

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig



Heft Nr. 31

IGB·TUBS

Standsicherheiten im Deponiebau

Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen

Fachseminar 19./20. März 1990

Braunschweig 1990

Herausgegeben von W. Rodatz, P. Beckefeld, U. Sehrbrock

VORWORT

Das vorliegende Heft der Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik erscheint anlässlich unseres Seminars über Standsicherheiten im Deponiebau und Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen. Beide im Rahmen dieses Seminars behandelte Themenstellungen ergaben sich aus aktuellen Forschungsarbeiten, die seit einiger Zeit am Institut bearbeitet werden.

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik möchte mit diesem Seminar dazu beitragen, einerseits den Stand der Technik und der Forschung darzustellen, andererseits aber - so hoffen wir - zur Diskussion der Probleme derjenigen anzuregen, die sich dankenswerterweise in der Verwaltung, in Ingenieurbüros, in den bauausführenden Firmen, in den Firmen, die sich mit der Entwicklung von Deponiebauprodukten befassen, sowie in den Forschungseinrichtungen mit dem Problem der sicheren Ablagerung von Abfallstoffen unserer Gesellschaft befassen. Es ist derzeit nicht erkennbar, daß die allenthalben gestellte Forderung nach Vermeidung und Verwertung von Abfällen zu einer spürbaren Verminderung der abzulagernden Abfallmenge führen wird - in jedem Fall bleibt eine nennenswerte Menge, die auch in Zukunft zu deponieren ist. Aus diesem Grunde muß an der Erfüllung der gestellten Forderung nach einer möglichst sicheren Ablagerung heute mit Nachdruck gearbeitet werden.

Wir hoffen, daß das gesteckte Ziel, angeregt durch die Beiträge der Referenten und durch Diskussionen im Plenum und bei Begegnungen während und nach dem Seminar, erreicht wird, so daß wir auf dem Weg zur Lösung der anstehenden Probleme zumindest ein Stückchen weiter gekommen sind.

Ich danke allen Referenten für die Ausarbeitung und den Vortrag ihres Beitrages und allen Seminarteilnehmern für ihr Interesse. Das große Interesse, das dieses Seminar erfahren hat, wird die Mitarbeiter des Instituts ermuntern, auch in Zukunft ähnliche Veranstaltungen durchzuführen. Für die Ausrichtung dieses Seminars danke ich der Zentralstelle für Weiterbildung der Technischen Universität Braunschweig sowie den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts, insbesondere Frau Dipl.-Ing. Petra Beckefeld und Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Sehrbrock für das wissenschaftliche Konzept.

Braunschweig im März 1990



(Prof. Dr.-Ing. Walter Rodatz)

Inhaltsverzeichnis

Standssicherheitsnachweise für Deponien Prof. Dr.-Ing. Drescher.....S.	1
Reibungsverhalten von Kunststoffdichtungsbahnen Dr.-Ing. Kruse, Dipl.-Ing. Voigt.....S.	13
Abdichtungen von Steilhängen Dipl.-Ing. Möller.....S.	31
Scherparameter von Müll und Klärschlamm Dipl.-Ing. Gay.....S.	43
Einfluß der Lastumlagerung von Müll auf Klärschlamm auf die Standssicherheit Dr.-Ing. Spillmann.....S.	55
Berechnung von Schächten in Deponien Dipl.-Ing. Ney, Dr. Hug.....S.	73
Statische Berechnung und Bauausführung von Deponiedränagen Dipl.-Ing. Prein, Dr.-Ing. Reuter.....S.	89
Untersuchungen zur Schutzwirkung von Geotextilien Dipl.-Ing. Sehrbrock.....S.	107
Schadstoffeinbindung mittels Verfestigungsverfahren - höheres Anforderungsniveau in der Zukunft Dr. Gerschler.....S.	123
Baustellenerfahrungen mit der Verfestigung kontaminierter Böden Dr.-Ing. Krings.....S.	143
Erfahrungen aus der Anwendung der in der TA-Abfall (Entwurf) geforderten Kriterien für die Eignungs- prüfung und die Güteüberwachung verfestigter Abfälle Dipl.-Ing. Beckefeld.....S.	153
Praxisnahe Prüfung des Deponieverhaltens von reaktiven Massengütern Dr. Frigge.....S.	167
Verfahren zur Ablagerung von Rauchgasreinigungs- rückständen aus Müllverbrennungsanlagen Dr. Oberste-Padtberg, Dr. Roeder.....S.	181
Geowissenschaftliche und verfahrenstechnische Aspekte der Untertagedeponierung von Sonderabfällen Dr. Brassler, Dr. Mühlenweg, Dipl.-Ing. Meyer.....S.	197

Modellmäßige Untersuchungen zur Fixierung bzw. Mobilisierung von Schadstoffen bei der Verfestigung von Abfällen Prof. Dr. Bahadir.....	S. 211
Verfestigung schwermetallhaltiger Abfallstoffe mit hydraulischen Bindemitteln - Mechanismen der Immobilisierung Prof. Dr.-Ing. Großkurth, Dipl.-Phys. Malorny.....	S. 223
Autorenverzeichnis.....	S. 233
Inserentenverzeichnis.....	S. 237

STANDSICHERHEITSNACHWEISE FÜR DEPONIEEN

1 Einleitung

Deponien sind ingenieurmäßig zu planen, zu berechnen, kontrolliert und überprüfbar herzustellen. Dies betrifft sowohl bauliche Einzelelemente wie Dämme, Dichtungen usw. als auch den Einbau der abzulagernden Abfälle, mithin das gesamte Bauwerk "Deponie". Da spätere Nacharbeiten nur in Teilbereichen möglich sind, ist es erforderlich, die vorausgesetzten planerischen Vorgaben während der Baudurchführung und der Abfallablagerung (Einbau) gewissenhaft einzuhalten.

2 Anforderungen an den Deponiekörper

Der Deponiekörper ist in sich selber und in Bezug zu seiner Umgebung mechanisch stabil herzustellen. Weder die von ihm hervorgerufenen Verformungen im Untergrund, noch seine Eigenverformungen dürfen die Integrität der Dichtungssysteme sowie die Funktion der Entwässerungseinrichtungen nachteilig beeinträchtigen. Die Stabilität und die Verformungen sind deshalb sowohl für die einzelnen Ablagerungsphasen (Zwischenbauzustände) als auch für den Nachablagerungszustand (Endzustand) rechnerisch nachzuweisen.

Das sich häufig von Erdbaustoffen unterscheidende Zeitfestigkeits-, Zeitverformungsverhalten der Abfälle ist dabei zu beachten.

Nachfolgend wird kurz auf die wesentlichen Unterschiede bei der Bewertung von Erdbaumaterialien und Abfällen eingegangen.

Bei Erdbauwerken wird das Material für den Baukörper entsprechend den rechnerisch erforderlichen festigkeitsmäßigen Vorgaben ausgesucht und nach erdbautechnischen Regeln eingebaut. Dies erfolgt unter laufender Überprüfung des verwendeten Materials und der Einbaugüte (Verdichtung).

Dagegen sind bei der Planung der Deponie die Zusammensetzung und die Festigkeit der abzulagernden Abfälle häufig unbekannt. Beide werden sehr heterogen sein. Im Gegensatz zu den meisten natürlichen Erdbaustoffen können Abfälle außerdem ausgeprägt rheologisch reagieren, z.B. ein augenscheinlich festes Material das bei Schlagbeanspruchung splittrig zerbricht, kann sich unter statischer Last wie eine hochviskose Flüssigkeit verhalten.

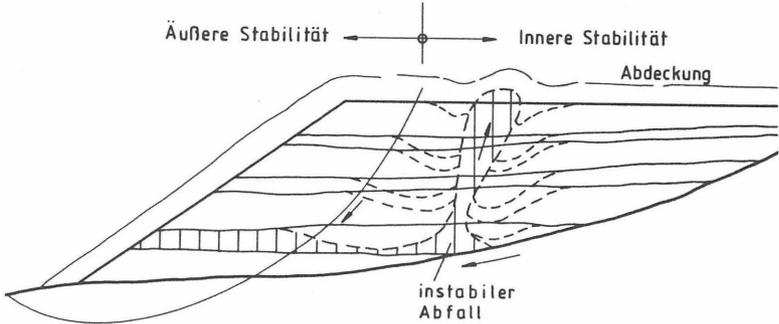
Bei der Planung kommt es deshalb darauf an, das Abfallverhalten möglichst zutreffend einzuschätzen, sofern nicht bei der Abfallerzeugung bestimmte Materialeigenschaften einstellbar sind. Dies wird bei Massenabfällen aber fast immer zu erreichen sein.

Ausgehend von den unterschiedlichen mechanischen Beanspruchungen im Deponiekörper ist in die Nachweise für die äußere und die innere Stabilität zu unterscheiden. Bild 1.

Äußere Stabilität

Hierunter sind die Nachweise für die Stabilität und Verformung im Hinblick auf eine dauernde Funktionstüchtigkeit von Bauteilen der Deponie, z.B. Abdichtungssysteme sowie den sicheren Bestand (Außenwirkung) des Deponiekörpers zu verstehen.

Diese Nachweise sind im wesentlichen mit den jeweiligen erdstatischen Ansätzen zu führen. Die rechnerischen Vorgaben entsprechen denen von Erdbauwerken.



Äußere Stabilität

- Böschungsbruch
- Grundbruch
- Spreizspannungen
- Gleiten

Innere Stabilität

- Durchbrechen von einzelnen Schichten

Bild 1 Schema der äußeren und inneren Stabilität

Innere Stabilität

Diese wird durch die Festigkeit der Abfälle und/oder durch die Güte des Einbaus bestimmt. Ein Deponiekörper kann z.B. in bestimmten Fällen als ein System von einzelnen aufeinanderliegenden Schichten mit unterschiedlichen Stoffeigenschaften (elastisch, plastisch), unterschiedlicher Festigkeit und Dichte angesehen werden. Unterschreiten diese in einzelnen Schichten eine kritische Schwelle, kann es zu örtlichen Instabilitäten innerhalb des Deponiekörpers, zu Aufbrüchen und in deren Folge z.B. zur Verletzung des oberen Abdichtsystems, dem Austreten von Abfällen bis hin zur Gefährdung der äußeren Stabilität kommen.

Für derartige Vielschichtenprobleme mit viskoplastischem Stoffverhalten, die sich mit herkömmlichen erdstatischen Ansätzen nicht lösen lassen, fehlen noch brauchbare Ansätze, DRESCHER (1988).

Der hier benutzte Begriff der "inneren Stabilität" stimmt nicht mit dem in den "Empfehlungen des Arbeitskreises - Geotechnik der Deponien und Altlasten -, E 2 - 6" (1989) der DGEG überein. Er wird dort im Zusammenhang mit dem Deponiebetrieb beim Einbau, nicht aber für das Festigkeitsverhalten des Deponiekörpers verwendet.

Im Nachstehenden wird nur auf die Standsicherheitsnachweise im Sinne der "äußeren Stabilität" eingegangen.

3 Abfallfestigkeit

Die Geometrie und damit das nutzbare Volumen einer Deponie hängt in erster Linie von der Abfallfestigkeit und der Abfallverformung ab. Die für die Stabilitätsnachweise verwendeten Festigkeits- und Verformungsparameter müssen für den gesamten Deponiebereich unter den zu erwartenden Belastungen langfristig gewährleistet sein.

Hierbei ist zu beachten, daß es vor allem bei Abfällen mit nennenswerten organischen Anteilen wie z.B. bei Hausmüll oder bei kommunalem Klärschlamm, infolge der stofflichen Veränderung bei dem zu erwartenden Abbau der organischen Substanz (Mineralisierung) zu Festigkeitsveränderungen kommen kann. Dies trifft ebenfalls für kalkstabilisierte Klärschlämme zu. Auch dort kann, wenn auch zeitlich verzögert, die Zersetzung der organischen Anteile mit der Aufkarbonatisierung des anfänglich vorhandenen Kalziumhydroxids zu einem Festigkeitsabfall führen.

Sofern nicht eingehende Untersuchungsergebnisse vorliegen, die auch die zeitliche Festigkeitsveränderungen umfassen müssen, werden folgende Berechnungsparameter empfohlen:

Siedlungsabfälle (Hausmüll)

Anfangswerte

innerer Reibungswinkel	$\varphi = 30^\circ$
Kohäsion	$c = 20 \text{ kN/m}^2$
Wichte	$\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ (Frischmüll)
	$\gamma = 13 \text{ kN/m}^3$ (Rottemüll)

Endwerte

innerer Reibungswinkel	$\varphi' = 25^\circ$
Kohäsion	$c' = 0 \text{ kN/m}^2$
Wichte	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$

Schlämme

kommunale Klärschlämme und organische Schlämme aus der Produktion

Anfangswerte

je nach Zusammensetzung und Konditionierung

Endwerte

je nach Konditionierung

innerer Reibungswinkel	$\varphi' = 15 \text{ bis } 25^\circ$
Kohäsion	$c' = 0 \text{ kN/m}^2$
Wichte	$\gamma = 11 \text{ kN/m}^3$

sonstige Schlämme

je nach Zusammensetzung und Konditionierung, jedoch ist eine einaxiale Druckfestigkeit von $q_u \geq 25 \text{ kN/m}^2$ einzuhalten. Zu beachten ist das rheologische Verhalten

Da über die Langzeitwirksamkeit von Konditionierungsmaßnahmen (Verfestigung) von Abfällen mit organischen Anteilen noch erhebliche Unsicherheiten bestehen, sollten folgende Annahmen getroffen werden:

- bei Standsicherheitsnachweisen für derartige konditionierte Abfälle muß ein Sicherheitsbeiwert von $\eta \geq 1,0$ bezogen auf den nicht verfestigten Abfall eingehalten werden.
- die durch die Konditionierung erreichte Festigkeit muß ausreichen, damit die nach DIN geforderten Sicherheitsbeiwerte $\eta \geq 1,0$ eingehalten werden (Abdecken des erforderlichen Sicherheitsanteiles $\Delta \eta$).
- sofern dies nicht aus Gründen einer Stofffixierung erforderlich ist, sollte die Festigkeit durch die Konditionierung nicht stärker als notwendig angehoben werden, da dies in der Regel auf Kosten des Deponievolumens geht.

4 Rechnerische Stabilitätsnachweise

Für die Standsicherheitsnachweise sind die Sicherheitsbeiwerte der jeweiligen verwendeten DIN-Norm einzuhalten. Wird z.B. mit einer Verbesserung oder Verschlechterung der Festigkeit gegenüber dem Ausgangszustand gerechnet, sind die Stoffparameter diesen erwarteten Größenänderungen anzupassen. Das Verfahren, den Anfangswert in die Rechnung einzuführen und für die zu erwartende Stoffveränderung einen höheren oder niedrigeren Sicherheitsbeiwert als nach DIN erforderlich einzusetzen, ist abzulehnen, da dies dem Sinn des Sicherheitsbegriffes zuwiderläuft und darüberhinaus die Veränderung des Materialverhaltens unzulässigerweise verdeckt.

Folgende rechnerischen Nachweise sind in jedem Fall zu führen:

4.1 Untergrund

4.1.1 Nachweis der Stabilität des Deponieauflagers

Bei gering tragfähigem Untergrund ist es erforderlich, den Nachweis über die zulässige Ablagerungsgeschwindigkeit (Aufhöhungsrates) und die dafür max. zul. Böschungsneigung der Außenböschungen zu führen.

4.1.2 Nachweis der Verformungen des Deponieauflagers:

- horizontal
- vertikal (Setzungen) unter Teil- und Vollverfüllung der Deponie.

Die Setzungsberechnungen sind für alle maßgeblichen Schnitte zu führen die zur Festlegung der Basisüberhöhung für das Einhalten der vorgeschriebenen Mindestgefälle (längs, quer) erforderlich sind.

Sofern sich aus dem Untergrundaufbau nicht andere Bedingungen ergeben, z.B. sehr gering kompressible Böden, tiefreichende hoch kompressible Schichten, ist von einer Einflußtiefe von

$$t = \frac{2 \cdot P_z}{\gamma}$$

t = Einflußtiefe

γ = Wichte des Untergrundes

P_z = Müllauflast

auszugehen.

