Ermittlung der Scherfestigkeit von abzulagerndem Klärschlamm mit der Flügelsonde

Von G. von Bloh und W. Blümel

1. Einführung

In Deutschland muß von Jahr zu Jahr mehr Klärschlamm in Deponien abgelagert werden. Ursächlich für diese Entwicklung sind die Abnahme der landwirtschaftlichen Verwertung infolge der zum Teil vorhandenen Kontamination mit organischen und anorganischen Schadstoffen und die Zunahme der Mengen aufgrund der gestiegenen Reinigungsleistung der Kläranlagen. Der kontaminierte Schlamm muß entweder deponiert oder auf andere Weise, beispielsweise thermisch, behandelt werden.

Es sind verschiedene Deponieformen für Klärschlamm möglich. Früher wurde landwirtschaftlich nicht verwerteter Schlamm überwiegend in Becken abgelagert. Verschiedene Vorschriften und Verordnungen (z. B. TA-Abfall, LAGA-Merkblatt, ATV-Arbeitsblatt A 301) enthalten besondere Sicherheitsanforderungen für Deponien, wonach mit teilentwässertem Schlamm hügelförmige Deponien oberhalb des Grundwasserspiegels gebaut werden müssen. Hierfür sind umfangreiche grundbauliche Standsicherheitsuntersuchungen erforderlich, um die innere und äußere Stabilität der Hügeldeponie während der Bauphasen und im Endzustand zu garantieren (s. auch Drescher [5] und Komodromos [7]).

Für die Ermittlung der Grundbruch- und Böschungsbruchsicherheit (Abb. 1) muß die Scherfestigkeit des abzulagernden Materials bekannt sein. Standsicherheitsuntersuchungen sind für alle kritischen Bauphasen und für den Endzustand durchzuführen. Für unvorbelastete bindige Böden mit breiiger bis weicher Zustandsform – diesen Böden ist teilentwässerter Klärschlamm zuzuordnen – wird zwischen der Scherfestigkeit im undränierten und im dränierten Zustand (Anfangs- und Endscherfestigkeit) unterschieden. Die Anfangsscherfe-

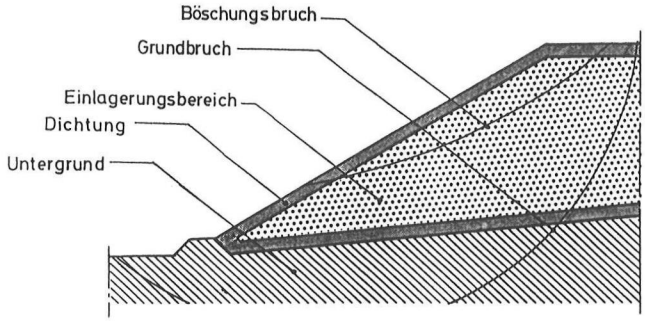

Abb. 1: Schnitt durch die Böschung einer hügelförmigen Deponie (schematisch)

stigkeit von Böden wird durch einen Parameter, die undränierte Scherfestigkeit oder totale Kohäsion des undränierten Bodens c_u, und die Endscherfestigkeit durch die zwei Parameter, den inneren Reibungswinkel φ' und die effektive Kohäsion c', gekennzeichnet.

Der rechnerisch erforderliche Mindestwert der totalen Kohäsion des undränierten Bodens cal c_u ist unter anderem abhängig von der Deponiegeometrie im Bau- und im Endzustand sowie von der Einbaugeschwindigkeit. Der aus Standsicherheitsuntersuchungen festgelegte Mindestwert darf nicht mit den in der TA-Abfall 1991 angegebenen Zuordnungswerten für Festigkeiten verwechselt werden (beispielsweise ≥ 25 kN/m² für die Flügelscherfestigkeit). Diese Werte gelten im Sinne des Begriffs „zuordnen" lediglich für die Annahme oder die Ablehnung eines Stoffes für die oberirdische Einlagerung. Die Einhaltung dieser Forderung der TA-Abfall ersetzt somit nicht den Nachweis der ausreichenden Standsicherheit des Schlamms nach dem Einbau in die Deponie.

Dieser Beitrag enthält einige Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen mit Klärschlamm. Dabei wurde der viskoplastische Einfluß der Schergeschwindigkeit auf die undränierte Scherfestigkeit berücksichtigt. Dies hat Auswirkungen auf die Festigkeitsbeurteilung und auf die Prüfmethoden. Ein Verfahren zur Beurteilung der Scherfestigkeit von Klärschlamm wird vorgeschlagen. Messungen der Scherfestigkeit nach der Ablagerung im Deponiekörper sind ein wesentlicher Bestandteil dieses Verfahrens.

