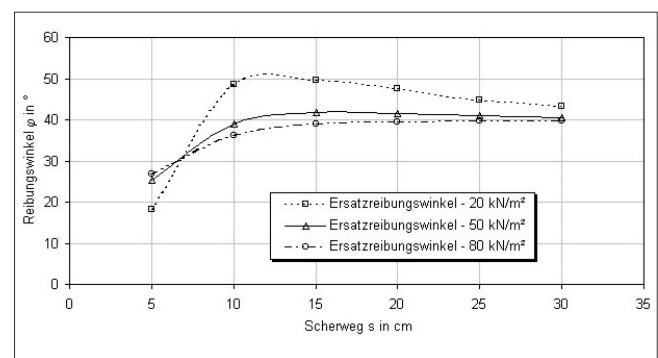


Bild 5: Ersatzreibungswinkel als Funktion des Scherweges

Der Verlauf der Kurven zeigt ein dem Scherspannungsverlauf vergleichbares Verhalten. Der maximale Ersatzreibungswinkel konnte nach annähernd gleichem Scherweg wie die Scherparameter im Bruchzustand errechnet werden. Erwartungsgemäß nähert sich der jeweilige Ersatzreibungswinkel unabhängig von der in Ansatz gebrachten Normalspannung dem Gleitreibungswinkel an.

Somit kann festgestellt werden, dass es zunächst zu dem o.g. Abriss der Fasermatrix aus dem Gesamtsystem kommt (Bruchzustand). Durch den relativ hohen Zersetzungsgrad des Abfalls scheint dann jedoch soviel mineralisiertes Material vorhanden zu sein, dass der Verlust der Bewehrungseigenschaften gleichzeitig zu einem Teil durch Reibung kompensiert werden kann.

Schlussbetrachtung

Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchung haben gezeigt, dass für die hier vorliegende Fragestellung der Standortsicherheitsbetrachtung die Durchführung eines Feldversuches zur Ermittlung der Scherparameter vorteilhaft war. Gegenüber den gängigen Verfahren (i.d.R. Literaturwerte oder Abschätzung) zur Festlegung der in Ansatz zu bringenden Kennwerte konnten durch den Versuch deponie- und abfall-spezifische Kennwerte ermittelt werden, die für den

Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Salomo, Dr. rer. nat. Detlef Krüger, Dipl.-Ing. Dirk Fischer

untersuchten Standort als realitätsnah zu bewerten sind und somit zu einer realistischen Böschungsneigung führen. Der Versuch bietet in idealer Weise die Möglichkeit die Scherparameter in unterschiedlichen Deponieabschnitten zu ermitteln, ohne die Struktur des Deponiekörpers nennenswert zu beeinträchtigen. Durch Versuche in ausreichender Anzahl, lassen sich u. U. die sonst üblichen Abminderungen der labormäßig ermittelten Scherparameter zu Rechenwerten vermeiden. Damit sind wirtschaftlichere Bemessungen des Deponiekörpers möglich.

Das Vorhandensein eines für Standsicherheitsbetrachtungen häufig nicht in Ansatz gebrachten Anteils an Kohäsion konnte nachgewiesen werden. Die üblicherweise mit Zunahme des Scherweges eintretenden Festigkeitsverluste durch Verlust der Fasermatrix wurden vermutlich durch ein höheres Reibungsverhalten des mineralisierten Deponiegutes kompensiert. Hierbei muß jedoch das unterschiedliche Verformungsverhalten von bewehrungsgeprägtem Scherverhalten (Bruchzustand) und reibungsgeprägtem Schervorgang (Gleitzustand) berücksichtigt werden.

Die Festigkeitseigenschaften eines Deponiekörpers reagieren in jedem Fall in Abhängigkeit der eingelagerten Deponiegüter und ihres Zersetzungsgrades. Durch die Veränderung der Zusammensetzung des Abfalls in den vergangenen Jahren ist u.a. auch eine Veränderung der Scherparameter eingetreten. Der Fasermatrix muss deutlich mehr Beachtung geschenkt werden, als bisher üblich. Die Scherfestigkeit der Fasermatrix ist jedoch aufgrund der i.d.R. kleinen Scherflächen bei Laborversuchen nicht eindeutig messbar. Auch hier bietet der vorgestellte Großversuch eindeutige Vorteile.

Die Erfahrung zeigt, dass die Arbeiten auf der Deponie für Vorbereitung und Durchführung eines Großrahmenscherversuchs mit ca. 2 Teilversuchen pro Arbeitstag kurzfristig durchführbar sind. Somit kann abschließend festgehalten werden, dass ein In-Situ-Scherversuch bei vertretbarem Aufwand Vorteile zur Ermittlung von geomechanischen Kennwerten an bestehenden Böschungen bietet.

Großrahmenscherversuche auf der Deponie Wernsdorf (Veröffentlichung: Müll und Abfall; Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, Oktober 2001)

Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Salomo
Studium des Bauingenieurwesens. Promotion zum Dr.-Ing. an der TU Berlin. Seit 1978 Professor an der FH Nordostniedersachsen, Suderburg und seit 1986 geschäftsführender Gesellschafter der Ingenieurgesellschaft für Geotechnik und Umweltmanagement in Uelzen, Rostock und Potsdam.

Dr. rer. nat. Detlef Krüger
Studium der Geophysik. Promotion an der FU Berlin. Seit 1997 bei den Berliner Stadtreinigungsbetrieben als technischer Projektleiter im Referat Deponiesanierung tätig.



Dipl.-Ing. Dirk Fischer
Bauingenieurstudium. Seit 2000 bei der Ingenieurgesellschaft für Geotechnik und Umweltmanagement, Uelzen, in den Bereichen Grundbau, Bodenmechanik und Spezialtiefbau tätig.