4.1.3 Bei Gruben ist die bauzeitliche Stabilität

- der Grubenböschungen und
 - der Grubensohle (hydraul. Grundbruch)
- nachzuweisen

4.1.4 Nachweis der Stabilität der Randdämme

- Böschungsstandsicherheiten
- Nachweis gegen Abgleiten auf der Unterlage
 - Teil- und Vollfüllung
 - Vollfüllung, Versagen der Basisentwässerung

4.2 Deponiekörper

4.2.1 Nachweis der Stabilität

- Böschungsstandsicherheit für die Bauzustände (Verfüllungszustände) und den Endzustand. Hierbei sind die jeweils maßgebenden Festigkeitswerte (Anfangs-, Endwerte) einzusetzen.
- Nachweis von befahrenen Müllbermen
Standicherheit der Einzelböschungen,
Sicherheitsabstand zur Böschungsschulter
- Böschungsstandsicherheit im Endzustand bei versagender Basisentwässerung
- Aufnahme der Spreizspannungen auf dem Basisabdichtungssystem
 - bauzeitlich
 - Endzustand
- Nachweis der Gleitsicherheit des Deponiekörpers bei geneigter Deponiebasis

- Stabilität des Basisabdichtungssystemes bei geneigter Unterlage, Bauzustände, Nicht- oder Teilverfüllung, Bild 2
- Abgleiten der mineralischen Dichtschicht auf der Unterlage

- Abgleiten der Kunststoffdichtungsbahn auf der mineralischen Dichtschicht bei aufgebrachtem Basisentwässerungssystem

- Stabilität des Basisentwässerungssystems; bei diesem Nachweis sind angemessene Strömungskräfte aus Niederschlag zu berücksichtigen

Stabilität der Sickerrohrleitungen; bei dem Nachweis ist von folgenden Werten auszugehen
DIN 19667 (Entwurf)

Wichte Müll	$\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$
Temperatur	$T = 40^\circ\text{C}$, Dauer 40 Jahre
Bettungswinkel	$2 \cdot \alpha = 90^\circ$

- Stabilität der Schächte

- Stabilität des Oberflächen Abdeck- bzw. Abdichtungssystems
 - bei ordnungsgemäß funktionierenden Entwässerungsschichten
 - bei Versagen der Entwässerungsschichten

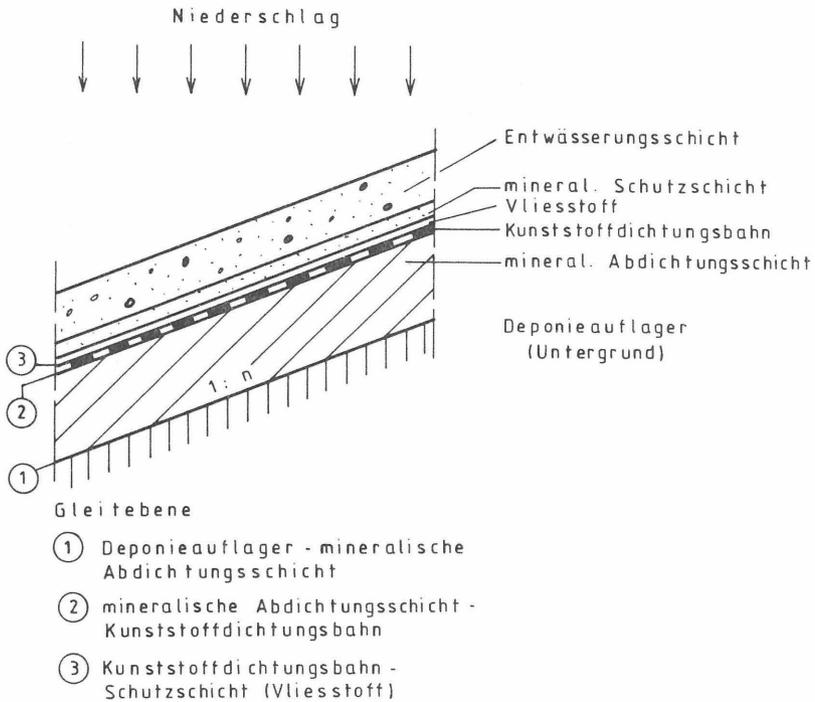


Bild 2 Mögliche Gleitflächen für Stabilitätsnachweise bei geneigten Basisabdichtungssystemen

4.2.2 Nachweis der Verformungen

- Eigensetzungen des Deponiekörpers
- Verformung der Kunststoffdichtungsbahn aus
 - Verformung (horizontal, vertikal) des Deponieuntergrundes
 - Aufnahme von Spreizspannungen
 - Reibungsübertragung aus dem Müll auf Basisböschungen
 - aus Bauwerkslasten wie z.B. Schächte
- Setzungsverlauf der Sickerrohrleitungen
- Verformung der Sickerrohrleitungsanschlüsse

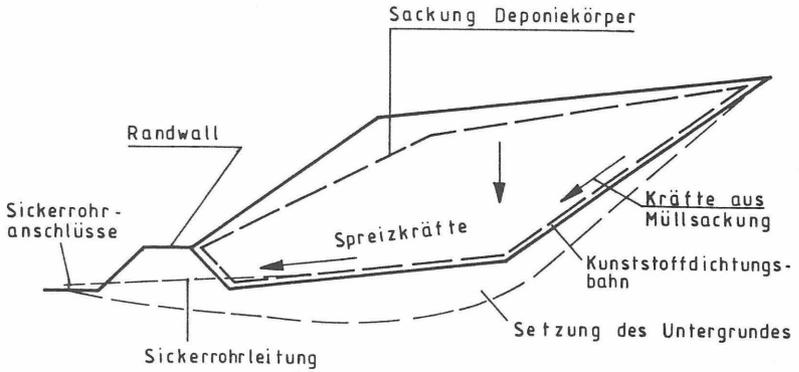


Bild 3 Schema zur Beanspruchung der Kunststoffdichtungsbahn

Die Kunststoffdichtungsbahnen dürfen nicht zur rechnerischen Aufnahme von Zugspannungen herangezogen werden. Nicht vermeidbare Beanspruchungen die aus der Verformung des Deponiekörpers und des Deponieuntergrundes herrühren dürfen keine größeren Verformungen als

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,01 \quad \text{einaxiale Verformung} \\ \epsilon_{\text{yXZ}} &= 0,03 \quad \text{mehraxiale Verformung} \end{aligned}$$

hervorrufen.

Literatur

Drescher, J. (1988)

Festigkeit von abzulagernden Schlämmen

Fehlau/Stief

Fortschritte der Deponietechnik 1988

- Abfallablagerung und TA-Abfall,

Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, 23, 265 - 290

Erich Schmidt Verlag, Berlin

Empfehlungen des Arbeitskreises

"Geotechnik der Deponien und Altlasten"

Deutsche Ges. für Erd- und Grundbau e.V.

Bautechnik 1989, Jg. 66, 9, 289 - 302

Ltd. Dir., Prof. Dr.-Ing. Drescher

Nieders. Landesamt für, Bodenforschung

Stilleweg 2, 3000 Hannover 51

REIBUNGSVERHALTEN VON KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN

Dr.-Ing. Thomas Kruse
Erdbaulaboratorium Ahlenberg

Dipl.-Ing. Thomas Voigt
Institut für Grundbau und Bodenmechanik TUBS

1. Einleitung

Kombinationsabdichtungen bestehend aus mineralischem Dichtungsmaterial, Kunststoffdichtungsbahnen sowie Schutz- und Dränageschichten werden zum Schutz der Umwelt als Basis- oder Oberflächenabdichtung von Deponien eingesetzt. Bei der Herstellung dieser kombinierten Dichtungssysteme auf Böschungen spielt das Scherverhalten der einzelnen Systemkomponenten untereinander eine wesentliche Rolle für die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit der gesamten Abdichtung.

Im Nachfolgenden werden einige Grundlagen zur Versuchstheorie und -technik erläutert, sowie Versuchsergebnisse zum Scherverhalten zwischen unterschiedlichen Kunststoffdichtungsbahnen und bindigen mineralischen Abdichtungsmaterialien, nichtbindigen Sanden sowie Geotextilien dargestellt. Auf Grundlage dieser Versuchsergebnisse werden Empfehlungen für den Ansatz von Scherparametern zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und verschiedenen Materialien gegeben.

2. Versuchstheorie und -technik

2.1 Grundlagen

Zur Gewährleistung der Standsicherheit einer Kombinationsabdichtung auf Böschungen sind folgende Nachweise zu führen:

- Die äußere Böschung selbst muß standsicher sein.
- Die einzelnen Komponenten des Dichtungssystems müssen in sich und untereinander standsicher sein.

- Zusätzlich ist nachzuweisen, daß in der Dichtungsbahn keine dauerhaften Zugkräfte entstehen (Bild 1). Diese Forderung ist erfüllt, wenn die aus Eigengewicht und Auflasten in die Dichtungsbahn eingeleiteten Schubkräfte T_0 kleiner sind als die zwischen Dichtungsbahn und mineralischer Dichtung rückhaltend wirkenden Kräfte T_u .

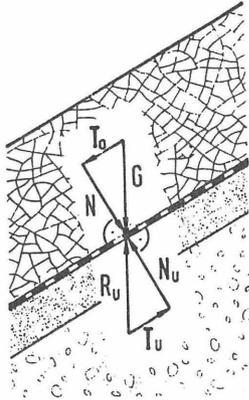


Bild 1: Schematische Darstellung der in einer Kombinationsabdichtung angreifenden Kräfte

Die übertragbare Scherspannung zwischen der Dichtungsbahn und den anliegenden Materialien ergibt sich aus der Gleichung:

$$\tau_{DB} = \sigma_N * \tan \delta' + a'$$

mit:

- τ_{DB} = Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und Boden
- σ_N = wirksame Normalspannung
- δ' = Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden
- a' = Adhäsion zwischen Dichtungsbahn und Boden

Zur Ermittlung der Scherparameter δ' und a' zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und anderen Materialien werden in der Regel Scherversuche im Kastenschervergerät ausgeführt. Die gebräuchlichsten Abmessungen dieser Geräte betragen 10 cm x 10 cm und 30 cm x 30 cm. Bei diesen Versuchen wird die Dichtungsbahn derart in den unteren Scherrahmen einge-

legt, daß ihre geschlossene Oberfläche auch unter Last genau in der erzeugten Scherfuge zwischen dem oberen und dem unteren Scherrahmen liegt (Bild 2).

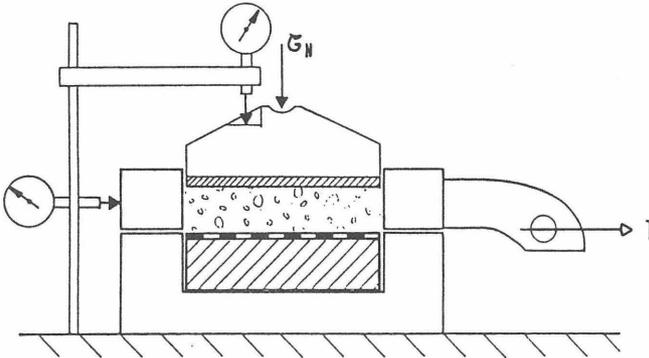


Bild 2: Schematischer Aufbau eines Kastenschersgerätes mit eingebauter Dichtungsbahn

Für jeden der Scherversuche sind drei Teilversuche mit unterschiedlichen Auflasten σ_N auszuführen. Die Auswertung erfolgt in Scherspannungs- (τ)/Normalspannungsdiagrammen (σ_N), aus denen sich die Scherparameter des Bodens Reibungswinkel φ' und Kohäsion c' bzw. analog dazu die Scherparameter Reibungswinkel δ' und Adhäsion a' ergeben (Bild 3).

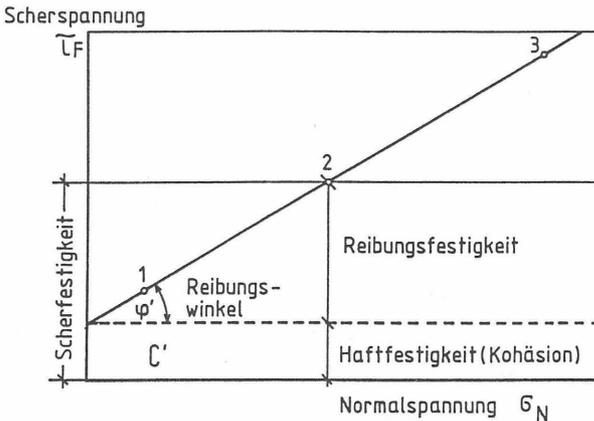


Bild 3: Scherspannungs- /Normalspannungsdiagramm eines Scherversuches

Bei der Auswahl der Normalspannungen für die einzelnen Teilversuche sollte von den später zu erwartenden Belastungen ausgegangen werden:

Für Oberflächenabdichtungen (max. Überdeckung 3 m) und Basisabdichtungen im Bauzustand

$$\underline{\text{z. B.:}} \quad \sigma_N = 12.5, 25 \text{ und } 50 \text{ kN/m}^2$$

Für Basisabdichtungen im Endzustand (Deponie verfüllt)

$$\underline{\text{z. B.:}} \quad \sigma_N = 50, 100 \text{ und } 200 \text{ kN/m}^2.$$

2.2 Versuchstechnik

2.2.1 Scherversuche zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und nichtbindigen Materialien

Versuche mit nichtbindigen Materialien und Kunststoffdichtungsbahnen bereiten i.a. keine größeren Probleme, solange die Größenverhältnisse der Geräte dem maximalen Korndurchmesser angepaßt ist. Ein Verhältnis von Größtkorndurchmesser / Probenhöhe von $d/h \approx 1/10$ sollte nicht überschritten werden. Eine Untersuchung von Dränagematerial mit einem $\varnothing 16/32$ mm ist daher selbst im 30 cm x 30 cm Schergerät nicht mehr praktikabel.

Nach Balthaus/Meseck 1986 [1] können die Versuche mit nichtbindigen Böden im trockenen Zustand durchgeführt werden. Vergleichsmessungen im trockenen und nassen Zustand ergaben nur geringe Unterschiede im ermittelten Reibungswinkel.

Bei Versuchen mit Geotextilien sollten diese vor dem Versuch in Wasser getränkt werden, da bei diesen Versuchen Unterschiede im trockenen und nassen Zustand zu erwarten sind.

Die Versuche können i.a. nur zwischen glatten oder sehr gering strukturierten Dichtungsbahnen ausgeführt werden, da bei größeren Dichtungsbahnstrukturen (z.B. Noppen) die Stauchung des Geotextils durch

die Auflast ebenso wie die Stauchung bei der Krafteinleitung zu versuchstechnischen Problemen führt.

2.2.2 Versuche zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und mineralischen Böden

Bei der Durchführung von Scherversuchen mit bindigen Böden sind mehrere Punkte zu berücksichtigen:

- Für die Untersuchung des mineralischen Dichtungsmaterials sind entsprechend der Proctorkurve ein Wassergehaltsbereich zwischen w_{opt} und w_{95} und die zugehörige Dichte als Einbauparameter zu wählen.
- Die Versuchsgeschwindigkeit sollte möglichst gering gewählt werden, um das Auftreten von Porenwasserüberdrücken zu vermeiden.
- Die Proben sind vor dem Abscheren zu konsolidieren. Dadurch wird gleichzeitig ein sattes und gleichmäßiges Anliegen des Bodens an die Dichtungsbahn erreicht.

Durch die Versuchsvorbereitungen (Homogenisieren des Materials, Einstellen des Bodens auf den entsprechenden Wassergehalt durch Trocknen bzw. Anfeuchten incl. der erforderlichen Wassergehaltsbestimmungen) ergeben sich Vorbereitungszeiten von zwei Tagen bis zu einer Woche.

Bedingt durch die geringe Versuchsgeschwindigkeit, die Konsolidierungszeit sowie die Einbauarbeiten ergibt sich zusätzlich eine Versuchsdauer von ca. 1 - 2 Tagen je Teilversuch.

3. Durchgeführte Versuche und Versuchsergebnisse

Untersucht wurde das Reibungsverhalten zwischen sechs Kunststoffdichtungsbahnen DB1 bis DB6 mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und verschiedenen Böden. Die Oberflächenstrukturen und Abmessungen der Dichtungsbahnen sind Bild 4 zu entnehmen.

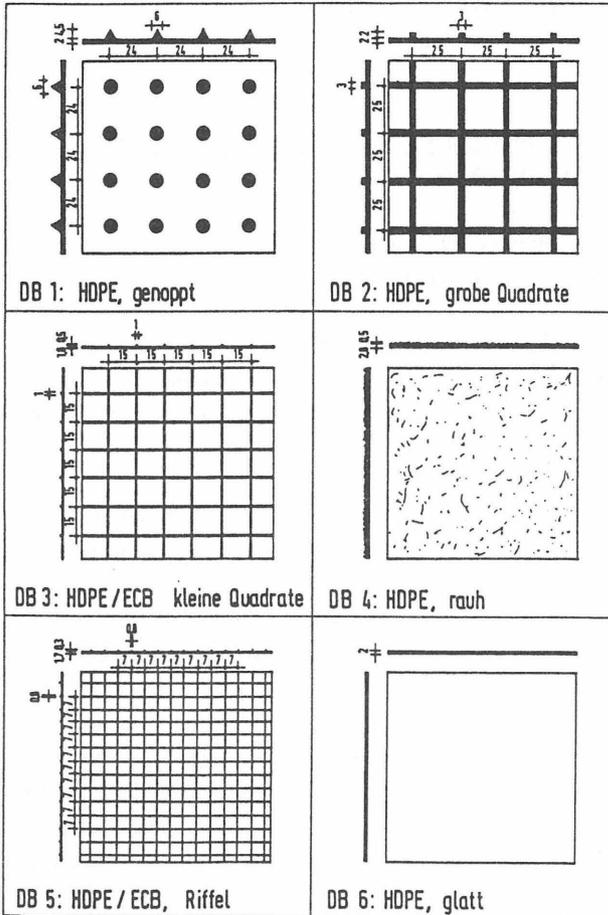


Bild 4: Schematische Darstellung der Oberflächenstrukturen und Abmessungen der Dichtungbahnen DB1 bis DB6

3.1 Versuche mit nichtbindigen Böden

Für die Versuche mit nichtbindigen Böden wurde je ein gleichförmiger Mittel-, Fein- und Grobsand ausgewählt. Die Kornverteilungslinien der mit B1 bis B3 bezeichneten Sande sind Bild 5 zu entnehmen.

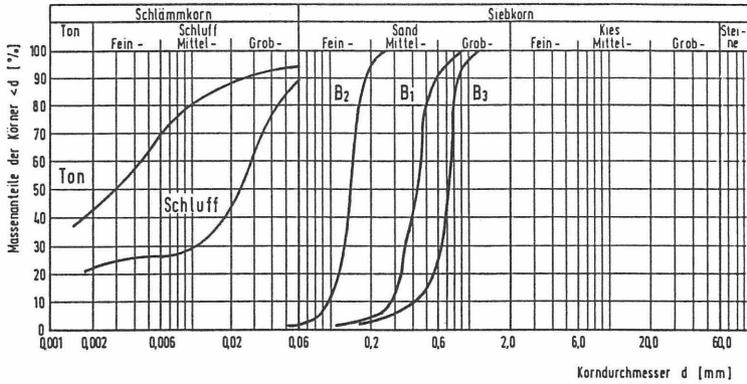


Bild 5: Kornverteilungslinien der verwendeten Sande (B1 bis B3) und der bindigen Böden (Ton und Schluff)

Die Auflasten der Teilversuche im 10 cm x 10 cm Schergerät betragen $\sigma_N = 50, 100$ und 150 kN/m^2 , die Versuchsgeschwindigkeit $v = 1 \text{ mm/min}$. Ermittelt wurde jeweils der Reibungswinkel δ' zwischen Boden und Dichtungsbahn. Zur besseren Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse wurden bezogene Reibungsbeiwerte $\mu_v = \tan \delta' / \tan \varphi'$ angegeben. Die Versuchsergebnisse sind in Bild 6 zusammengestellt.