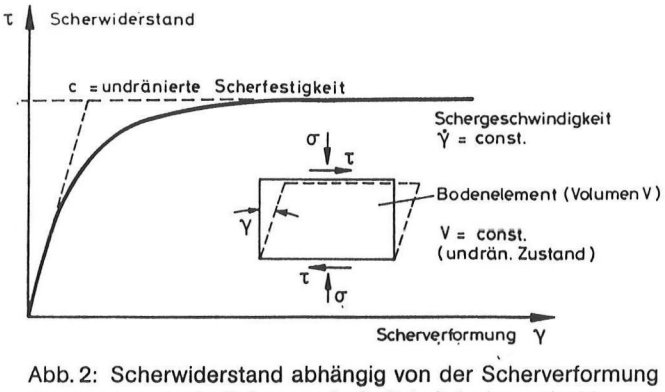

Abb. 2: Scherwiderstand abhängig von der Scherverformung für eine konstante Schergeschwindigkeit (schematisch)

2. Undränierte Scherfestigkeit

Aus bodenmechanischer Sicht ist Schlamm als unvorbelasteter bindiger Erdstoff mit hohem Gehalt an organischen Bestandteilen einzustufen. Derartige Stoffe haben viskoplastische Eigenschaften. Somit muß die Schergeschwindigkeit bei der Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit berücksichtigt werden. Für eine konstante Schergeschwindigkeit ist der Scherwiderstand abhängig von der Verformung prinzipiell in Abb. 2 dargestellt. Im undränierten Zustand wird ein Bodenelement ohne Volumenänderung durch Scherkräfte verformt (einfache Scherung ohne Volumenänderung [Gestaltänderung]). Als Schergeschwindigkeit wird die Änderung des Scherwinkels γ pro Zeiteinheit definiert. Die undränierte Scherfestigkeit c_u ergibt sich als Scherwiderstand im Grenzzustand (Bruchzustand).

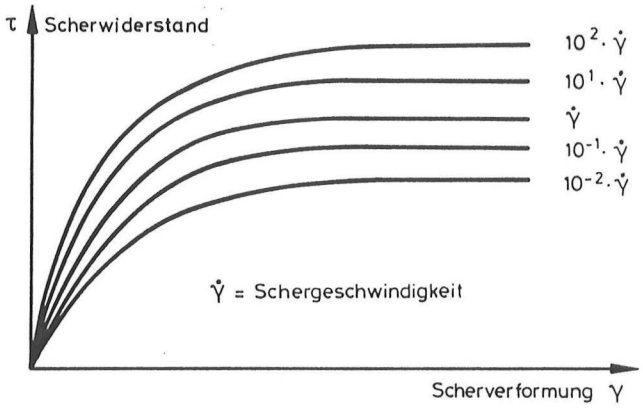

Abb. 3: Zusammenhang zwischen Scherwiderstand und Scherverformung bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten (schematisch)

Abb. 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Scherwiderstand und Scherverformung bei unterschiedlichen Schergeschwindigkeiten in schematischer Form. Größere Schergeschwindigkeiten führen bei demselben Stoff zu größeren Scherfestigkeiten. Durch sprunghafte Änderung der Schergeschwindigkeit im Versuch können die unterschiedlichen Werte der Scherfestigkeit bei konstanten Randbedingungen bestimmt werden. Es ergeben sich dabei „Sprünge" im Verlauf der Scherwiderstand-Scherverformungskurve, deren „Sprunghöhe" von der Größe der Schergeschwindigkeitsänderung abhängig ist.

Gudehus/Leinenkugel [6] und Leinenkugel [9] untersuchten den Einfluß der Schergeschwindigkeit auf die undränierte Scherfestigkeit von bindigen Erdstoffen in Biaxialversuchen. Zur Beschreibung der Viskosität solcher Erdstoffe wurde von Leinenkugel ein empirisch ermittelter Zusammenhang, das sogenannte „logarithmische Zähigkeitsgesetz" vorgeschlagen, welches auf Überlegungen von Prandtl beruht:

$$c_u \approx c_{ua} * [1 + I_{va} * \ln(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_a)]$$

c_u – undränierte Scherfestigkeit bei $\dot{\gamma}$
c_{ua} – undränierte Scherfestigkeit bei $\dot{\gamma}_a$
$\dot{\gamma}$ – Schergeschwindigkeit
$\dot{\gamma}_a$ – Bezugswert der Schergeschwindigkeit
I_{va} – Zähigkeitsindex

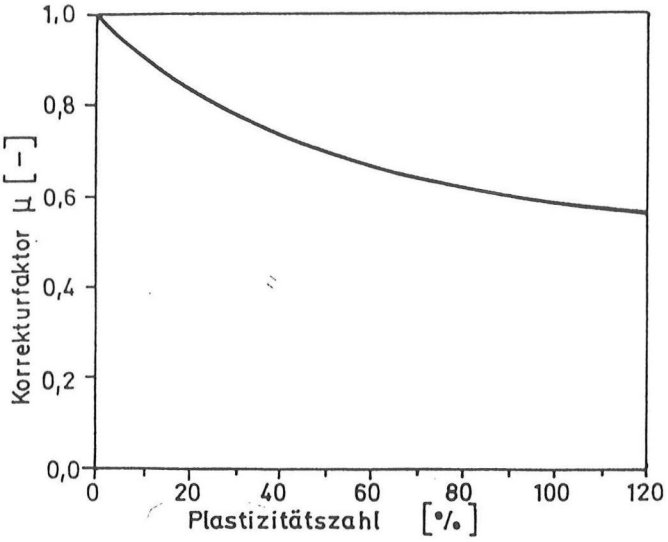

Abb. 4: Empirisch ermittelter Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von Zeiteinflüssen (nach Bjerrum [1])

Bei Klärschlamm mit breiiger bis weicher Konsistenz müssen somit die im Labor und Feldversuch ermittelten Werte für die undränierte Scherfestigkeit für Standsicherheitsberechnungen reduziert werden, weil die Schergeschwindigkeiten im Versuch erheblich größer sind als die Verformungsgeschwindigkeit dieses Stoffs in hügelförmigen Deponien (Gestaltänderungskriechen). Von Bjerrum [1] wurde aufgrund umfangreicher Untersuchungen mit ausgeprägt plastischen Tonböden ein Korrekturwert für die gemessene Scherfestigkeit abhängig von der Plastizitätszahl vorgeschlagen, welcher Zeiteinflüsse und Anisotropieeffekte berücksichtigt. Im vorliegenden Fall ist nur der Zeiteinfluß von Interesse (Abb. 4), da Anisotropieeffekte bei unvorbelasteten Stoffen kaum erwartet werden. Dieser Korrekturwert wurde empirisch auf der Grundlage von Böschungsbruchuntersuchungen und Ergebnissen von Feldflügelsondierungen erarbeitet und folglich auch in DIN 4096 als Korrekturwert für die Meßwerte der Feldflügelsonde empfohlen.

Bisher wird der oben erläuterte Zeiteinfluß auf die Scherfestigkeit bei der Schlammdeponierung weder durch das Zähigkeitsgesetz von Gudehus/Leinenkugel noch durch Korrektur nach Bjerrum berücksichtigt.

3. Versuchsmethoden

3.1 Allgemeines

Die totale Kohäsion des undränierten Bodens c_u gilt, wie oben beschrieben, für den unkonsolidierten Zustand des Bodens. Die direkte Bestimmung dieses Parameters erfolgt im einaxialen Druckversuch (DIN 18 136 vom März 1987), im dreiaxialen Scherversuch (DIN 18 137 T. 2 vom Dezember 1990) oder mit der Flügelsonde (DIN 4096 vom Mai 1980). Die letztgenannte DIN-Vorschrift enthält nur Angaben zur Ausbildung und Anwendung der Feldflügelsonde. Sie gilt nicht für Laborflügelsondierungen. Somit gibt es gegenwärtig keine genormten Festlegungen für die Bestimmung des Zuordnungswertes „Flügelscherfestigkeit" gemäß TA-Abfall im Labor.

Für alle genannten Methoden zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit gelten die in Abschn. 2 enthaltenen Erläuterungen zum Einfluß der Schergeschwindigkeit in gleicher Weise (vgl. hierzu DIN 18 137 T. 1 vom August 1990, Abschnitt 3.36 und 5.3.4 sowie Bild 9). Dies wird bisher in der Deponiebaupraxis kaum beachtet.

Zur Abschätzung der Scherfestigkeit von Schlamm eignen sich Flügelsonden sowie Rotationsviskosimeter. Bei beiden Versuchsgeräten wird das Torsionsmoment gemessen, welches infolge der Scherkräfte im Boden am Rand des tordierten, zylinderförmigen Körpers (Flügel) aktiviert wird. Das Rotationsviskosimeter wird für die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Suspensionen herangezogen. In Zusammenhang mit Klärschlamm wird auf Untersuchungen von Spinosa [12] verwiesen. Bei einer Zunahme der Feststoffkonzentration infolge von Entwässerung erreicht Schlamm eine breiige oder weiche Zustandsform. Dann sind handelsübliche Rotationsviskosimeter zur Bestimmung der rheologischen Stoffeigenschaften und somit der Scherfestigkeit kaum noch zweckmäßig. Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Scherfestigkeit, Scherverformung und Schergeschwindigkeit von teilentwässertem Schlamm ist die Flügelsonde besser geeignet. Einaxiale Druckversuche oder dreiaxiale Scherversuche mit Klärschlamm sind mangels ausreichend fester Konsistenz zur Herstellung von Probekörpern aufwendiger.

3.2 Flügelsondierverfahren

Im Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der Universität Hannover wird die Flügelsonde seit vielen Jahren zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit von Erdstoffen im Feld und im Labor verwendet. Im Normalfall werden Flügel mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser (H/D) = 2 eingesetzt.

Flügelsondierungen sollten mit konstanter Flügeldrehgeschwindigkeit bis zum Bruch des Bodens durchgeführt werden („weggesteuertes Verfahren"). Bei vielen handelsüblichen Flügelsonden, die nach dem „momentengesteuerten Verfahren" arbeiten, wird eine Torsionsfeder mit konstanter Geschwindigkeit verdreht. Dabei bleibt der Flügel zunächst in Ruhe, bis die mit zunehmender Torsion der Feder aktivierte Schubspannung im Erdstoff zu Verformungen führt. Bei derartigen Geräten wird der Flügel im Erdstoff nicht mit konstanter Geschwindigkeit gedreht. Bei der Auswertung der Meßergebnisse sind die jeweiligen Besonderheiten des verwendeten Geräts zu berücksichtigen, beispielsweise durch rechnerische Korrekturen der Verformungsgröße.