Versuchsergebnisse						
Boden	B1 Mittelsand		B2 Feinsand		B3 Grobsand	
	δ', φ'	$\mu_v = \frac{\tan \delta'}{\tan \varphi'}$	δ', φ'	$\mu_v = \frac{\tan \delta'}{\tan \varphi'}$	δ', φ'	$\mu_v = \frac{\tan \delta'}{\tan \varphi'}$
	[°]	[-]	[°]	[-]	[°]	[-]
Boden/Boden	44,65	1,00	37,95	1,00	45,57	1,00
Boden/DB 1	43,47	0,96	35,88	0,93	42,30	0,89
Boden/DB 2	45,85	1,04	33,56	0,85	42,89	0,91
Boden/DB 3	40,96	0,88	36,74	0,96	39,18	0,80
Boden/DB 4	40,96	0,88	34,22	0,87	42,30	0,89
Boden/DB 5	33,82	0,68	32,62	0,82	30,75	0,58
Boden/DB 6	32,13	0,64	29,90	0,74	28,37	0,53

Bild 6: Ergebnisse der Scherversuche mit verschiedenen gleichförmigen Sanden und Dichtungsbahnen.

3.2 Versuche mit bindigen Materialien

Die Kornverteilungslinien der untersuchten bindigen Böden Schluff und Ton sind ebenfalls in Bild 5 dargestellt. Zunächst wurde eine Versuchsserie zwischen den Böden und den Dichtungsbahnen DB1 bis DB6 ausgeführt. Der Einbauwassergehalt der untersuchten Böden entsprach dabei annähernd dem optimalen Wassergehalt und dem zugehörigen Verdichtungsgrad von $D_{pr} = 100\%$ (Bild 7).

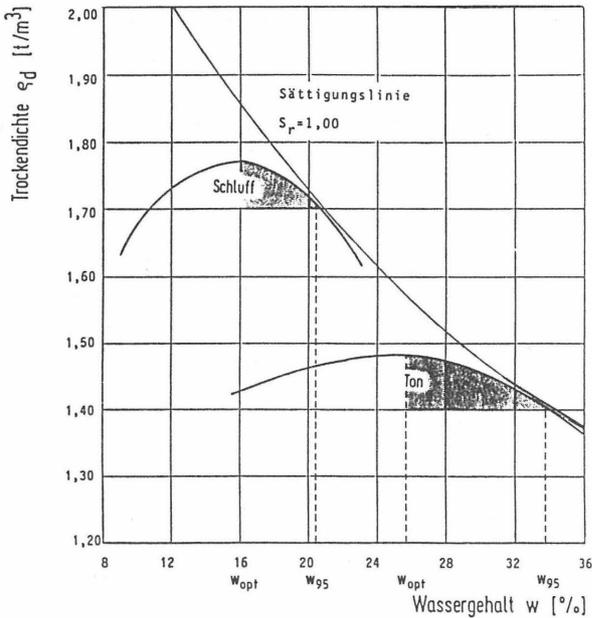


Bild 7: Proctorkurven der untersuchten bindigen Böden

Die Auflasten der einzelnen Teilversuche betragen $\sigma_N = 50, 100$ und 150 kN/m^2 , die Schergeschwindigkeit $v = 0.025 \text{ mm/min}$. Alle Proben wurden vor dem Abscheren ca. 24 Stunden konsolidiert. Anhand von Zeitsetzungslinien wurde ermittelt, daß die Konsolidierungsphase innerhalb dieser Zeit i.a. abgeschlossen war.

In den Bildern 8 und 9 sind die Scherspannungs-/ Normalspannungsdiagramme für die Versuche mit Schluff und Ton dargestellt.

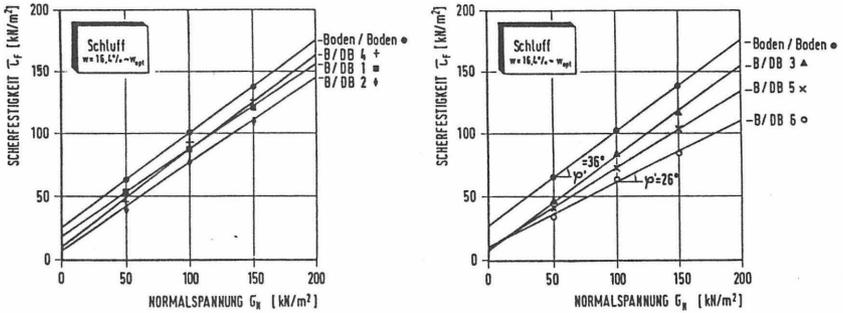


Bild 8: Scherfestigkeits- /Normalspannungsdiagramme für verschiedene Dichtungsbahnen und Schluff

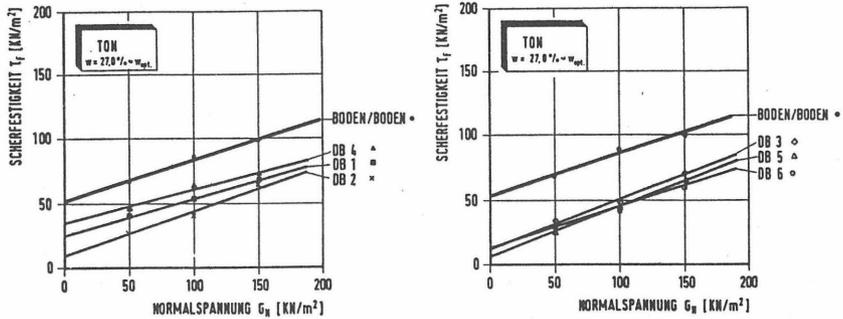


Bild 9: Scherfestigkeits- /Normalspannungsdiagramme für verschiedene Dichtungsbahnen und Ton

Die Versuchsergebnisse sind in den Bildern 10 und 11 zusammengefaßt. Angegeben sind die Verhältnisse μ_V der übertragbaren Scherfestigkeiten bei verschiedenen Auflasten, da sich mit zunehmender Auflast der Anteil der Kohäsion bzw. Adhäsion an der Gesamtscherfestigkeit verringert. Beispielhaft wurden hier die Verhältnisse μ_V bei Auflasten von $G_N = 25$ und 200 kN/m^2 verwendet und dargestellt.

Es gilt:

$$\mu_v = \frac{\sigma_N \cdot \tan \delta' + a'}{\sigma_N \cdot \tan \varphi' + c'}$$

Versuchsergebnisse mit Schluff				
	φ', δ' [°]	c', a' [KN/m ²]	μ_{v25} [-]	μ_{v200} [-]
Boden/Boden	37,5	27,0	1,00	1,00
Boden/DB 1	33,1	19,5	0,77	0,83
Boden/DB 2	34,1	8,2	0,54	0,80
Boden/DB 3	35,7	8,9	0,58	0,87
Boden/DB 4	36,7	11,7	0,66	0,89
Boden/DB 5	31,8	9,7	0,55	0,74
Boden/DB 6	26,0	11,1	0,50	0,60

Bild 10: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse mit Schluff
($w = 16,4 \% \approx w_{opt}$)

Versuchsergebnisse mit Ton				
	φ', δ' [°]	c', a' [KN/m ²]	μ_{v25} [-]	μ_{v200} [-]
Boden/Boden	17,5	55,0	1,00	1,00
Boden/DB 1	15,5	25,0	0,51	0,68
Boden/DB 2	17,5	12,5	0,32	0,64
Boden/DB 3	18,8	12,5	0,33	0,68
Boden/DB 4	14,5	36,0	0,67	0,74
Boden/DB 5	18,5	12,5	0,33	0,67
Boden/DB 6	17,0	8,0	0,25	0,58

Bild 11: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse mit Ton
($w = 27 \% \approx w_{opt}$)

3.2.1 Einfluß des Wassergehaltes

In einer weiteren Versuchsserie wurde der Einfluß des Wassergehaltes auf das Scherverhalten zwischen der glatten Kunststoffdichtungsbahn DB6 und dem Schluff und Ton untersucht. Die gewählten Wassergehalte lagen für den Schluff bei $w = 16.1\%$, 18.1% und 20% ; für den Ton bei $w = 26.1\%$, 29.9% und 32.9% . Dargestellt sind in Bild 12 und 13 jeweils die Scherspannungs- /Normalspannungsdiagramme für die Auflastbereiche zwischen 12.5 und 200 kN/m^2 .

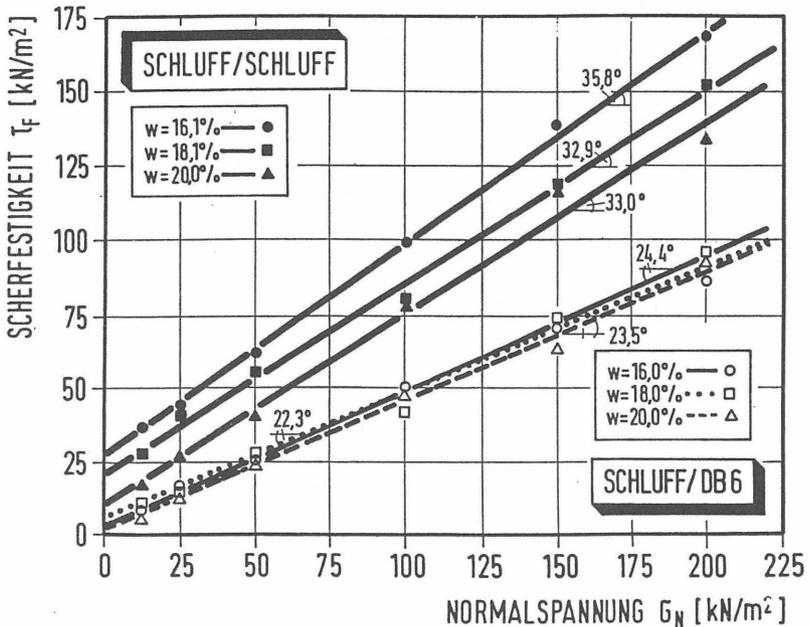


Bild 12: Scherfestigkeiten zwischen Dichtungsbahn DB6 und Schluff bei unterschiedlichen Wassergehalten

Die Veränderungen der Scherparameter mit steigendem Wassergehalt zeigten sich besonders deutlich bei den Versuchen mit Schluff. Die Reibungswinkel zwischen Dichtungsbahn und Boden erreichten nur ca. $2/3$ vom Reibungswinkel des Bodens. Während die Kohäsion des Bodens bei zunehmendem Wassergehalt deutlich abnimmt, geht die Adhäsion zwischen Boden und Dichtungsbahn nahezu vollständig verloren (Bild 14).

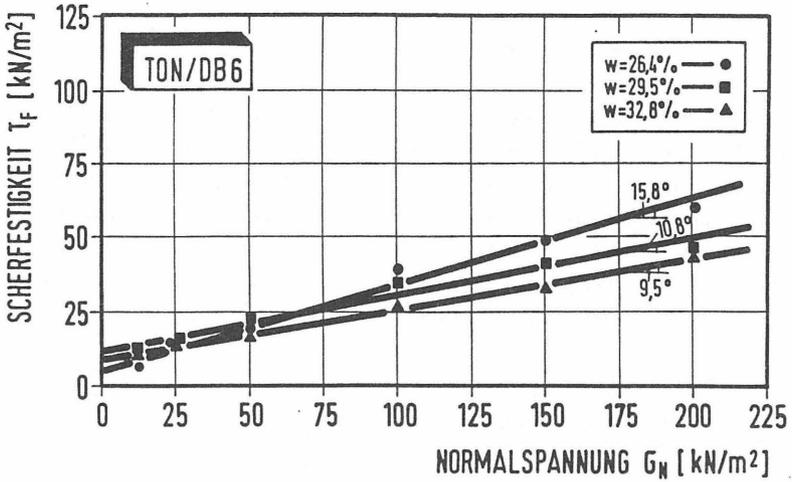


Bild 13: Scherfestigkeiten zwischen glatter Dichtungsbahn DB6 und Ton bei unterschiedlichen Wassergehalten

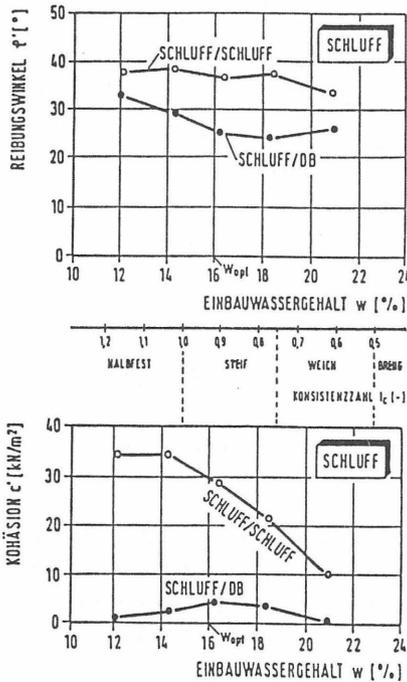


Bild 14: Veränderung der Scherparameter des Schluffs in Abhängigkeit von Wassergehalt und Konsistenz

3.3 Versuche mit Geotextilien

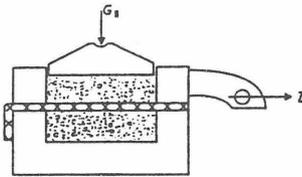
Für die Versuche wurden zwei Geotextilien ausgewählt:

- Geotextil G1: verfestigter Vliesstoff (Polyfelt TS 800)
- Geotextil G2: Gewebe (Stabilenka 400)

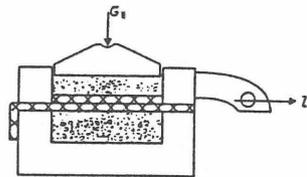
Als Bodenmaterial wurden je ein gleichförmiger Grob- und Mittelsand ausgewählt. Untersucht wurden folgende Versuchsvarianten:

Variante 1 :	Boden / Boden	B / B
Variante 2 :	Boden, Geotextil / Boden	B, G / B
Variante 3 :	Boden, Geotextil / Geotextil, Boden	B, G / G, B
Variante 4 :	Dichtungsbahn / Geotextil, Boden	DB / G, B
Variante 5 :	starrer Untergrund, Geotextil / Boden	G / B

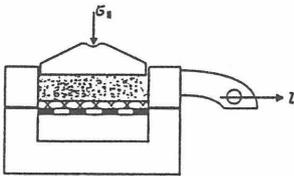
Die Lage der Scherfuge ist jeweils durch einen " / " gekennzeichnet. Bild 15 stellt die Versuchsvarianten 2 bis 4 schematisch dar (aus Gründen der Anschaulichkeit sind die Zeichnungen nicht maßstabsgerecht).



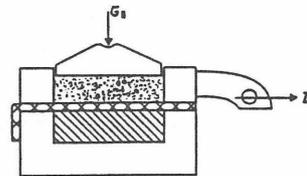
Variante 2:
Boden / Geotextil, Boden



Variante 3:
Boden, Geot. / Geot., Boden



Variante 4:
Dichtungsbahn / Geot., Boden



Variante 5:
Geotextil / Boden

Bild 15: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten

In Bild 16 sind die Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramme für die Versuche mit Grobsand und den Geotextilien G1 und G2 dargestellt.

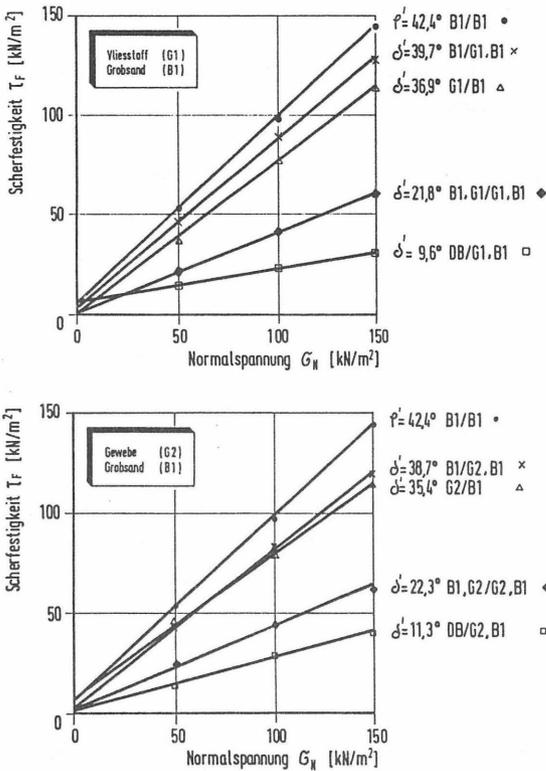


Bild 16: Scherfestigkeits- / Normalspannungsdiagramme der Versuche mit Grobsand B1 und den Geotextilien G1 und G2

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß zwischen den Geotextilien und der glatten Dichtungsbahn die geringsten Reibungskräfte übertragbar sind. Bei den Versuchsvarianten 2 und 5, bei denen die Scherfuge zwischen Geotextil und Boden liegt, werden zwischen 70 und 80 % der Scherfestigkeit des Bodens erreicht. Zur besseren Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse wurden die bezogenen Reibungsbeiwerte errechnet:

$$\mu_v = \tan \delta' / \tan \rho' \quad (\text{Bild 17}).$$

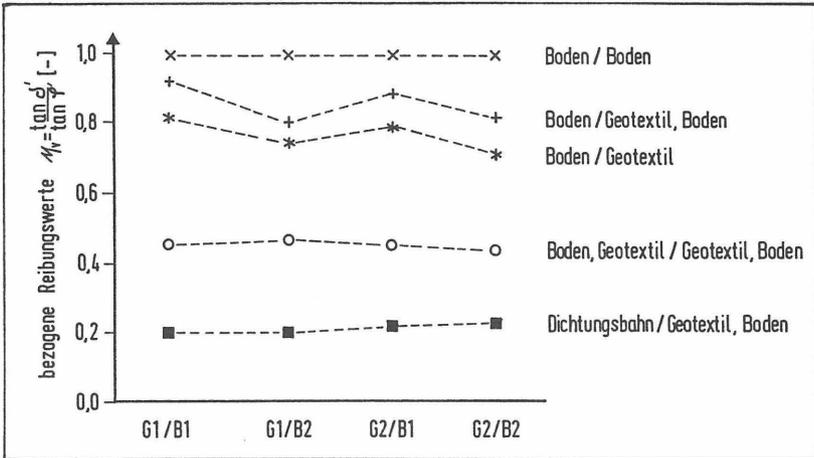


Bild 17: Graphische Darstellung der bezogenen Reibungsbeiwerte μ_v

4. Empfehlungen für den Ansatz von Scherparametern zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und Böden

Aus den umfangreichen Untersuchungen lassen sich unter Berücksichtigung der erreichbaren Versuchsgenauigkeiten folgende Empfehlungen für anzusetzende Scherparameter zwischen Dichtungsbahnen und verschiedenen Materialien angeben (Bild 18 bis 20).