Verschiedene Autoren (z. B. Bjerrum [1]; Cadling & Odenstad [3]; Perlow & Richards [11]; Torstensson [13]) berichten über Untersuchungen zum Einfluß der Schergeschwindigkeit auf die undränierte Scherfestigkeit mit Labor- und Feldflügelsonden in weichen bindigen Böden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, daß dieser Einfluß gerade bei ausgeprägt plastischen Böden nicht vernachlässigbar ist (vgl. Abschnitt 2).

Für die hier behandelten Untersuchungen mit teilentwässertem Schlamm wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Stenzel, Hamburg, eine spezielle Laborflügelsonde entwickelt, deren Meßprinzip in Abb. 5 dargestellt ist. Die Drehung des Flügels im Boden wird durch einen Schritt-

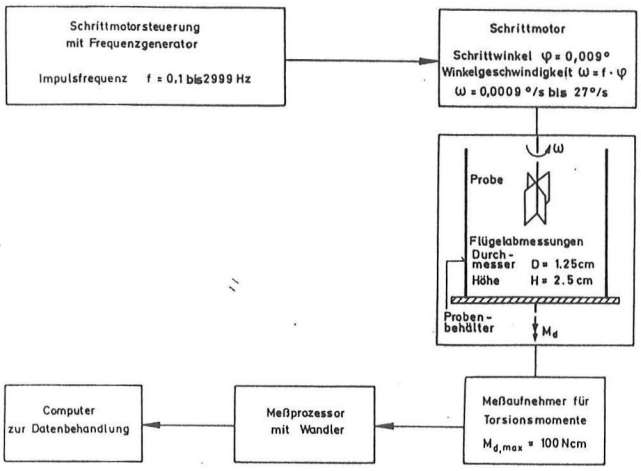

Abb. 5: Steuerung und Datenerfassung der Laborflügelsonde des IGBE

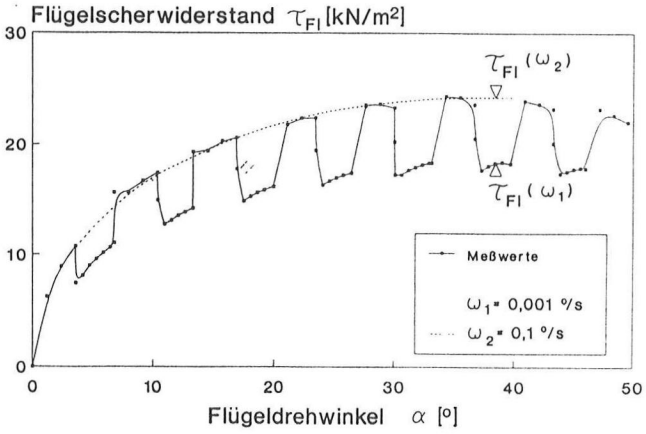

Abb. 7: Typisches Ergebnis einer Laborflügelsondierung mit sprunghafter Änderung der Flügeldrehgeschwindigkeit ω_i (H/D = 2,5 cm/1,25 cm, „Sprungfaktor" 100)

motor bewirkt, der eine Variation der Winkelgeschwindigkeit zwischen 0,0009 °/s und 27 °/s ermöglicht („weggesteuertes Verfahren"). Für den Versuch wird der Flügel in die Schlammprobe gedrückt und anschließend verdreht. Das Torsionsmoment M_d (Abb. 6) wird mit einem elektrischen Aufnehmer unter Verwendung von Dehnungsmeßstreifen als analoges Signal kontinuierlich gemessen und in einem Meßprozessor in digitale Werte gewandelt. Die Aufnahme und weitere Bearbeitung der Daten erfolgt in einem handelsüblichen Rechner. Für die Auswertung wird eine Scherspannungsverteilung über den Zylindermantel und die Stirnflächen gemäß Abb. 6 angenommen.

Mit dieser Laborflügelsonde wurden im Bereich der oben genannten Drehgeschwindigkeiten Versuche mit sprunghafter Änderung der Geschwindigkeit um die Faktoren 10, 100 und 1000 durchgeführt. Mit der entsprechend umgebauten Feldflügelsonde des IGBE wurden die Drehgeschwindigkeiten um den „Sprungfaktor" 10 verändert. Abb. 7 und 8 zeigen jeweils ein typisches Ergebnis von „Sprungversuchen" mit der Labor- und mit der Feldflügelsonde. Bei der Feldflügelsonde wird die Drehgeschwindigkeit wegen der noch nicht automatisierten Meßwertaufnahme jeweils nur beim Erreichen des Grenzzustandes sprunghaft verändert. Der Einfluß verschiedener Drehgeschwindigkeiten auf die Scherfestigkeit wird aus den Abbildungen deutlich. Für die weitere Auswertung werden die Maximalwerte des Flügelscherwiderstandes $\tau_{Fl}(\omega_2)$ oder $\tau_{Fl}(\omega_1)$ im Grenzzustand den jeweiligen Drehgeschwindigkeiten zugeordnet.

$$\tau_{Fl} = \tau_H = \tau_V$$

$$H = 2 * D$$

$$\tau_{Fl} = \frac{6 * M_d}{7 * \pi * D^3}$$

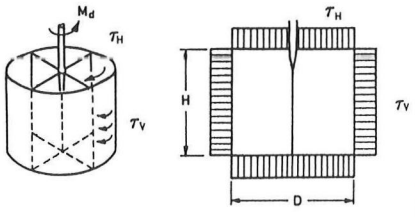

Abb. 6: Ansatz der Scherspannungen am „Flügel"