Dichtungsbahn	Boden		
	Sand		Kies
Profilhöhen	Ungleichförmigkeit U		
	U < 3	U > 3	
glatt	0,50 ρ'	0,60 ρ'	0,50 ρ'
0,5 - 1,0mm	0,60 ρ'	0,75 ρ'	0,70 ρ'
1,0 - 2,0mm	0,85 ρ'	0,95 ρ'	0,90 ρ'

Bild 18: Empfehlungen für Reibungswinkel zwischen nichtbindigen Böden und Dichtungsbahnen

Empfehlungen für Reibungswinkel δ' und Adhäsion zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und bindigen Böden für verschiedene Proctorwassergehalte				
Wassergehalt	Ton		Schluff	
	δ' [°]	a' [kN/m ²]	δ' [°]	a' [kN/m ²]
W_{opt}	$0,9 \rho'$	$0,3 c'$	$0,65 \rho'$	$0,15 c'$
W_{97}	$0,8 \rho'$	$0,2 c'$	$0,65 \rho'$	0
W_{95}	$0,7 \rho'$	$0,2 c'$	$0,65 \rho'$	0
mit ρ' und c' bei optimalem Wassergehalt				

Bild 19: Empfehlungen für Reibungswinkel und Adhäsion zwischen bindigen Böden und Dichtungsbahnen

Reibungswinkel zwischen Geotextilien und glatten HDPE - Dichtungsbahnen		
Verwendetes Geotextil	δ' [°]	$\tan \delta'$ [-]
Fibertex 600	8	0,14
Fibertex 300	10	0,18
Typar 3401	11	0,19
Polyfilter X	6	0,11
NW-Geotextile	9	0,16
Trevira 2125	10	0,18
Trevira 1135	12	0,21
Mirafi 500 S	10	0,18
Miradrain	6	0,11
Enkadrain	9	0,16
Geolon	9	0,16
Tensar DN 3 W	15	0,27
J-DRAIN 100	11	0,19

Bild 20: Reibungswinkel zwischen glatten Dichtungsbahnen und verschiedenen Geotextilien (Williams 1986 [2])

5. Literatur

- [1] Balthaus/Meseck Geomechanisches Verhalten von Kunststoff-
dichtungsbahnen, Bautechnik 64, 1986, S. 58-63
- [2] Williams Bestimmung von Reibungswinkeln zwischen Geo-
tilien, Geomembranen und verwandten Produkten,
III. Int. Conf. Geotextiles Vienna, Austria,
1986
- [3] Kruse Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen
auf Deponieböschungen, Mitteilung des Inst.
für Grundbau und Bodenmechanik,
TU Braunschweig, Heft 29, 1989

Anschrift der Verfasser:

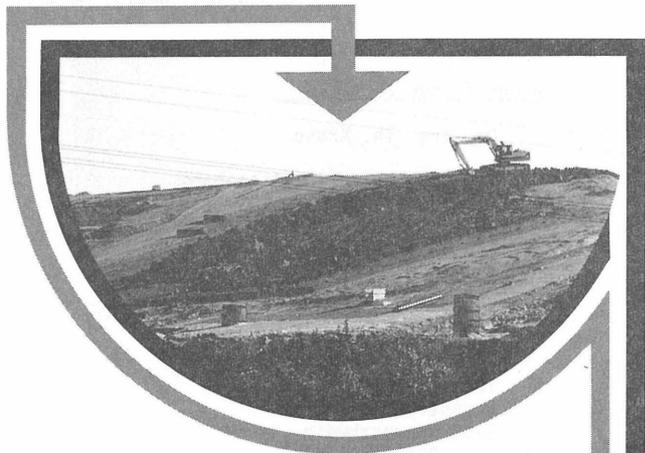
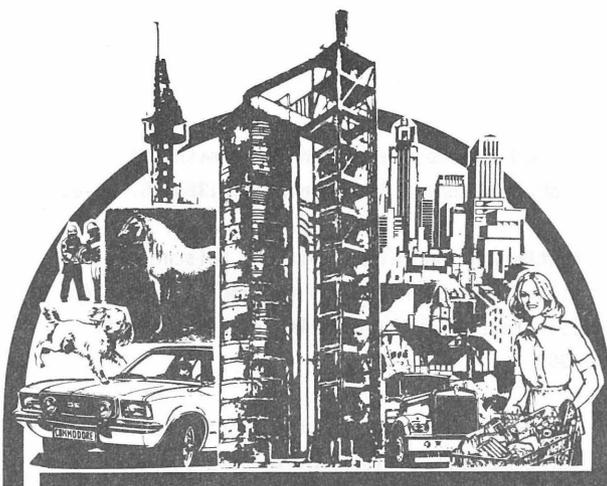
Dr.-Ing. Th. Kruse

Erdbaulaboratorium Ahlenberg
Am Ossenbrink 40
5804 Herdecke / Ruhr
Tel. 02330/ 8009-0
Fax. 02330/ 8112

Dipl.-Ing. Th. Voigt

IGB TU BS
Gaußstr.2
3300 Braunschweig
Tel. 0531/ 391 2730
Fax 0531/ 391 4574

Entsorgung wird gelernt sein



Umwelt und Grundwasser wurden für uns zu den wichtigsten Faktoren einer menschenwürdigen Lebensqualität. Entsorgung ist daher eine der verantwortungsvollsten Aufgaben unserer Zeit.

Das in Jahrzehnten gewachsene Erfahrungspotential der Frank Deponie-Technik GmbH entwickelte sich aus gelungenen Problemlösungen mit PEHD zur Sicherung und Entsorgung von Deponien und einer führenden Rohrleitungstechnik mit allen Formteilen, Verbindungselementen, Armaturen und vorgefertigten Schachtsystemen. Dabei gelten die hohen Erfahrungswerte gleichermaßen für Abdichten, Entwässern und Entgasen.

Heute ist Frank Deponie-Technik GmbH der Partner für Behörden, Ingenieurbüros und bauausführende Firmen, wenn es um Grundwasserschutz und um die Sicherung und Entsorgung von Deponien geht.

**FRANK DEPONIE
TECHNIK**
GMBH

BELLERSHEIMER STR. 39 · 6303 HUNGEN 7 · TEL. 064 02/7027 · FAX 064 02/7519 · TELETEX 64 02912

ABDICHTUNGEN VON STEILHÄNGEN

Dipl.-Ing. H. Möller, Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Niederlassung Hannover

1. Einleitung:

Die derzeit produzierten Abfallmengen, sei es Hausmüll, Industriemüll oder Reststoffprodukte aus Abfallverbrennungsanlagen, haben dazu geführt, daß der zur Verfügung stehende Deponieraum immer knapper wird. Trotz hoher Auflagen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit, wird die Akzeptanz von AbfalldPONien und Müllverbrennungsanlagen in unserer Gesellschaft immer schwieriger.

Da aber bereits in einigen Bundesländern der Müll-Notstand droht, gewinnt die Nutzung offengelassener Steinbrüche als Deponieraum in Zukunft immer mehr an Bedeutung. Hierbei muß das Problem gelöst werden, daß an den steilen und unregelmäßigen Wänden der Steinbrüche eine seitliche Deponieabdichtung sicher anzubringen ist.

Im Mai 1987 wurde die Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft und das Planungsbüro GWK Ingenieure mit einer Projektstudie zur Abdichtung von Felswänden für eine Asche- deponie der Müllverbrennungsanlage Wuppertal GmbH beauftragt. Hierbei hat Bilfinger + Berger ein Fertigteilssystem entwickelt und zum Gebrauchsmuster und zum Patent angemeldet. Beide sind mittlerweile erteilt. Für dieses Fertigteilssystem hat die Müllverbrennungsanlage Wuppertal GmbH auf ihrem Gelände den Platz für die Herstellung einer Demonstrationswand zur Verfügung gestellt.

2. Beschreibung des Dichtungssystems für steilgeneigte Felswände

Eine Steinbruchauskleidung hat sowohl abdichtende wie auch statische Funktionen zu übernehmen. Beide Aufgaben werden unterschiedlichen Bauelementen zugewiesen. Eine 5 mm dicke HDPE-Kunststoffdichtungsplatte (Polyethylen hoher Dichte) übernimmt die Dichtungsaufgabe. Die Kräfte aus dem Deponat werden von einer 19,5 cm dicken bewehrten Stahlbetonfertigteilplatte übernommen und über ein Schotterpaket an die Felsoberfläche bzw. in vertikaler Richtung über Horizontal- fugen an die darunterliegende Fertigteilplatte abgegeben. Die Wandelemente geben die Lasten an ein Streifenfundament oder einen Ringstollen aus bewehrtem Beton an der Steinbruchsohle ab.

Als Dichtung wird eine Noppenplatte in die Schalung der Fertigteilplatte eingelegt. Durch die einbetonierten pilzförmigen Noppen entsteht ein ausgeprägter Verbund zwischen Dichtungsplatte und Stahlbetonplatte.

Jede Fertigteilplatte wird in ihrer Lage mit zwei zug- und druckfesten, raumbeweglichen Richtstreben, die die Platten mit vorab gebohrten Felsankern verbinden, gesichert. Abweichungen von der Ideallinie von +/- 10 bis 30 cm können ausgeglichen werden.

Die unteren Plattenlängsränder besitzen auf ganze Länge eine konkave Ausrundung. Diese bildet zusammen mit dem konvex-abgerundeten oberen Längsrand der darunterliegenden Platte ein gelenkiges Auflager, welches Winkelabweichungen von +/- 15 Grad aufnimmt. Zur Aufnahme der an den waagerechten Plattenfugen entstehenden Querkräfte (bei Richtungsänderungen der Wandoberfläche) dienen einbetonierte Stahldollen, die ihrerseits in mörtelgefüllte Aussparungstaschen der darunterliegenden Platten einbinden.

In vertikaler Richtung werden die Fertigteilplatten aus schalungstechnischen Gründen durch stumpfe Stoßfugen begrenzt, denn diese werden je nach Ergebnis der vorangegangenen Felsprofilaufnahme in 2 Achsen rechtwinklig oder unterschiedlich schräg ausgebildet. Die Konstruktion der Platten nach Form und Größe kann mittels CAD + Plotter weitgehend automatisiert werden und optimal der Steinbruchwand folgen.

3. Wandherstellung

Die rund 72 m² große Demonstrationswand wurde in dem stillgelegten Steinbruch 'Korzert' in Wuppertal-Küllenhahn errichtet. Das Steinbruchgelände liegt in der Nähe der bestehenden Müllverbrennungsanlage.

Vor Beginn der Bauarbeiten wurden größere und lose an der Wand hängende Felsbrocken abgeräumt. Die Felsoberfläche oberhalb der Demonstrationswand wurde anschließend mit einem kunststoffummantelten Maschendraht gegen Steinfall gesichert.

Für die genaue Festlegung der Plattengröße und Plattenrandausbildung erfolgte anschließend die vermessungstechnische Aufnahme der geräumten Felsoberfläche. Aufgrund dieser Daten wurden die Seitenränder der Platten zeichnerisch festgelegt. Sie erhielten teils Rechteck-, teils Trapezformen, wobei die obere und untere Längsseite parallel zueinander und horizontal liegen müssen. Mit der Festlegung der Plattenabmessung sind auch die Ankerpunkte vorgegeben.

Die Ankerbohrungen wurden mit einem Bohrwagen hergestellt, wie er auch im Tunnelbau Verwendung findet. Die Bohrungen waren ca. 2 m tief bei einem Durchmesser von $d = 45$ mm. Die Verpressung der Felsanker ($d = 29$ mm) erfolgte mit einem 2-Komponenten-Harz oder mit einer Zementsuspension. Nach Herstellung der Felsanker erfolgt die Betonage der Fundamente.

Die Fertigteile hatten die Abmessungen 0,2 x 2,0 x 4,0 m. Das Plattengewicht betrug ca. 4 to. Alle Platten wurden im B+B-Fertigteilwerk Kerpen aus B 35 hergetellt. Die Platten wurden liegend betoniert, wobei - wie bereits angesprochen - die Noppenplatten aus Kunststoff in die Schalung eingelegt wurden. Bei der Herstellung ist darauf zu achten, daß die Noppenplatten (Firma GFA-Special Plastic Linings GmbH, Hamburg) ca. 50 mm ringsherum kleiner sind als das Fertigteilmaß der Betonplatte. Dieses hat den Vorteil, daß beim Transport und beim Einbau sich an den Rändern die Kunststoffplatten nicht vom Beton ablösen bzw. beschädigt werden.

Die Fertigteilplatten wurden aufrechtstehend per Sattelzug vom Fertigteilwerk zur Baustelle transportiert und dort mit einem Autokran aufgestellt. Das Ausrichten der Fertigteile erfolgte mittels Ausgleichspindeln. Der Abstand zwischen Betonplatte und Steinbruchwand betrug ca. 80 cm.

Nach Montage jeder Plattenreihe erfolgte die Hinterfüllung. Hierzu benutzte man bei der ersten Plattenreihe einen Radlader, bei der 2. und 3. Reihe einen 750 l Betonierkübel. Das Hinterfüllungsmaterial bestand aus Schotter 8/16. Er wurde nicht verdichtet. Die zur Sicherheit mit eingebauten Kantholzabstützungen an der Rückseite der Platten verblieben im Zwischenraum.

Für den späteren Nachweis der Funktionsfähigkeit der Drainschicht (Schotterhinterfüllung) war ein Bewässerungssystem einzubauen. Dieses bestand aus horizontal und vertikal verlaufenden Verteilerleitungen, $d = 50 - 65$ mm. Die Verteilerrohre waren längs geschlitzt. Es zeigte sich, daß der eingebaute Kalkschotter die eingespeisten Wassermengen so schnell und ohne Rückstau aufnahm und ableitete, daß weitere Versuche überflüssig waren.

Nach Ausmörteln der senkrechten und waagerechten Fugen zwischen den montierten Fertigteilen, wurden 25 cm breite und 5 mm starke HDPE-Streifen ohne Noppen zum Abdecken der Fugen auf die HDPE-Oberfläche der Fertigteilplatten geschweißt. Hierbei wurden Extrusionsnähte mit einem Schweißgerät hergestellt, welches Kunststoff-Granulat erhitzt und als weichplastisches Extrusionsgut auspreßt. Mit einer Zusatzvorrichtung wird parallel dazu die Oberfläche der zu verschweißenden Bahnen durch Heißluft aufgeheizt. Wegen der Dicke von 5 mm ließen sich Doppelschweißnähte mit Prüfkanal nicht ausführen. Dieses ist nur bei 3 - 4 mm starken HDPE-Streifen möglich. Zur Kontrolle der Schweißnähte bietet sich daher die Kontrolle mit dem Funkeninduktor oder der Vakuumsaugglocke an. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, daß alle 200 m² ein Nippel auf die HDPE-Bahn aufgebracht wird, über den dann zwischen Abdichtungsbahn und Betonteil ein Druck von 0,5 bar erzeugt wird. Läßt sich dann über einen gewissen Zeitraum dieser Druck konstant halten, so ist das der Nachweis, daß die Schweißnähte ordnungsgemäß hergestellt worden sind.

4. Variante mit kontrollierbarer Doppelabdichtung

Alternativ zu der beschriebenen Auskleidung der Steinbruchwand kann diese so ausgerüstet werden, daß eine doppelte Kunststoffabdichtung mit dazwischenliegender Kontrolldrainerschicht entsteht. Hierbei wird eine 2,5 mm dicke HDPE-Kunststoffdichtungsbahn mit einseitig ausgebildeten Noppen von 2,5 mm Höhe zum Fertigteil hin ausgerichtet angebracht. Die Längsränder werden dann auf ganzer Höhe mit der Kunststoffoberfläche der Fertigteile verschweißt.

Als Variante kann diese Art der Doppelabdichtung auch mit einer glatten HDPE-Kunststoffdichtungsbahn ausgeführt werden. Zusätzlich bildet ein zwischen den Dichtungsbahnen liegendes Geotextil von ca. 500 g/m² Gewicht die Drainageschicht.

Bei der Anwendung der doppelten Abdichtung kann in die Fertigteile statt der 5 mm dicken Folie eine 2,5 mm dicke Folie einbetoniert werden.

5. Bemessungsansätze und statische Untersuchungen

Für die Bemessung der Platten wurden die beiden Zustände ohne Müllverfüllung und mit Verfüllung untersucht. Für den Zustand ohne Müllverfüllung ging man davon aus, daß:

- die Wandkrone sich 10 m über Arbeitsplanum befindet
- das Hinterfüllgut zwischen Felloberfläche und Wandrückseite aus Schotter mit den Kennwerten $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,
 $\varphi = 35^\circ$, $\delta = 12^\circ$, bestand.

- Maximale Winkelabweichung der Platten untereinander
+/- 15 Grad nicht über- oder unterschreiten

Für den Zustand mit Müllverfüllung wurde angesetzt:

- Wandkrone 10 m über Arbeitsplanum
- Wandfuß 10 m unter Arbeitsplanum
- Hinterfüllgut wie oben
- Maximale Winkelabweichung wie oben
- Deponiegut mit den Kennwerten $\gamma^* = 18 \text{ kN/m}^3$,
 $\varphi = 25^\circ - 30^\circ$, $\delta = 8^\circ - 12^\circ$

Es war die Frage zu klären, welche Belastungen und daraus resultierenden Bewegungen eine extrem hohe Fertigteilwand aushalten kann, nachdem sie mit Deponat verfüllt ist. Hierbei sollte die mit diesem System max. erreichbare Höhe ermittelt werden. Es wurden die kritischen Punkte, wie Aufnahme der Umlenkkräfte an den Knickpunkten und die Wandverformungen an den Knickpunkten untersucht. Die Vorgabe ging von einer 70 m hohen Wand und einer max. Verfüllhöhe des Deponiegutes von 60 m aus.

Als statisches Ersatzsystem wurde eine Gelenkkette, die am Fels federnd gehalten ist, gewählt.

Die statische Untersuchung kam zu dem Ergebnis, daß die auftretenden Beanspruchungen von der Wand schadlos aufgenommen werden können. Als Grenzbelastung ergab sich eine max. Druckkraft von 2.000 kN/m in den Betonfertigteilen bei einer Stärke von 20 cm.

Durch eine Verstärkung der Fertigteilplatten im unteren Verfüllbereich sind aber auch größere Verfüllhöhen zu erreichen.

Unter der Voraussetzung, daß die Spaltbreite zwischen Fels und Fertigteil zwischen 30 - 100 cm liegt, und daß der Fels als nicht zusammendrückbar angenommen wird, ergeben sich Verformungsunterschiede von ≤ 1 cm und Verdrehungsunterschiede $\leq \pm 0,5$ Grad. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine gleichmäßige, dichte Hinterfüllung der Elementwand. Dieses kann bei Verwendung von gebrochenem Material, welches einfach geschüttet ist, vorausgesetzt werden.

Bei schlechter Verdichtung des Zwischenraumes Fels - Deponiewand (bei Verwendung von schlecht verdichtetem Sand oder Kiessand) können diese Werte jedoch um den Faktor 10 ansteigen. Der Einfluß auf die Wandbelastung ist jedoch gering.

6. Zusammenfassung

Bei der Abdichtung von Steilwänden sind grundsätzlich zwei Probleme zu lösen:

1. Herstellung einer glatten Fläche zur Aufnahme der Deponiedichtungsbahn
2. Ableitung von Kluft- und Oberflächenwasser zwischen der Felsoberfläche und dem Träger der Dichtungsbahn.

Die gesammelten Erfahrungen beim Bau der Demonstrationswand in Wuppertal können wie folgt zusammengefaßt werden:

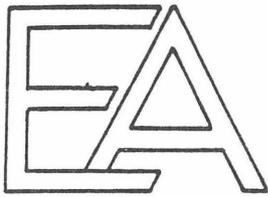
1. Als Träger für eine Kunststoffdichtungsbahn und gleichzeitig als vorübergehende Schalung für die Drainageschicht bieten sich Betonfertigteile an.
2. Die Kunststoffdichtungsbahn kann werksseitig mit dem Fertigteil verbunden werden. Dieses geschieht über pilzförmige Noppen, die in das Fertigteil einbetoniert werden.
3. Die Konstruktion der Fertigteilplatten erfordert eine exakte Geländeaufnahme, damit das Felsprofil aufgetragen werden kann. Die Konstruktion der Platten nach Form und Größe kann mittels CAD + Plotter weitgehend automatisiert werden. Damit kann der Zwischenraum zwischen Fels und Fertigteil möglichst klein gehalten werden, so daß für die Drainage und Ausgleichsschicht möglichst wenig Deponieraum geopfert werden muß.
4. Als Kunststoffdichtungsbahn kann eine HDPE-Platte von 2 - 5 mm Stärke verwendet werden, die auf der Rückseite mit pilzförmigen Noppen versehen ist.
5. Eine doppelte kontrollierbare Abdichtung ist möglich.
6. Die Basis für alle Wandelemente bildet ein bewehrtes Streifenfundament oder ein begehbare Ringstollen in Höhe der Steinbruchsohle, an welches die Basisabdichtung angeschlossen werden kann.

Wie das Beispiel der Demonstrationswand zeigt, ist die Abdichtung von Steilhängen technisch möglich. Die Kosten (Preisstand 1988) von 700 - 800 DM/m² Steilhangabdichtung sind meiner Meinung nach unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Bereitstellung von Deponievolumen immer schwieriger wird, wirtschaftlich vertretbar. Dabei wird sich die Größe der auszukleidenden Wandflächen positiv auf den vorgenannten Preis/m² auswirken.

Es bleibt abschließend noch zu erwähnen, daß das System der Demonstrationswand beim Deponiebetreiber, der Müllverbrennungsanlage Wuppertal GmbH, sowie beim Regierungspräsidium Düsseldorf als Genehmigungsbehörde, Zustimmung fand. Zur Zeit läuft ein Planfeststellungsverfahren das zum Inhalt hat, den ehemaligen Steinbruch neben der Müllverbrennungsanlage komplett mit einem Steilhangauskleidungssystem abzudichten.

Anschrift: Dipl.-Ing. Harald Möller
Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft
Marienstraße 45/47
3000 Hannover 1

ERDBAULABORATORIUM



HERDECKE

AHLENBERG

Dr. Ing. H.G. Dillo

Dipl. Ing. H. Dannemann

Dipl. Ing. V. Wiese

Beratende Ingenieure VBI

Bodenmechanik - Grundbau

Geologie - Hydrologie

Gründungsberatung

Deponietechnik

Altlastuntersuchung

Altlastsanierung

Planung - Ausschreibung

Projektüberwachung

Am Ossenbrink 40 - 5804 Herdecke

Tel.: 02330 / 8009 - 0 - Telefax 02330 / 8112

Scherparameter von Hausmüll und Klärschlamm

G.C.W. Gay, FMPA Stuttgart

Die Scherfestigkeit eines Materials ist für die Standsicherheit von Böschungen aus diesem Material der wichtigste Parameter, und sie bestimmt die möglichen Höhen und Neigungen der Böschungen. Im Falle von Hausmülldeponien ist das wesentlichste "Baumaterial" Hausmüll und in zunehmendem Maße in letzter Zeit kommunaler Klärschlamm. Im folgenden sollen Laborversuche zur Bestimmung der Scherfestigkeiten an den beiden Materialien, wie sie an der FMPA in Stuttgart ausgeführt werden, zusammen mit einigen Ergebnissen vorgestellt werden.

1. Scherfestigkeit von Hausmüll

Bei der Bestimmung der Scherfestigkeit eines Materials ist die Größe der Scherfuge von der die Größe der Größtkörner bzw. -aggregate des zu untersuchenden Materials abhängig. Als bisher praktischste Versuchsmethode für die Bestimmung der Scherfestigkeit von Hausmüll hat sich der sogenannte Rahmenscherversuch herausgestellt. Das von uns gebaute und verwendete Gerät hat aus oben genannten Gründen eine Scherfläche von 2 m x 1 m. Die Anfangshöhe der Probe beträgt 1 m.

Eine schematische Darstellung der Geräts ist in Abb. 1 wiedergegeben.

Bei dem Versuch wird über die Lastverteilungsplatte eine Normalkraft zuerst auf die Probe aufgebracht. Dieser Normalkraft entspricht das Gewicht darüberliegender Müllmenngen in der Deponie. In dieser Form kann der Scherkasten auch dazu verwendet werden, die Zusammendrückbarkeit von Hausmüll und somit die Parameter für die Berechnung des Setzungsverhaltens einer Hausmülldeponie zu bestimmen.

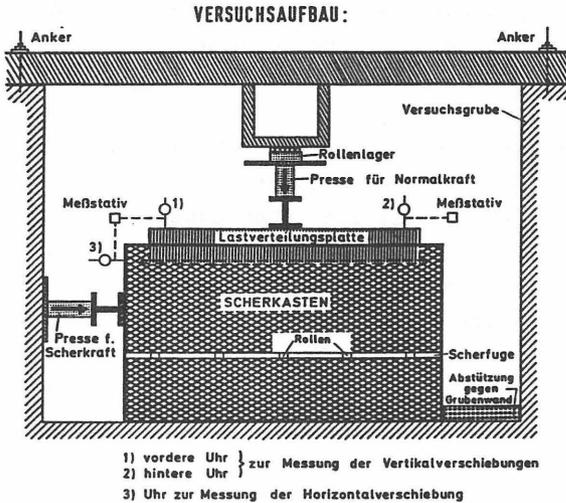


Abb. 1 Großvolumiger Scherkasten der FMPA Stuttgart
Konstruktionsprinzip

Die hiermit errechneten Setzungen sind Setzungen infolge von Spannungsänderungen und berücksichtigen Setzungen infolge biochemischer Änderungen nicht.

Wenn die Vertikalverformungen unter der Vertikallast abgeklungen sind, wird mit Hilfe von Horizontalpressen die obere Hälfte des Scherkastens gegen die untere Hälfte entlang einer vorgegebenen Scherfuge verschoben. Dabei wird die Normalkraft konstant gehalten. Diese vorgegebene Scherfuge ist aus Konstruktionsgründen in der Regel parallel zur Scherkraft.

Diese vorgegebene oder erzwungene Gleitfuge kann für manche Materialien von Nachteil sein. Im Fall von Hausmüll aber fällt sie ungefähr mit der Orientierung der Aggregate zusammen, welche die schwächste Scherfuge im Hausmüll sein wird.

Die horizontale Scherkraft wird so lange gesteigert, bis ein Maximum erreicht wird. Noch ein Vorteil des Geräts ist, daß es möglich ist, lange Scherwege durchzuführen, welche oft bei Hausmüllproben notwendig sind, um sogenannte Restfestigkeiten zu bestimmen. Die ermittelte Scherfestigkeit ist die Scherfestigkeit unter der verwendeten Normalkraft.

Um die Scherparameter des Hausmülls zu bestimmen, ist es notwendig, den Versuch unter unterschiedlichen Normalkräften zu wiederholen. In der Regel werden drei verschiedene Auflasten verwendet, die die zu erwartenden Auflasten im Endzustand der Deponie umfassen. Aus diesen drei Versuchen ist es nun möglich, die Scherparameter mit Hilfe der Gleichung

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1.1)$$

zu errechnen. Hierin bedeuten

τ = Scherfestigkeit

c = Kohäsion (spannungsunabhängige Komponente)

ϕ = Reibungswinkel (spannungsabhängige Komponente)

σ = Normalspannung in der Scherfuge

In der Regel erfolgt die Ermittlung der Scherparameter mit Hilfe von graphischen Methoden. Dabei wird, wie aus den nachfolgenden Abbildungen erkennbar ist, die Scherkraft gegen die Normalkraft in einem Diagramm aufgetragen und die Punkte miteinander verbunden. Die Neigung der Linien entspricht dem Reibungswinkel des Materials und der Abschnitt an der Scherkraftachse der Kohäsion.

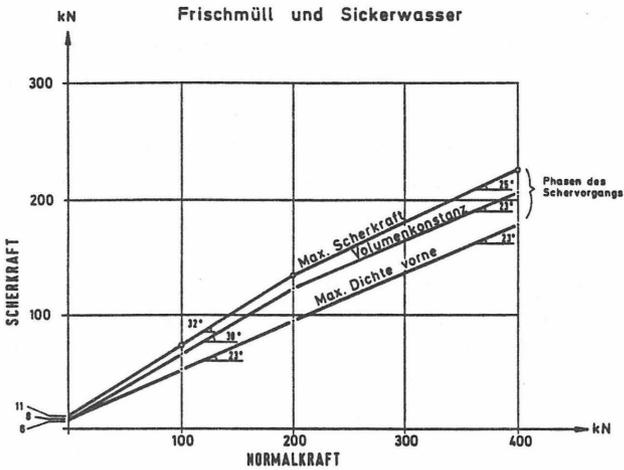


Abb. 2: Scherfestigkeit eines frischen, durchfeuchteten Hausmülls; Messung der FMPA Stuttgart

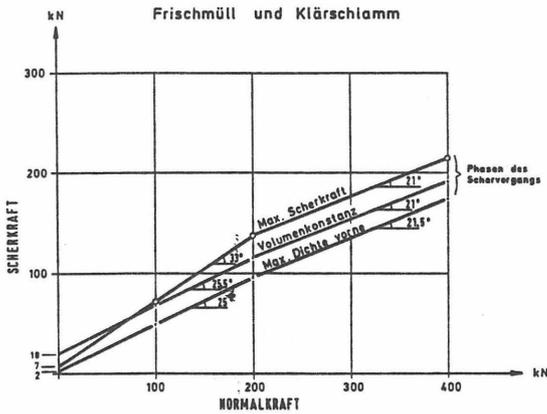


Abb. 3: Scherfestigkeit eines frischen Müll-Klärschlamm-Gemisches; Massenverhältnis Müll:Schlamm = 2:1, Schlammwassergehalt 70 Gew.-%; Messung der FMPA Stuttgart

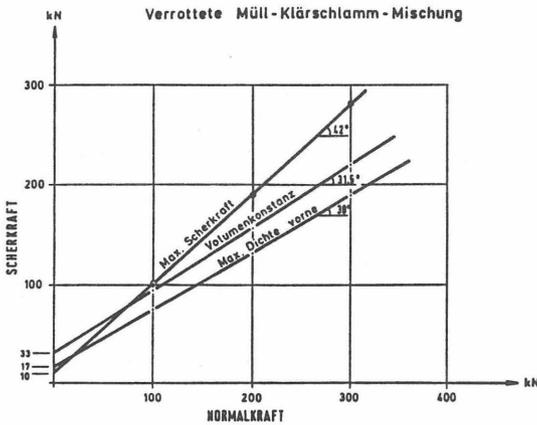


Abb. 4: Scherfestigkeit eines durchgerotteten Müll-Klärschlamm-Gemisches; Messung der FMPA Stuttgart

Betrachtet man die in den drei Diagrammen dargestellten Schergeraden für maximale Scherkräfte, so ist zu erkennen, daß bei den höheren Normalkräften der Scherwinkel des frischen Mülls mit Klärschlamm gegenüber demjenigen des frischen Mülls ohne Klärschlamm abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß infolge der Verdichtung durch die Normalkraft die Poren im Hausmüll zunehmend mit Klärschlamm "gesättigt" werden, und der Klärschlamm die Reibung zwischen den Müllkörnern herabsetzt. Dies wird sich auf die Standsicherheit direkt negativ auswirken. Ferner wird der Hausmüll, da die Poren voll mit Schlamm sind, undurchlässig, was einen Wasserstau verursachen kann, der auch die Standsicherheit negativ beeinflussen wird.

Ein weiterer negativer Einfluß der Undurchlässigkeit wird im Bereich der Gasgewinnung zu erwarten sein.

Beim "verrotteten" Hausmüll ist eine deutliche Zunahme der Reibungswinkel gegenüber den beiden Frischmüllproben zu verzeichnen. In diesem Fall wurde der Rottevorgang durch spezielle Behandlungen beschleunigt gegenüber dem Rotte-

vorgang in "normalen" Hausmülldeponien. Es wird daher empfohlen, die Scherparameter des frischen Hausmülls für die Standsicherheitsberechnungen zu verwenden, da bis zur Fertigstellung der Deponie der Rottevorgang darin nicht den Grad der Rotte wie in oben genannten Versuchen erreichen wird.

Ein Problemfeld, das auch noch angesprochen werden muß in bezug auf die Scherfestigkeit von Hausmüll, ist die Veränderung der Zusammensetzung des Hausmülls. Anfang der 70er Jahre wurden durch Versuche von uns an dem damaligen Hausmüll folgende Scherparameter festgestellt:

Reibungswinkel	38 °
Kohäsion	7 kN/m ²

Zu dieser Zeit wurde alles weggeworfen. Bei den oben genannten Versuchen wurde ein Hausmüll untersucht, bei dem ein großer Teil der anorganischen Teile (Glas, Metall) entfernt worden ist. Bei diesem Hausmüll ist eine deutliche Abnahme des Reibungswinkels erkennbar. Infolge der zunehmenden Aussortierung von Wertstoffen wie Glas, Metall, Papier usw. ist zu erwarten, daß nicht nur eine Reduzierung der Müllmenge erzielt wird, sondern auch eine Reduzierung der Scherfestigkeit, was bei Standsicherheitsberechnungen berücksichtigt werden muß.

2. Scherfestigkeit von Klärschlamm

Die zweite Komponente der Deponien ist, wie vorher erwähnt, kommunaler Klärschlamm. Aus den oben genannten Gründen und aus betrieblichen Gründen ist eine Vermischung des Klärschlammes mit dem Hausmüll nicht mehr Stand der Technik. Vielmehr wird Klärschlamm in Mieten bzw. in Monoecken innerhalb der Hausmülldeponie eingebaut.

Der teils entwässerte Schlamm wird, bedingt durch die Deponieform, Scherspannungen ausgesetzt. Werden diese Span-

nungen größer als die Scherfestigkeit, kann es zu Rutschbewegungen kommen.

Da Klärschlamm feinkörnig ist, können die Versuche und Auswertungen, die in der einschlägigen bodenmechanischen Literatur beschrieben sind, verwendet werden.