4. Versuchsergebnisse

4.1 Untersuchter Schlamm

Der in diesem Beitrag untersuchte Klärschlamm stammt aus einer Monodeponie für Klärschlammfilterkuchen. Vor der Konditionierung hat der Klärschlamm einen Trockensubstanzgehalt von ca. 4 %, wobei die Trockensubstanz jeweils zu etwa 50 % aus organischen und anorganischen Inhaltsstoffen besteht. Der Klärschlamm wird vor der Entwässerung mit Kammerfilterpressen mit Eisenchloridsulfat [$FeCl(SO)_4$] und Calciumhydroxid [$Ca(OH)_2$] in Form von Kalkmilch konditioniert. Die Durchmischung des Schlamms erfolgt in Rohrwellenmischern. Das Gemisch wird anschließend in Reaktionseindickern infolge der Schwerkraft auf einen Feststoffgehalt von 10 bis 15 % entwässert. Nach etwa zweistündiger Entwässerung in der Kammerfilterpresse werden Trokkensubstanzgehalte von 40 % (bodenmechanischer Wassergehalt w = 150 %) erreicht. Anschließend wird dieser teilentwässerte Klärschlamm mit üblichen Erdbaugeräten in Monodeponien eingebaut.

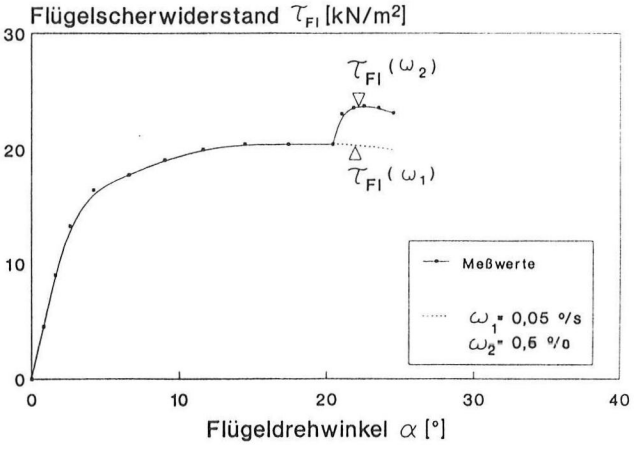

Abb. 8: Typisches Ergebnis einer Feldflügelsondierung mit sprunghafter Änderung der Flügeldrehgeschwindigkeit ω_i (H/D = 11 cm/5,5 cm, „Sprungfaktor" 10)

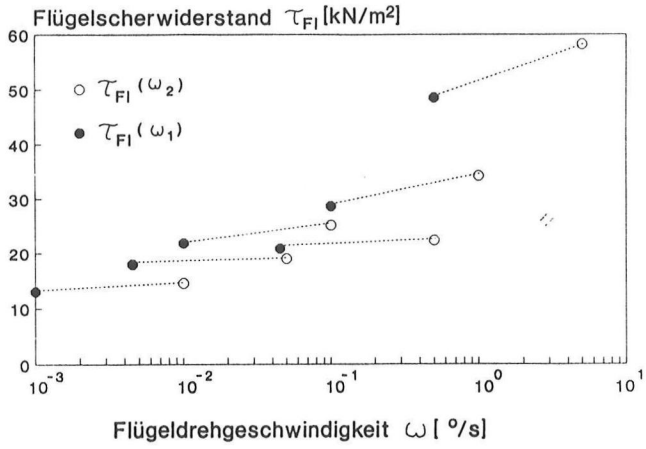

Abb. 9: Typisches Ergebnis einer Laborversuchsreihe mit sprunghafter Änderung der Flügeldrehgeschwindigkeit

Der teilentwässerte Klärschlamm ist relativ inhomogen. Die bodenmechanischen Kennwerte liegen in folgenden Bereichen:

Wassergehalt (bodenmechanisch):	w	= 124	bis 154	Mass.-%
Trockensubstanzgehalt:	TS	= 39,4	bis 44,6	Mass.-%
Wassergehalt an der Fließgrenze:	w_L	= 130	bis 175	Mass.-%
Wassergehalt an der Ausrollgrenze:	w_P	= 50	bis 65	Mass.-%
Plastizitätszahl $I_P = w_L - w_P$:	I_P	= 75	bis 115	Mass.-%
Glühverlust:	V_{gl}	= 20	bis 26	Mass.-%
Kalkgehalt:	V_{Ca}	= 38	bis 47	Mass.-%

Die Werte für den Glühverlust beziehen sich auf die Gesamtmasse des Klärschlamms einschließlich Kalkanteil.

4.2 Einfluß der Drehgeschwindigkeit der Flügelsonde auf den Scherwiderstand

Abb. 9 zeigt das typische Ergebnis einer Laborversuchsreihe mit sprunghafter Änderung der Flügeldrehgeschwindigkeit für Klärschlamm mit 150 % Wassergehalt. Die durch gestrichelte Linien verbundenen Punkte markieren jeweils die maximal ermittelten Flügelscherwiderstände $\tau_{Fl}(\omega_i)$ eines Einzelversuchs mit sprunghafter Änderung der Drehgeschwindigkeit um den Faktor 10 (vgl. Abb. 7).

Abb. 10 zeigt eine Zusammenstellung bisheriger Ergebnisse des Untersuchungsprogramms. Aus den Meßwerten des Flügelscherwiderstandes eines Versuchs mit sprungartiger Änderung der Drehgeschwindigkeit wurde das Verhältnis gebildet und dieser Verhältniswert abhängig von der unteren Drehgeschwindigkeit aufgetragen. Die Darstellung enthält die Ergebnisse von Feld- und Laborflügelsondierungen mit einem Verhältnis der Drehgeschwindigkeiten ω_2/ω_1 von 10. Zusätzlich wurden Ergebnisse von Laborflügelsondierungen mit einem Verhältnis von ω_2/ω_1 gleich 100 und 1000 angegeben.

Aus der Abb. 10 ist zu ersehen, daß eine Erhöhung der Flügeldrehgeschwindigkeit um den Faktor 10 zu einem Anstieg der gemessenen Flügelscherwiderstände zwi-

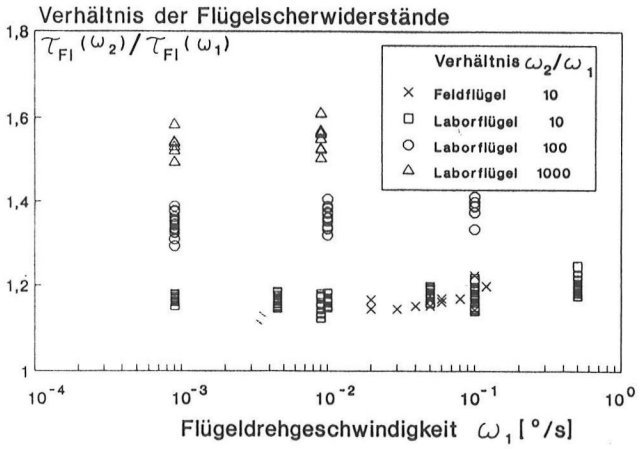

Abb. 10: Verhältnis der Flügelscherwiderstände abhängig von der Flügeldrehgeschwindigkeit

schen 15 und 25 % führt, wobei sich die größeren Werte für die größeren Drehgeschwindigkeiten ω_1 ergeben. Dieses gilt sinngemäß für die Ergebnisse von Versuchen mit „Sprungfaktoren" von 100 und 1000. Die Ergebnisse der „Sprungversuche" mit der Labor- und mit der Feldflügelsonde liegen in derselben Größenordnung.

Der bei unvorbelasteten bindigen Erdstoffen normalerweise vorhandene exponentielle Zusammenhang zwischen Wassergehaltsänderung und Änderung der undränierten Scherfestigkeit kann aus unseren bisherigen Untersuchungen wegen der Inhomogenität des Klärschlamms nicht abgeleitet werden.

5. Verfahren zur Beurteilung der Scherfestigkeit von Klärschlamm

5.1 Kritische Anmerkungen zu den Festlegungen in der TA-Abfall

Zur Zeit herrscht bei der Beurteilung der Deponierfähigkeit von Klärschlamm große Unsicherheit, wobei die Anforderungen gemäß TA-Abfall, sofern diese für die oberirdische Ablagerung von Klärschlamm trotz im allgemeinen hoher Glühverluste von mehr als 10 Mass.-% herangezogen werden, noch keine Lösung im Sinne der Bodenmechanik bieten. Die unabhängig von der geotechnischen Konstruktion der Deponie getroffene Festlegung eines Grenzwertes (Zuordnungswertes) für die Festigkeit (in der TA-Abfall wird für die Flügelscherfestigkeit ein Zuordnungswert $\geq$ 25 kN/m² angegeben) ist für die Beurteilung der Stabilität bzw. der Standsicherheit von Deponiekörpern nicht sinnvoll, insbesondere nicht für Material mit ausgeprägt rheologischen Eigenschaften. Wie bereits einleitend erwähnt, sind im Zusammenhang mit der Festlegung von Zuordnungswerten auch die Ergebnisse von Standsicherheitsuntersuchungen nach den Prinzipien der Bodenmechanik und des Grundbaus zu berücksichtigen.

Komodromos [8] empfiehlt, für die Prüfung der Deponierfähigkeit von schlammartigem Sonderabfall generell nur die gemäß TA-Abfall als Alternative zum Flügelscherversuch genannte Methode auf der Basis von einaxialen Druckversuchen nach DIN 18136 anzuwenden. Dabei werden ein Fließ- und ein Bruchwert an Probekörpern ermittelt, die in Anlehnung an DIN 18127 vom März 1987 (Proctorversuch) hergestellt werden.

Die Verfasser dieses Beitrages stimmen mit Komodromos überein, daß die Festlegungen der TA-Abfall zur Beurteilung der Deponierbarkeit von Klärschlamm zu verbessern sind, und zwar hinsichtlich der Methoden der Probenbehandlung bzw. -vorbereitung, der Art der Festigkeitsbestimmung unter Berücksichtigung rheologischer Einflüsse sowie der Beurteilung der Ergebnisse. Die Methoden müssen weitestgehend vereinheitlicht werden und Rückschlüsse auf das zeitliche Last-Verformungsverhalten ermöglichen, wobei hier die Vorzüge der Flügelsondiertechnik bei Variation der Flügeldrehgeschwindigkeit genutzt werden sollten. Unsere bisherigen Untersuchungen zeigen, daß der rheologische Einfluß auf die Scherfestigkeit von Schlammproben durch Flügelsondierungen sehr gut erfaßt werden kann.