Die Scherfestigkeit von bindigen Materialien wird üblicherweise in zwei Komponenten unterteilt: Ein Teil ist spannungsabhängig und wird durch den sogenannten Scherwinkel charakterisiert, der zweite Teil ist spannungsunabhängig und wird als Kohäsion bezeichnet. Die Scherfestigkeit wird als Summe dieser beiden Komponenten definiert:

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (2.1)$$

Hierin bedeuten

- τ Scherfestigkeit
- c' Kohäsion
- ϕ' Scherwinkel
- σ Spannungen, normal zur Bruchfläche
- u Porenwasserdruck

Die Kohäsion ist nach den bisherigen Erkenntnissen in starkem Maße vom Wassergehalt und der Kornzusammensetzung abhängig. Mit abnehmendem Wassergehalt und zunehmendem Feinkorngehalt wird die Kohäsion größer. Sie ist also für eine bestimmte Bodenart keine Konstante. Der Scherwinkel ist von der Kornzusammensetzung und zu einem gewissen Grad von der Lagerungsdichte abhängig. Für eine Bodenart kann er aber als eine konstante Größe angenommen werden. Der Porenwasserdruck ist von den Spannungen, der Bodenart und dem Sättigungsgrad sowie von den Dränagemöglichkeiten abhängig. Bei wassergesättigten Proben kann der Porenwasserdruck gleich dem Spannungszuwachs sein, in Sonderfällen, z.B. Gärdruck, sogar größer. Die Variationsmöglichkeiten

in den drei Komponenten, die die Scherfestigkeit bilden, führen zu zahlreichen Möglichkeiten, die Scherfestigkeit in ihrer Wirkungsart und Größe zu beeinflussen. Werden z.B. wassergesättigte Proben ohne Konsolidation und ohne Drainage unter verschiedenen Spannungen abgeschert (sogenannte UU-Versuche), so wird festgestellt, daß die Scherfestigkeit in der Regel unabhängig von den Spannungen ist:

$$\tau_u = c_u \quad (2.2)$$

Dies kann durch eine Betrachtung der allgemeinen Scherfestigkeitsformel (2.1) erklärt werden. Wenn die Proben nicht konsolidiert sind, ist der Wassergehalt aller Proben gleich, d.h. daß c' für alle Proben gleich ist. Da die Proben wassergesättigt sind, ist der Porenwasserdruck gleich dem Spannungszuwachs, d.h. daß $(\sigma-u)$ bei verschiedenen Spannungen auch eine Konstante ist. Wenn die Proben nicht ganz wassergesättigt sind, sind die Porenwasserdrücke nicht gleich dem Spannungszuwachs und $(\sigma-u)$ ist keine Konstante. Aus solchen Versuchen wird ein scheinbarer Scherwinkel gemessen, dessen Größe im wesentlichen von dem Sättigungsgrad abhängig ist:

$$\tau_u = c_u + \sigma \tan \phi_u \quad (2.3)$$

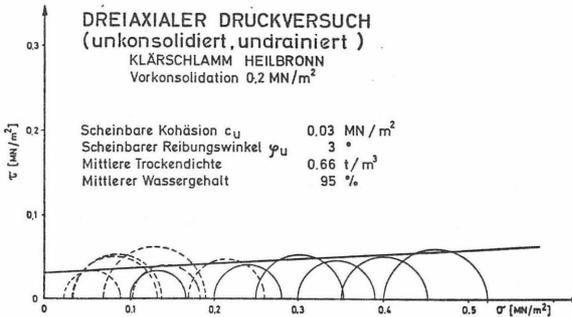


Abb. 5 Dreiaxialer Druckversuch (UU-Versuch)

Werden Proben, die unter verschiedenen Drücken konsolidiert wurden, anschließend im undrained Zustand abgeschert, wobei der Zellendruck gleich dem Konsolidationsdruck ist (sogenannter CU-Versuch), stellt man fest, daß die Scherfestigkeit normal konsolidierter Materialien als

$$\tau = \sigma \tan \phi_{CU} \quad (2.4)$$

dargestellt werden kann, d.h. die Scherfestigkeit nimmt linear mit zunehmendem Konsolidationsdruck zu.

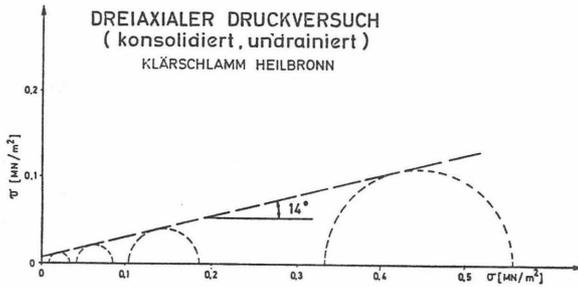


Abb. 6 Dreiaxialer Druckversuch (CU-Versuch)

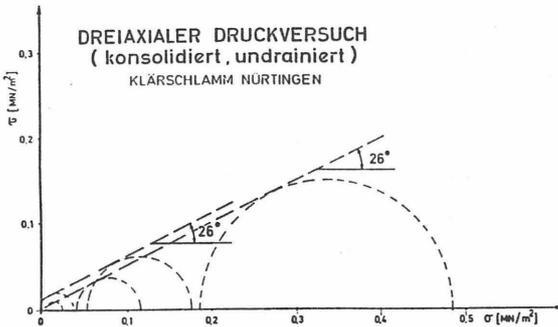


Abb. 7 Dreiaxialer Druckversuch (CU-Versuch)

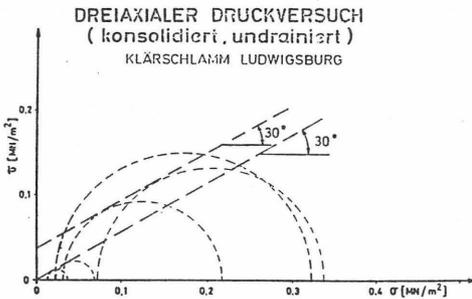


Abb. 8 Drei axialer Druckversuch (CU-Versuch)

An diesen drei Beispielen wird deutlich, wie unterschiedlich die Scherwinkel für den Endzustand (CU) der Deponie je nach Herkunft und Entwässerung sein können. Wird Schlamm durch thermische Behandlung auf 95 % Trockensubstanz getrocknet, können Scherwinkel bis 38° vorhanden sein.

Für die Beurteilung verschiedener Belastungsfälle muß man folgende Scherfestigkeiten verwenden:

- a) für Belastungen ohne Konsolidation UU-Versuch
- b) für Belastungen, bei denen eine Konsolidation stattfinden kann, CU-Versuch

Bei Versuchen mit Mieteneinbau wurde festgestellt, daß bei einer Mietengröße von ca. 1,5 m Höhe und ca. 3 m Breite die Konsolidation nach ca. 1,5 Jahren abgeschlossen war.

Es wurde beobachtet, daß manche ursprünglich feste Schlamme im Laufe der Zeit - wahrscheinlich durch Zerset-

zung der Teilchen - weich wurden. Dies wurde nicht nur von uns im Labor vor einiger Zeit festgestellt, sondern auch von Köhlhoff in letzter Zeit auf einer Monodeponie. Diese Beobachtungen wurden an relativ oberflächennahen Proben festgestellt.

An einer Schlammprobe aus 17,5 m Tiefe, die 30 bis 40 Jahre alt sein muß, wurde bei einem Trockensubstanzgehalt von 60 % eine Flügelfestigkeit von ca. 150 kN/m^2 festgestellt. Dies entspricht einem Reibungswinkel von ca. 25° , d.h. wenn die Schlamme konsolidieren können, wird Porenwasser herausgepreßt, und die Scherfestigkeit entspricht dem CU-Zustand.

In Abb. 9 sind die Festigkeiten, wie sie mit der Flügelsonde bestimmt werden, in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt dargestellt. Die Festigkeitsbestimmung mit der Flügelsonde entspricht ungefähr einer unkonsolidierten undrännierten Festigkeit aus dem Dreiaxialdruckversuch. Aus dem Diagramm geht eindeutig hervor, daß die Festigkeit nicht vom Trockensubstanzgehalt abgeleitet werden kann, sondern vielmehr davon, wie der Trockensubstanzgehalt erreicht wurde.

ABHÄNGIGKEIT DER FLÜGELFESTIGKEIT VOM TS- GEHALT

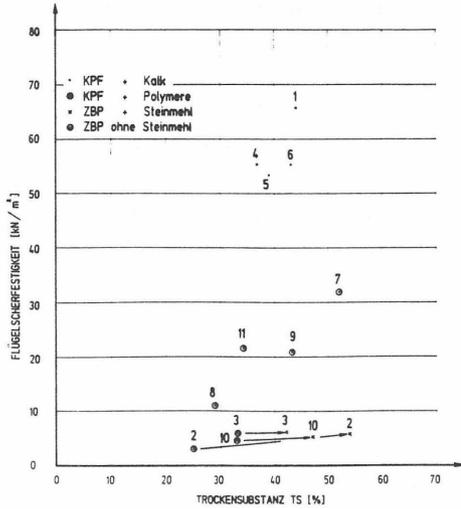


Abb. 9 Abhängigkeit der Flügelfestigkeit von TS-Gehalt

Manche Behandlungen erreichen sehr hohe Trockensubstanzgehalte, ohne daß die Festigkeit sich ändert; d.h. die Handhabung auf der Deponie wird überhaupt nicht verbessert, lediglich die abzulagernden Mengen werden unnötigerweise erhöht.

EINFLUSS DER LASTUMLAGERUNG VON MÜLL UND KLÄRSCHLAMM
AUF DIE STANDSICHERHEIT

Peter Spillmann

1. Problematik

Zur langfristig zuverlässigen Entwässerung der Deponien werden diese künftig überwiegend als Halden errichtet. Zur besseren Nutzung der nur beschränkt verfügbaren geologisch günstigen Standorte werden möglichst große und hohe Anlagen angestrebt. Zur Reduzierung der Abfallmassen werden als erstes unbelasteter Bodenaushub getrennt abgelagert, Bauschutt als Baumaterial aufbereitet und sortenreine sowie Abfälle des Gewerbemülls als Rohstoffe zurückgewonnen. Auch die Masse des Hausmülls wird durch getrennte Sammlung und Abfallnutzung in absehbarer Zeit merklich verringert. Es ist deshalb zu erwarten, daß künftig die Masse der festen Abfälle abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Masse der abzulagernden Klärschlämme erheblich zu, weil

- aufgrund chemischer Belastungen die Landwirtschaft den Schlamm nicht annimmt,
- als Folge einer verbesserten Abwasserreinigung mehr Klärschlamm je Einwohner anfällt,
- durch Industrieinflüsse mehr Schlamm anfällt, als er der Einwohnerzahl entspricht.

Die Reduzierung der Feststoffe bei gleichzeitiger Erhöhung des Klärschlammes verringert die Scherfestigkeit des Deponiekörpers, weil der Schlamm z. Z. der Anlieferung noch nicht konsolidiert ist und deshalb keine Reibungskräfte übernehmen kann (das Porenwasser muß erst durch Auflast ausgepreßt werden, bevor das Korn in Reibungskontakt kommt). Besonders nachteilig wirkt sich die Schlammablagerung auf die Standsicherheit aus, wenn sich die Lasten vom elastisch federnden, tragfähigen Müll auf einen zunächst inkompressiblen, nicht tragfähigen Schlamm umlagern können, da die für die Standsicherheit maßgebenden Reibungskräfte nicht der Scherfläche des Mülls, sondern der Normalkraft auf der Scherfläche proportional sind. Die Abschätzung einer solchen Umlagerung ist deshalb Gegenstand dieses Vortrages.

2. Materialkennwerte

2.1 Grenzen der Gültigkeit

Im vorangehenden Vortrag (Gay, 1990) wurden die neuesten Materialkennwerte von Müll und Klärschlamm dargestellt. Da aber z. Z. der Drucklegung der Manuskripte dem Verfasser dieses Vortrages dessen Inhalt noch nicht bekannt war, muß hier auf ältere Werte (Gay 1981 und Gay et al., 1981)

zurückgegriffen werden. Da hier vor allem das Prinzip und die Größenordnung der Folgen von Lastumlagerungen dargestellt werden, sind mögliche Abweichungen neuerer Materialkennwerte von älteren Messungen unbedeutend.

2.2 Müll

Kompressionsverhalten

Müll wird mit einer Auflast von ca. 30 t/m² (Rad des Kompaktors) verdichtet. Nach zwei bis drei Überfahrten (üblicher Einbau) federt er ca. 20 %, nach mehr als 3 Überfahrten noch mindestens 10 % zurück (Spillmann u. Collins, 1981). Die Kompression unter der Auflast der folgenden Abfallschicht beträgt deshalb kurzfristig auch ohne Abbauvorgänge deutlich mehr als 10 %. Das Kompressionsverhalten entspricht also einem weichen, federelastischen Material.

Scherfestigkeit

Die Scherfestigkeit von Müll (Abb. 1) nimmt mit zunehmender Auflast ab und beträgt nach bisheriger Kenntnis $\phi' = 23^\circ$ unter ca. 20 m Müllaufplast (Gay, 1981). Eine Extrapolation auf große Deponiehöhen (z. B. ca. 100 m der Deponie Hannover) ist allein aufgrund der Messung nicht möglich. Geht man davon aus, daß das organische Material langfristig verrotft und die geringste Festigkeit aufweist, ist langfristig ein Mindestreibungswinkel von Torf $\phi'_{\text{Torf}} > 15^\circ$ zu erwarten. Verlangt man für den Meßwert $\phi'_{\text{Müll}} = 23^\circ$ eine 1,5-fache Sicherheit, erhält man den Reibungswinkel für Torf

$$\text{tg } \phi'_{\text{Torf}} = \text{tg } 15^\circ = 0,268$$

$$\frac{\text{tg } \phi'_{\text{Müll}}}{\eta} = \frac{\text{tg } 23^\circ}{1,5} = \frac{0,425}{1,5} = 0,284$$

Für hohe Deponien wird deshalb in der folgenden Vergleichsrechnung mit einem voraussichtlichen Langzeitreibungswinkel von 15° und eine Sicherheit von 1 (bzw. Kurzzeitreibungswinkel von 22° und $\eta = 1,5$) gerechnet. Die Kohäsion wird auf der "sicheren Seite" vernachlässigt.

2.3 Klärschlamm

Kompressionsverhalten

Nach den Messungen von Gay et al., 1981 entspricht das Kompressionsverhalten weitgehend einem bindigen Boden. Der Unterschied besteht in einer ausgeprägten Sekundärsetzung, die bis zu 30 % der Gesamtsetzung ausmacht und dem Phänomen, daß das Maximum des Porenwasserdruckes am Ende der Primärsetzung auftreten kann (Abb. 2), die volle

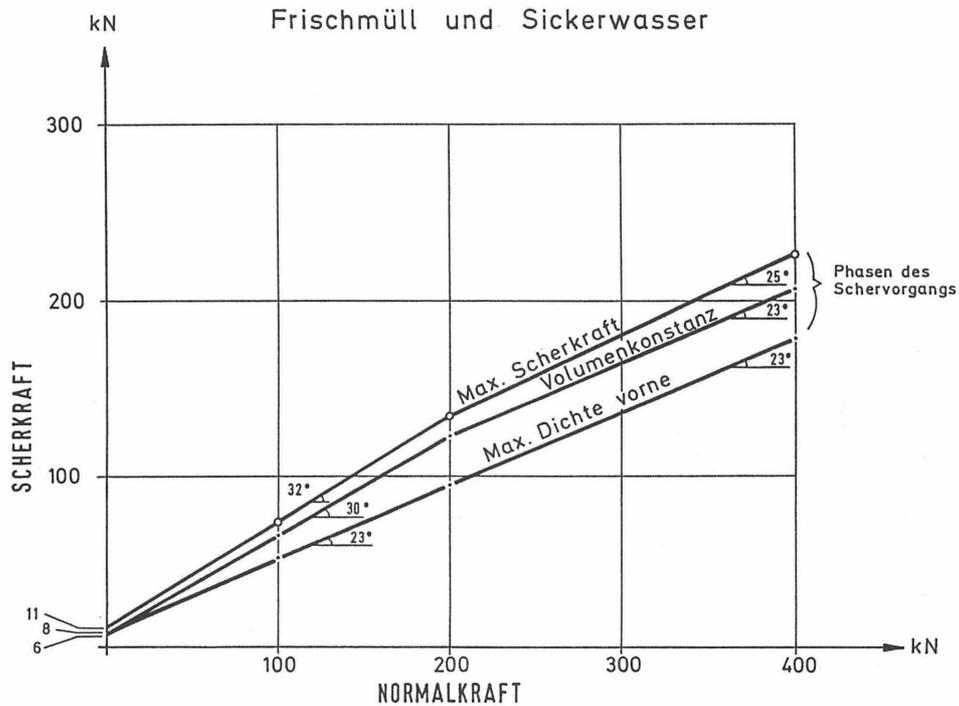


Abb. 1: Scherfestigkeit eines frischen, durchfeuchteten Hausmülls;
Messung der FMPA Stuttgart

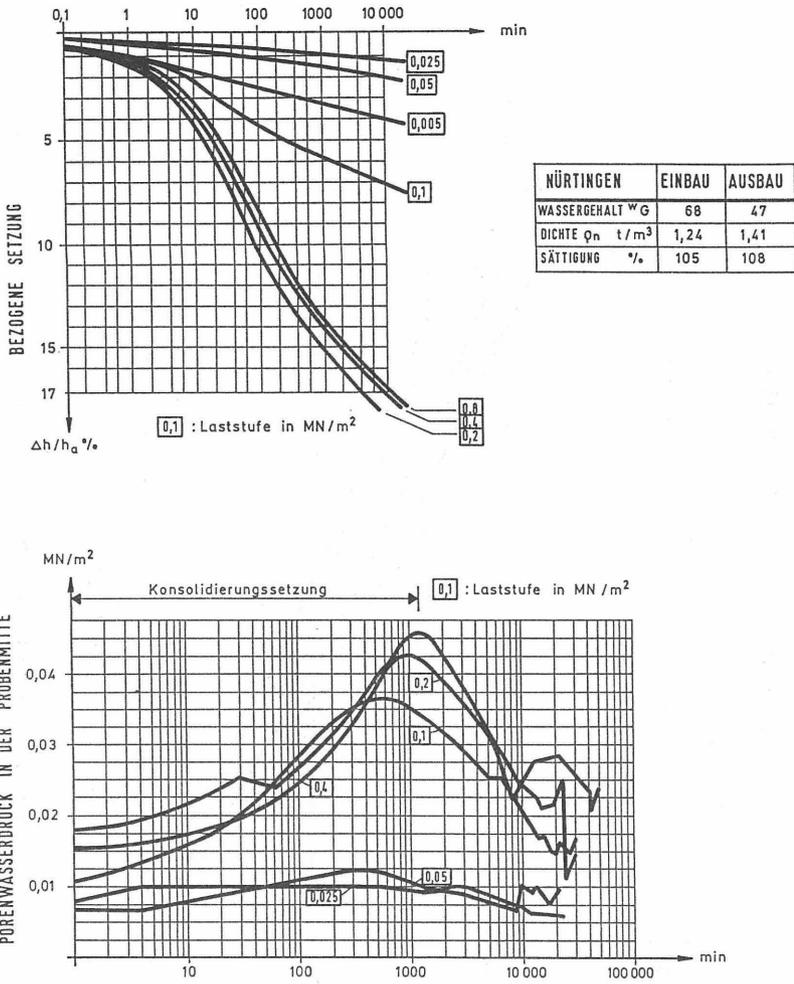


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Zeit- Setzungsverhalten und Porenwasserdruck im Klärschlamm (Gay et al., 1981)

Reibung also erst am Ende der Sekundärsetzung mobilisiert wird. Innerer Gasdruck kann die Konsolidierungszeit ebenfalls um eine Zehnerpotenz im Vergleich zum bindigen Boden verlängern (Gay et al., 1981). In Deponien, die in z. Z. üblichem Betrieb in Teilabschnitten schnell aufgebaut werden, können sich dicke Schlammkörper infolge der langen Konsolidierungszeiten wie starre Körper verhalten (Einzelheiten vgl. Spillmann, 1989).

Scherfestigkeit

Konsolidierte Klärschlämme erreichen bei schnellen Schervorgängen einen Reibungswinkel von ca. 10° bis 14° (Abb. 3, Gay et al., 1981). Da aber die untersuchten Lastumlagerungen vom Müll auf den Schlamm gerade bei verzögerter Konsolidierung auftreten, wird der Reibungswinkel für die hier betrachteten Fälle zu Null angesetzt. Die Anfangsscherfestigkeit ist reversibel und deshalb nicht ansetzbar (Gay et al., 1981).

3. Ablagerungstechnik

Sofern Müll und Klärschlamm nicht bereits so gemischt werden, daß der Schlamm in den Hohlräumen des Mülls eingelagert wird, ist der "Kassetteneinbau" als Stand der Technik anzusehen (Einzelheiten vgl. Spillmann, 1989). Als "Kassetten" werden kompakte Schlammkörper bezeichnet, die so in den verdichteten Müll eingebaut werden, daß die Feststoffe eine definierte standfeste Verzahnung übernehmen und das Sickerwasser vertikal ableiten können. Die Mindestabmessungen einer engmaschigen Verzahnung (Abb. 4 oben) ergeben sich für die Kassetten aus der Breite der abgekipp-ten Führen der Schlammkuchen (rutschen erheblich breiter auseinander als der LKW breit ist), für den Zwischenraum aus der Arbeitsbreite des Kompaktors und der befahrbaren Deckschicht aus Versuchserfahrung zu mindestens 1 m Dicke. Vereinfacht man die Kassettenform für die Berechnung zu Quadern (Abb. 4 unten), so besteht für konstantes Müllvolumen V_M folgender Zusammenhang zwischen der Kassettenhöhe h und dem Schlammvolumen V_S :

$$h = \frac{104 \cdot \frac{V_S}{V_M}}{36 - 68 \frac{V_S}{V_M}} ; h \rightarrow \infty \text{ für } V_S \geq 0,53 V_M$$

Entscheidend für die Einbautechnik ist der Umstand, daß das Verhältnis $\frac{V_S}{V_M}$ als Subtrahend im Nenner steht.

Die Höhe h wächst deshalb exponentiell mit der Zunahme des Schlammvolumens (Abb. 5), so daß "einwohnergleiche" Klär-

DREIAXIALER DRUCKVERSUCH - KLÄRSCHLAMM (KONSOLIDIERT, UNGEDRÄNT)

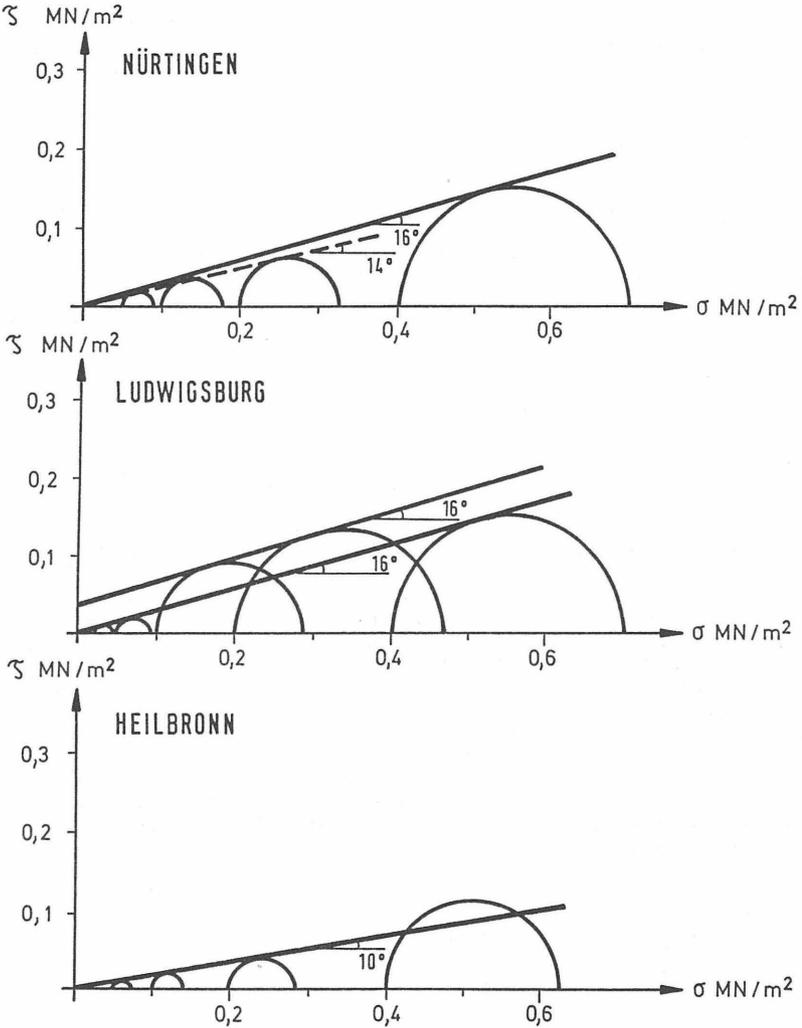
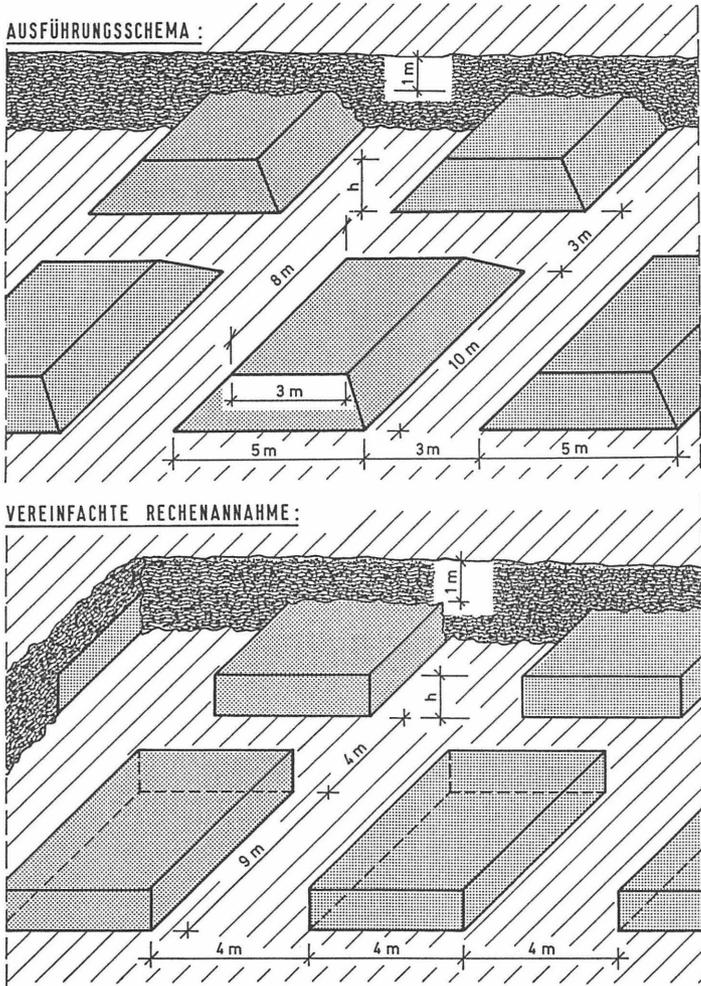
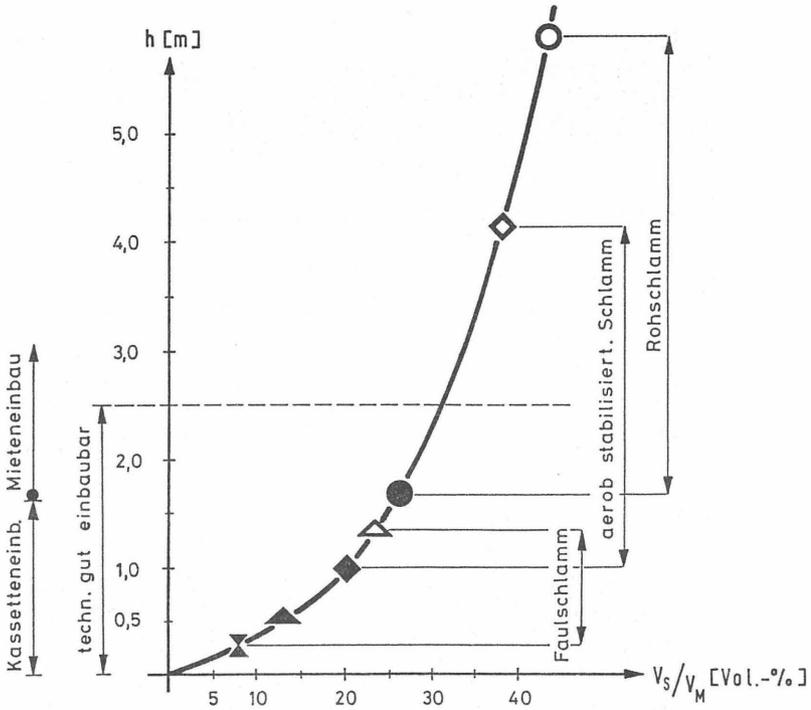


Abb. 3: Scheinbarer Reibungswinkel φ'_{Cu} , ermittelt an 3 typischen Klärschlämmen (Gay et al., 1981)



$$h = \frac{104 \cdot \frac{V_{\text{SCHLAMM}}}{V_{\text{MÜLL}}}}{36 - 68 \cdot \frac{V_{\text{SCHLAMM}}}{V_{\text{MÜLL}}}} ; h \rightarrow \infty \text{ für } V_{\text{SCHLAMM}} = 0,53 V_{\text{MÜLL}}$$

Abb. 4: Beispiel einer kraftschlüssigen Anordnung von Schlammkassetten; Kassettenhöhe ist abhängig vom Volumenverhältnis $V_{\text{Schlamm}} / V_{\text{Müll}}$; $V_{\text{Schlamm}} \geq 0,45 V_{\text{Müll}}$ ist in dieser Form nicht ablagerbar



MINERALE / SCHLAMM-TS

- | | | |
|---|--------------------------------|-------|
| ○ | roh, WG = 75 % | 1:1 |
| ● | roh, WG = 60 % | 0,6:1 |
| ◇ | aerob stabil, WG=75 % | 1:1 |
| ◆ | aerob stabil, WG=65 % | 0 |
| ▲ | ausgefaut, WG = 70 % | 1:1 |
| ▲ | ausgefaut, WG = 60 % | 0,5:1 |
| ✕ | ausgefaut, WG=60 % / ohne Kalk | 0 |

Abb. 5: Höhe der Schlammkassetten in Abhängigkeit vom Verhältnis des Schlammvolumens zum Müllvolumen

schlammmassen (Müll eines Einwohners, abgelagert mit dem Klärschlamm eines Einwohners) Kassetten von mehr als 2 m Höhe erfordern, wenn der Schlamm nicht sehr gut biologisch abgebaut und entwässert wird (Abb. 4). Gerade diese Schlämme faulen in Deponien nach (Gay et. al., 1981). Sie verlieren dabei die Anfangsfestigkeit, durch inneren Gasdruck wird die Konsolidierung verzögert und die Konsolidierungszeit wächst mit dem Quadrat der Kassettenhöhe. Da z. Z. noch Rohschlämme und teilweise aerob-stabilisierte Schlämme als deponierbar gelten, wenn sie nur nicht stinken und mit mindestens 40 Gew.-% Feststoff angeliefert werden (bzw. künftig eine definierte Mindestfestigkeit zum Zeitpunkt der Anlieferung aufweisen), wird hier dargestellt, welche schwerwiegenden Folgen zu hohe Kassetten aus schlecht stabilisiertem Schlamm für die Standsicherheit von Deponien haben.

4. Tragverhalten des Deponiekörpers

4.1 Randbedingungen

Die folgenden Abschätzungen gelten unter der Voraussetzung, daß der Untergrund als sicher gegen Grundbruch und die Sohlfuge als sicher gegen Gleiten ausgewiesen sind, die Auflast nicht durch den Auftrieb eines Wassereinstaus reduziert und die ungünstigen Kräfte nicht durch horizontalen Strömungsdruck vergrößert werden und daß die Auflasten (z. B. Verkehrslast) unbedeutend sind. Da die Standsicherheit vor allem für hohe Deponien wichtig ist, längs einer geometrisch ähnlichen Gleitfuge aber mit zunehmender Höhe die Kohäsion linear, die Massenkräfte und die von ihnen mobilisierten Reibungskräfte aber mit dem Quadrat der Höhe wachsen, wird außerdem die Kohäsion auf der sicheren Seite vernachlässigt. Unter diesen Bedingungen ist die Gerade die ungünstigste Gleitfuge. Der Arcus Tangens des mittleren wirksamen Reibungswinkels ist dann gleich der Maximalneigung der Böschung. Ferner wird davon ausgegangen, daß die Festigkeit des tragenden Mülls ausreicht, bis zu einem Reibungswinkel $\phi'_{\text{Müll}} = 15^\circ$ die durch Auflast zu mobilisierenden Reibungskräfte mit einer Sicherheit $\eta = 1$ auch aufzunehmen ($\phi'_M = 22^\circ$ für $\eta = 1,5$).

4.2 Ermittlung des mittleren Reibungswinkels

Maßgebend für die Mobilisierung von Reibungskräften ist nicht die belastete Fläche, sondern die Normalkraft, multipliziert mit dem Tangens des Reibungswinkels, solange die Materialfestigkeit ("Kornfestigkeit") nicht überschritten wird:

$$R = \text{ges. } N \cdot \text{tg } \bar{\varphi}'_{\text{Abfall}}$$

Sind die Normalspannungen gleichmäßig verteilt, sind die Normalkräfte im Deponiekörper proportional zur betrachteten

Schnittfläche. Der Verlust der Reibungskraft ist dann proportional zum Flächenanteil des Klärschlammes in einer betrachteten Bruchfuge. Enthält jedoch der federnde Müll wassergesättigte, sehr langsam konsolidierende und somit starre Körper aus Klärschlamm, entstehen zwischen den Schlammkörpern "kurze Federn" aus Müll, die im Vergleich zu den "langen Federn" des vertikal durchgehenden Müllkörpers mehr Last auf den Schlamm konzentrieren, als er dem Flächenanteil des Schlammes in der Bruchfuge entspricht. Für die mittlere Reibungsergebnisierende des ganzen Abfallkörpers ergibt sich daraus für $\phi'_{\text{Schlamm}} = 0$:

$$R = \text{ges. } N \cdot \text{tg } \bar{\phi}'_{\text{Abfall}} = N_{\text{Müll}} \cdot \text{tg } \bar{\phi}'_{\text{Müll}}$$

Der maximal erreichbare Böschungswinkel des gesamten Abfallkörpers ist somit

$$\text{arc tg } \bar{\phi}'_{\text{Abfall}} = \text{arc tg } \left[\frac{N_{\text{Müll}}}{\text{ges. } N} \cdot \text{tg } \phi'_{\text{Müll}} \right]$$

Das tatsächliche Tragverhalten hängt von der lotrechten Zuordnung der einzelnen Kassetten ab und liegt zwischen zwei idealen Anordnungen.