Das nachfolgend vorgestellte Verfahren zur Beurteilung der Scherfestigkeit von abzulagerndem Klärschlamm berücksichtigt den Einfluß der Schergeschwindigkeit (vgl. Abschn. 2). Es ist in der Durchführbarkeit einfacher als das von Komodromos vorgeschlagene Verfahren. Zusätzlich bietet die Flügelsondiertechnik den entscheidenden Vorteil, die Scherfestigkeit von Klärschlamm auch nach dem Einbau in die Deponie kontrollieren zu können.

5.2 Vorschlag für ein Verfahren

Stabilitätsberechnungen

Für die gewählte Deponiekonstruktion sind unter Berücksichtigung der Einbaumethode Standsicherheitsuntersuchungen nach den Regeln der Bodenmechanik und des Grundbaus durchzuführen. Daraus ergeben sich rechnerisch erforderliche Scherfestigkeitswerte cal c_u für die Bauzustände und für den Zustand unmittelbar nach Fertigstellung.

Festlegung des erforderlichen Flügelscherwiderstandes

Zur Abdeckung rheologischer Einflüsse ist ein Korrekturbeiwert μ festzulegen. Zusätzlich ist ein Sicherheitsbeiwert von $n = 1{,}3$ (vgl. z. B. EAU 1990) zur Abdeckung von Ungenauigkeiten (Meßunsicherheit im Versuch, Variationsbreite bei der Probenherstellung usw.) zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich für den Flügelscherwiderstand, der im Labor- und Feldversuch im Grenzzustand nachzuweisen ist, die folgende Forderung:

$$\text{erf } \tau_{Fl} \geq \text{cal } c_u * n/\mu$$

Die Festlegung des Korrekturwertes kann in erster Näherung in Anlehnung an Bjerrum [1] (s. Abb. 4) vorgenommen werden. Für den hier untersuchten Klärschlamm ergeben sich Korrekturwerte von rd. 0,6. In diesem Zusammenhang ist jedoch einschränkend anzumerken, daß einerseits die Übertragbarkeit des Diagramms auf Schlamm noch nicht nachgewiesen ist und andererseits die Bestimmung der Wassergehalte an Fließ- und Ausrollgrenze für Klärschlamm wegen der von Boden abweichenden Stoffeigenschaften problematisch ist.

Wir schlagen daher als „Eignungsuntersuchung" für die Deponierbarkeit von teilentwässertem Klärschlamm in einer Monodeponie die Durchführung von Laborversuchsreihen mit sprunghafter Änderung und Variation der Flügeldrehgeschwindigkeit vor (vgl. Abb. 9 und 10).

Die Anzahl der Versuche hängt von der Homogenität des Materials ab und sollte eine statistische Auswertung der Ergebnisse ermöglichen. Da Klärschlämme sich je nach Herkunft und Konditionierung in ihren bodenmechanischen Kennwerten stark unterscheiden können, muß die „Eignungsuntersuchung" anhand der vorgenannten Kriterien für jeden Klärschlammtyp vorab durchgeführt werden, um den Korrekturbeiwert einzugrenzen. Erst dann sollte die regelmäßige Anlieferung zur Einlagerung in eine Deponie beginnen.

Eingangskontrolle

Bei positiven Ergebnissen der „Eignungsuntersuchung" sind bei Anlieferung jeder Charge eines „Klärschlammtyps" Eingangskontrolluntersuchungen durchzuführen. Die Häufigkeit der Eingangskontrolle kann z. B. entsprechend den Vorgaben in der TA Abfall (Anhang B) gewählt werden. Jede entnommene Probe wird nach einer festgelegten Methode mit konstanter Verdichtungsarbeit (z. B. in Anlehnung an den Proctorversuch) in Probenentnahmezylinder eingebaut. Anschließend werden an jedem Entnahmezylinder mindestens drei Laborflügelsondierungen mit konstanter Flügeldrehgeschwindigkeit durchgeführt. Aus den im Grenzzustand gemessenen Scherwiderständen wird der arithmetische Mittelwert vorh τ_{Fl} berechnet. Der Zeitaufwand für die Messungen pro Entnahmezylinder beträgt nach bisherigen Erfahrungen rd. 20 Minuten. Die Eignung des Materials für den Einbau in die Deponie gilt als nachgewiesen, wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\text{vorh } \tau_{Fl} \geq \text{erf } \tau_{Fl}$$

Einbaukontrolle

Nach Einbau in die Deponie wird die Scherfestigkeit mit einer Feldflügelsonde gemäß DIN 4096 überprüft. Pro 1000 m² oder 500 m³ ist mindestens eine Sondierung durchzuführen. Wenn gravierende Festigkeitsverminderungen infolge des Einbauverfahrens festgestellt werden, müssen Anpassungen des Korrekturwertes vorgenommen und gegebenenfalls auch Zusatzmaßnahmen hinsichtlich der Standsicherheit ergriffen werden. Diese Vorgehensweise setzt voraus, daß die Meßergebnisse von Sondierungen mit der Laborflügelsonde mit denen der Feldflügelsonde bei gleichem Material übereinstimmen. Dies wurde im vorliegenden Fall untersucht und bestätigt.

5.3 Schlußbemerkungen

Bei der Planung und beim Bau von Monodeponien für Klärschlamm sowie für sonstige Schlämme mit großen Anteilen an organischen Substanzen müssen zusätzlich mögliche Einflüsse aus Stoffumsetzungsprozessen berücksichtigt werden. Derartige Umsetzungsprozesse laufen im allgemeinen in langen Zeiträumen ab. Sie können erhebliche Auswirkungen auf die Scherfestigkeit haben. Diese Effekte werden aber bisher bei keinem Verfahren zur Deponierfähigkeit von Klärschlamm berücksichtigt. Hinsichtlich dieses Problems wird auf vergleichende Betrachtungen von natürlichen Erdstoffen mit entsprechend hohen organischen Anteilen sowie auf das aktuelle Schrifttum (z. B. Doedens [4] und Lichtensteiger [10]) verwiesen.

Die experimentellen Untersuchungen und Auswertungen wurden mit Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen gefördert.

6. Literatur

[1] Bjerrum, L. (1973): „Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils". Proc. of the 8th. Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng., Moskau, Bd. 3.

[2] Blümel, W. / von Bloh, G. (1991): „Determination of shear strength of different sludges – methods and effects –". Third International Landfill Symposium, Sardinia '91, 14.–18. 10. 91, Cagliari, Italien.

[3] Cadling, L. / Odenstad, S. (1950): „The Vane Borer. An Apparatus for Determining the Shear Strength of Clay Soils Directly in the Ground". Royal Swedish Geotechnical Institute, Proc. No. 2, Stockholm.

[4] Doedens, H. (1989): „Ablagerung von Klärschlamm auf Monodeponien". Beihefte zu Müll und Abfall „Klärschlammentsorgung", Heft 28, Hrsg. D. O. Reimann, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

[5] Drescher, J. (1988): „Festigkeit von abzulagernden Schlämmen". Fortschritte der Deponietechnik, HdT Essen, Seminar 3./4. Mai 1988.

[6] Gudehus, G. / Leinenkugel, H. J. (1978): „Fließdruck und Fließbewegung in bindigen Böden: neue Methoden". Vorträge Baugrundtagung Berlin.

[7] Komodromos, A. (1987): „Beitrag zur Festigkeitsbeurteilung von Abfällen und Schlämmen". Müll und Abfall, Heft 2/87.

[8] Komodromos, A. (1992): „Beurteilung der Deponierfähigkeit von Abfällen – Methodik zur Bewertung des mechanischen Verhaltens". Fachzeitschrift „Müll und Abfall", Heft 3/92.

[9] Leinenkugel, H. J. (1976): „Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalische Deutung". Veröffentlichungen des Inst. für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 66.

[10] Lichtensteiger, T. (1989): „Ablagerung von Klärschlamm in Deponien". Beihefte zu Müll und Abfall „Klärschlammentsorgung", Heft 28, Hrsg. D. O. Reimann, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

[11] Perlow, M. / Richards, A. F. (1977): „Influence of shear velocity on vane shear strength". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT1.

[12] Spinosa, L. et al. (1989): „Rheological characterization of sewage sludge". Recycling von Klärschlamm, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin.

[13] Torstensson, B.-A. (1977): „Time-dependent effects in the field vane test". Proc. of the Int. Symp. on Soft Clays, Bangkok, Thailand.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. W. Blümel und Dipl.-Ing. G. von Bloh, Universität Hannover, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Appelstr. 9A, D-3000 Hannover 1

Merkblatt über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen aus öffentlichen und privaten Einrichtungen des Gesundheitsdienstes

Stand: Mai 1991

Herausgeben von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Arbeitsgruppe „Entsorgung von Abfällen aus öffentlichen und privaten Einrichtungen des Gesundheitsdienstes"

23 Seiten, DIN A 5, DM 6,80. Staffelpreise: ab 5 Expl. DM 5,85, ab 10 Expl. DM 5,40, ab 25 Expl. DM 5,15, ab 50 Expl. DM 4,95 je Exemplar. ISBN 3 503 03313 0

Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Mitteilung 18

Die Entsorgung von Abfällen aus öffentlichen und privaten Einrichtungen des Gesundheitsdienstes haben Auswirkungen auf
- die Gesundheit und das Wohl der Menschen,
- die Umwelt (Luft, Wasser, Boden, Tiere, Pflanzen, Landschaft),
- die Belange der öffentlichen Sicherheit und Ordnung.

Allerdings bestätigen die Erfahrungen der Praxis, daß von Abfällen aus den Einrichtungen des Gesundheitsdienstes bei sachgerechter Behandlung keine größeren Gefahren ausgehen als von ordnungsgemäß entsorgtem Hausmüll oder Industrieabfällen.

Das Merkblatt gibt Hinweise über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen aus öffentlichen und privaten Einrichtungen des Gesundheitsdienstes.

ERICH SCHMIDT VERLAG Berlin · Bielefeld · München