- 1) alle Kassetten lotrecht übereinander (Abb. 6)
- 2) alle Kassetten ideal versetzt (Abb. 7)

In erster Näherung wird angenommen, daß der Tangens des mittleren Reibungswinkels gleich dem Mittelwert der Reibungsbeiwerte beider idealen Anordnungen ist:

$$\text{tg } \bar{\phi}'_{\text{Abfall}} = \frac{1}{2} [\text{tg } \bar{\phi}'_{\text{Abfall } 1} + \text{tg } \bar{\phi}'_{\text{Abfall } 2}]$$

1. Fall: Lotrechte Anordnung (Abb. 6):

Der Tangens des mittleren Reibungswinkels hängt ab vom Normalkraftanteil des Mülls zur gesamten Normalkraft, die im Müll die Reibung mobilisieren kann:

$$\text{tg } \bar{\phi}'_{A1} = \frac{N_{M1}}{\text{ges. } N} \text{tg } \phi'_{M}; \quad \text{ges. } N = N_{M1} + N_{\text{Schlamm } 1}$$

$$\text{tg } \bar{\phi}'_{A1} = \frac{\text{tg } \phi'_{M}}{1 + \frac{N_S}{N_M}}$$

Das Verhältnis der Normalkräfte ist für einen (in erster Näherung) konstanten Elastizitätsmodul des Mülls nur proportional dem Verhältnis der "Federhärten" der "kurzen Feder

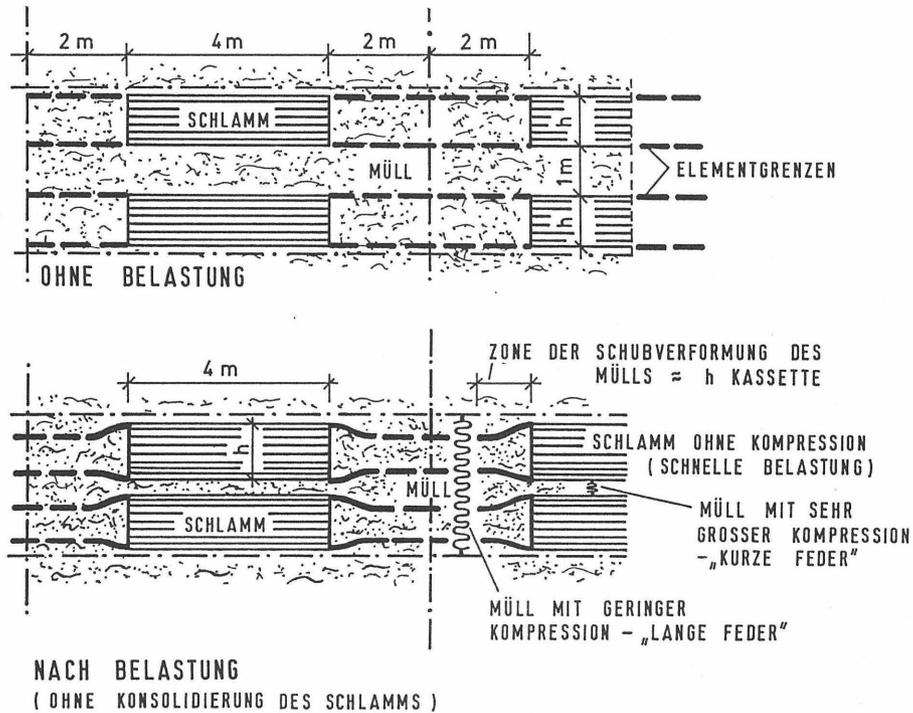


Abb. 6: Lastumlagerung vom Müll auf Klärschlammkassetten im Falle einer lotrechten Kassettenanordnung

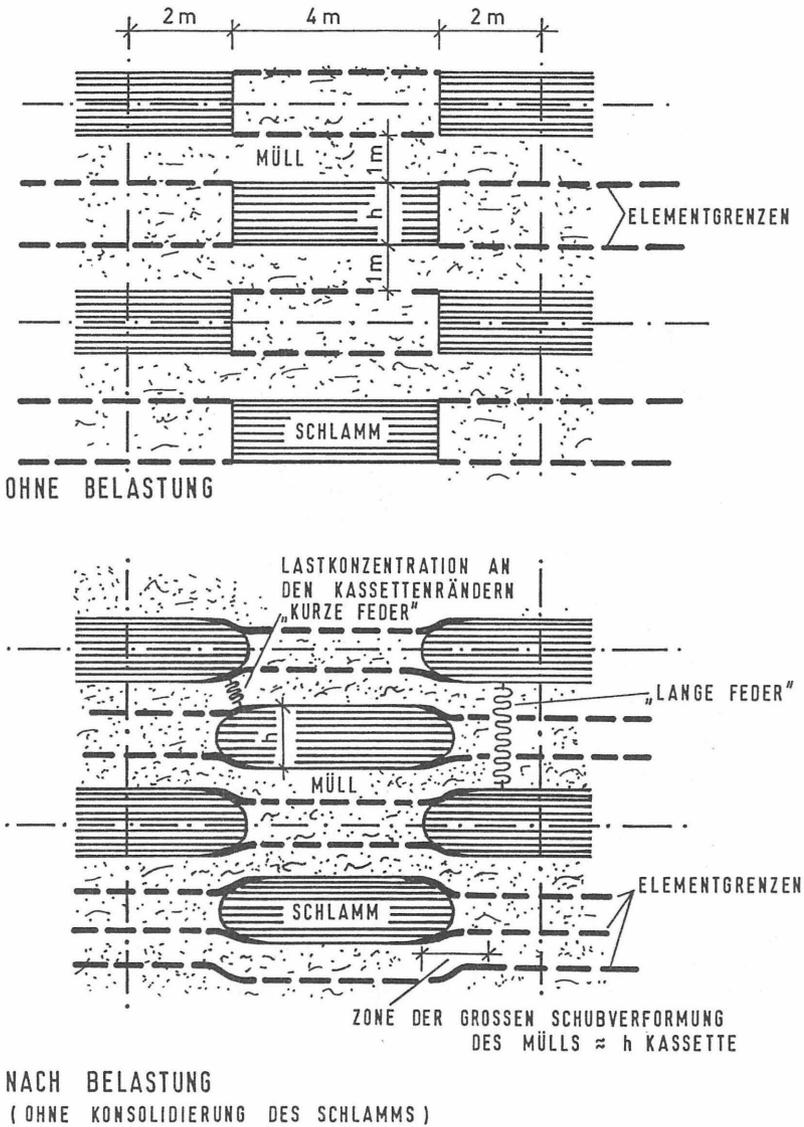


Abb. 7: Lastumlagerung vom Müll auf Klärschlammkassetten im Falle einer ideal versetzten Kassettenanordnung

(kF)" zwischen den Schlammkassetten (Deckschicht) und der "langen Feder (lF)" des vertikal durchgehenden Müllkörpers.

"kurze Feder"

$$N_S \sim \frac{F_{kF}}{l_{kF}}$$

F_{kF} = statisch wirksame Querschnittsfläche im Bereich der Deckschicht

l_{kF} = Länge der "kurzen Feder" = Höhe der Deckschicht", hier: 1 m gewählt

"lange Feder (lF)"

$$N_M \sim \frac{F_{lF}}{l_{lF}}$$

F_{lF} = statisch wirksame Querschnittsfläche im durchgehenden Müllkörper

l_{lF} = Länge der "langen Feder" = Systemabstand der Abfallagen = Kassettenhöhe + Höhe der Deckschicht, hier: $h + 1$ m

Die statisch wirksame Fläche der Kassettendeckschichten ("kurze Feder") ist größer als die geometrische Grundfläche der Kassetten, weil durch die Zähigkeit des Mülls Schubkräfte am Rande der Kassetten Kräfte aus dem vertikal durchgehenden Müllkörper auf die Deckschichten der Kassetten übertragen (Abb. 6). Nach dem de Saint-Venant'schen Prinzip reicht eine Störung infolge eingeleiteter Schubkräfte etwa so weit wie die geometrische Höhe des gestörten Querschnitts, hier also etwa gleich der Kassettenhöhe h (Abb. 6). Ersetzt man in erster Näherung den allmählichen Übergang rechnerisch durch einen Spannungssprung, nehmen Breite und Länge der statisch wirksamen Fläche der "kurzen Feder" allseitig etwa um die halbe Kassettenhöhe im Vergleich zur Kassettengrundfläche zu:

$$F_{kF} = (l_{\text{Kassette}} + 2 \cdot \frac{h}{2}) \cdot (b_{\text{Kassette}} + 2 \cdot \frac{h}{2})$$

$$\text{hier: } F_{kF} = (9 + h) \cdot (4 + h) \quad (\text{Maße in m, Abb. 6})$$

Die statisch wirksame Fläche der "langen Feder" ist dann gleich der Gesamtfläche zwischen den Systemachsen abzüglich

der Fläche der "kurzen Feder":

$$F_{IF} = \text{ges. } F - F_{kF}$$

$$\text{hier: } F_{Ik} = 8 \cdot 13 - (9 + h)(4 + h) \quad (\text{Maße in m})$$

Das Verhältnis der Normalkräfte vom Schlamm zum Müll beträgt danach:

$$\frac{N_S}{N_M} = \frac{(l_{\text{Kassette}} + h) \cdot (b_{\text{Kassette}} + h) \cdot (h_{\text{Kassette}} + h_{\text{Deckschicht}})}{h_{\text{Deckschicht}} \cdot \text{ges. } F - (l_{\text{Kassette}} + h) \cdot (b_{\text{Kassette}} + h)}$$

hier Abb. 6:

$$\frac{N_S}{N_M} = \frac{(9 + h)(4 + h)(h + 1)}{1 \cdot 13 \cdot 8 - (9 + h)(4 + h)} = \frac{(1 + h)[(6 + h)^2 + h]}{104 - (6 + h)^2 - h}$$

Im ersten Fall der lotrechten Kassettenanordnung (1) ist deshalb im Beispiel Abb. 4 der Tangens des mittleren Reibungswinkels ϕ'

$$\text{tg } \bar{\phi}'_1 = \frac{\text{tg } \phi'_{\text{Müll}}}{1 + \frac{(1 + h)[(6 + h)^2 + h]}{104 - (6 + h)^2 - h}}$$

2. Fall: ideal versetzte Anordnung (Abb. 7)

In der ideal versetzten Anordnung sind alle Müllkörper zwischen den Kassetten gleich hoch. Trotzdem bilden sich "kurze Federn" aus, weil infolge der Schubfestigkeit des Mülls an den Rändern der Kassetten auf kurzem Wege Kräfte übertragen werden (Abb. 7). Im Gegensatz zur lotrechten Kassettenanordnung kann aber die belastete Schlammmasse der Ränder zur weniger belasteten Kassettenmitte ausweichen. In erster Näherung wird die durch Schub mobilisierbare "Federbreite" deshalb zu ca. $\frac{1}{3} h_{\text{Kassette}}$ nach jeder Seite des Kassettenrandes angenommen. Die Querschnittsfläche der "kurzen Feder(kF)" beträgt dann im 2. Fall

$$F_{kF} = 2 \cdot (l_{\text{Kassette}} + b_{\text{Kassette}}) \cdot 2 \cdot \frac{h}{3} = \frac{4}{3} h (l_K + b_K)$$

$$\text{hier: } F_{kF} = \frac{52}{3} h$$

Der Querschnitt der "langen Feder", die den Müll belastet und Reibung mobilisiert, ist die Gesamtfläche zwischen den Systemachsen (Abb. 7) abzüglich der Kassettenfläche und der mittragenden Randzone:

$$F_{IF \text{ Müll}} = \text{ges. } F - (l_{\text{Kassette}} + \frac{2}{3} h) \cdot (b_{\text{Kassette}} + \frac{2}{3} h)$$

$$\text{hier: } F_{IF \text{ Müll}} = 13 \cdot 8 - (9 + \frac{2}{3} h)(4 + \frac{2}{3} h)$$

Der Querschnitt der "langen Feder", die den Schlamm belastet, ist gleich der Kassettenfläche abzüglich der Randeinflußzone:

$$F_{IF \text{ Schlamm}} = \left(l_{\text{Kassette}} - \frac{2}{3} h \right) \cdot \left(b_{\text{Kassette}} - \frac{2}{3} h \right)$$

$$\text{hier: } F_{IF \text{ Schlamm}} = \left(9 - \frac{2}{3} h \right) \left(4 - \frac{2}{3} h \right)$$

Zwischen den Systemachsen (Abb. 7) treten jeweils 2 "kurze" und eine "lange Feder" auf. Die Länge einer "kurzen Feder" l_{kF} ist gleich der Höhe der Deckschicht. Zur "langen Feder" l_{IF} ist dann anteilig die halbe Kassettenhöhe zu addieren.

$$l_{kF} = h_{\text{Deckschicht}}, \text{ hier: } l_{kF} = 1 \text{ m}$$

$$l_{IF} = l_{kF} + \frac{1}{2} h_{\text{Kassette}} = h_{\text{Deckschicht}} + \frac{1}{2} h_{\text{Kassette}} \quad \text{hier: } l_{IF} = 1 + \frac{1}{2} h$$

Bei der Berechnung der Normalkraftverteilung zwischen Schlamm und Müll ist zu beachten, daß im Gegensatz zur lotrechten Anordnung (Fall 1) eine "lange Feder" auch den Schlamm belastet:

$$\frac{N_S}{N_M} = \frac{N_{kF} + N_{IF \text{ Schlamm}}}{N_{IF \text{ Müll}}}$$

Entsprechend den Federsteifigkeiten ergeben sich daraus folgende Verhältnisse:

$$\frac{N_S}{N_M} = \frac{\frac{F_{kF}}{l_{kF}} + \frac{F_{IF \text{ Schlamm}}}{l_{IF}}}{\frac{F_{IF \text{ Müll}}}{l_{IF}}} = \frac{F_{kF} \cdot l_{IF}}{F_{IF \text{ Müll}} \cdot l_{kF}} + \frac{F_{IF \text{ Schlamm}}}{F_{IF \text{ Müll}}}$$

$$\text{hier: } \frac{N_S}{N_M} = \frac{\frac{52}{3} h \cdot \left(1 + \frac{h}{2} \right) + \left(9 - \frac{2}{3} h \right) \cdot \left(4 - \frac{2}{3} h \right)}{13 \cdot 8 - \left(9 + \frac{2}{3} h \right) \cdot \left(4 + \frac{2}{3} h \right)}$$

$$\frac{N_S}{N_M} = \frac{162 + 39 h + 41 h^2}{306 - 39 h - 2 h^2}$$

Der mittlere Reibungswinkel der Abfälle beträgt im 2. Fall der ideal versetzten Anordnung:

$$\text{tg } \bar{\varphi}'_2 = \frac{\text{tg } \varphi'_{\text{Müll}}}{1 + \frac{162 + 39 h + 41 h^2}{306 - 39 h - 2 h^2}}$$

Die tatsächliche Verteilung ist zufällig. Der Tangens des mittleren Reibungswinkels ist deshalb etwa gleich dem Mittelwert beider Idealfälle

$$\operatorname{tg} \bar{\varphi}'_{\text{Müll} + \text{Schlamm}} = \frac{1}{2} [\operatorname{tg} \bar{\varphi}'_1 + \operatorname{tg} \bar{\varphi}'_2]$$

Für einen Sicherheitswert = 1,5 ergibt das unter den Voraussetzungen nach Kap. 4.1 einen maximalen Böschungswinkel

$$\beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\frac{1}{2 \cdot 1,5} \cdot (\operatorname{tg} \bar{\varphi}'_1 + \operatorname{tg} \bar{\varphi}'_2) \right]$$

Diese Abschätzung gilt für Rohschlämme oder nur geringfügig aerob stabilisierte Schlämme mit verzögerter Konsolidierung infolge inneren Gasdruckes und langen Entwässerungswegen.

5. Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis

Im Beispiel Abb. 4 sind für einwohnergleiche Abfallmassen mindestens ca. 2 m hohe Kassetten erforderlich, wenn der Schlamm nicht biochemisch abgebaut und gut entwässert wird. In Abb. 8 ist für die abgebildete Deponie die Abnahme der Nutzungsdauer in Abhängigkeit vom Schlammanteil für diese Schlämme als Beispiel dargestellt. Auf den ersten Blick ist zu erkennen, daß unter der Voraussetzung gleicher Standsicherheit die Ablagerung einwohnergleicher Klärschlämme in Kassetten eine sinnvolle Nutzung des Standortes ausschließt, wenn die Schlämme nicht biochemisch weitgehend abgebaut und sehr gut entwässert wurden.

Höhere Schlammanteile (z. B. infolge eines weitgehenden Recyclings) erfordern andere Deponietechniken. Durch intensive Mischung von Müll und Schlamm kann z. B. der Schlamm auf die Hohlräume des Mülls verteilt werden. Selbst nach einem weitgehenden Feststoffrecycling kann sehr gut entwässerter Faulschlamm noch "einwohnergleich" im Restmüll untergebracht werden (vgl. Spillmann, 1989 a und b).

Dr.-Ing. Peter Spillmann
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abteilung Landw. Wasserbau und
Abfallwirtschaft
TU Braunschweig
Beethovenstraße 51 a
3300 Braunschweig

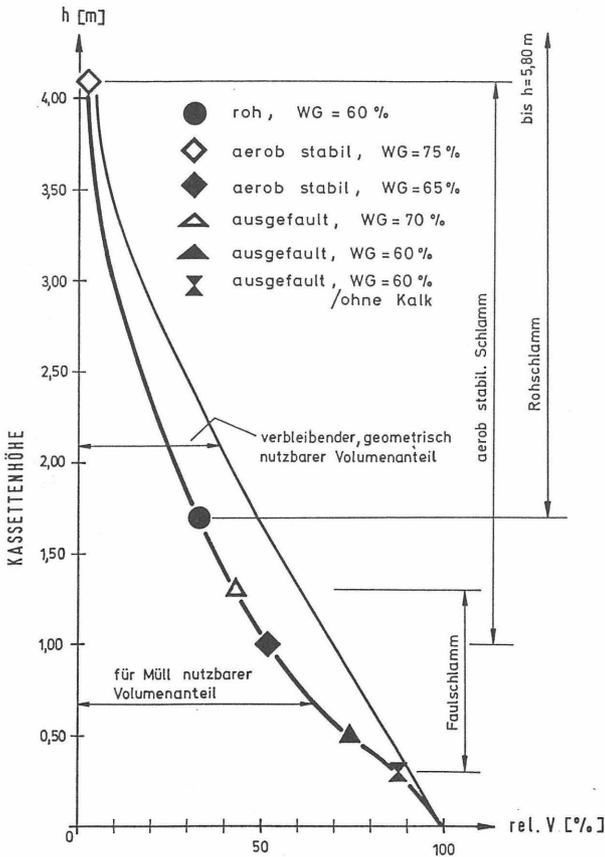
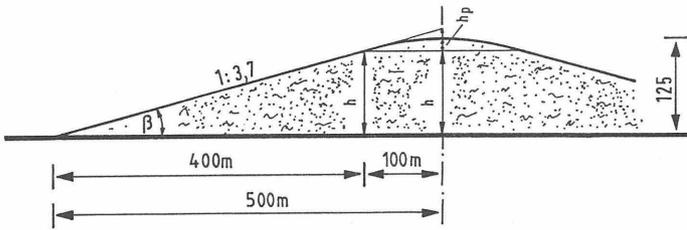


Abb. 8: Abnahme des für Müll nutzbaren Volumens einer hohen Deponie in der Ebene durch Ablagerung einwohnergleicher Klärschlamm-massen in Kassetten, dargestellt am abgebildeten Querschnitt (Dünnschichteinbau ohne Klärschlamm = 100% gesetzt)

L I T E R A T U R

- Collins, H.-J. u. P. Spillmann (Hrsg.), (1989): Abfallreduzierung und Restmüllentsorgung. - Zentrum für Abfallforschung der TU Braunschweig, H. 4, ISSN 0934 - 9243.
- Gay, G. Ch. W. (1981): Bestimmung der Scherfestigkeit an Hausmüll in verschiedenen Variationen. - Bericht der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg im F + E - Vorhaben FKZ 1430042; Ergebnisse enthalten im Forschungsbericht T 82-130, Jourdan et al. (1982).
- Gay, G. Ch. W., K. F. Henke, G. Rettenberger u. O. Tabaseran (1981): Standsicherheit von Deponien für Hausmüll und Klärschlamm. - Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, 14; E. Schmidt Verlag, Bielefeld, ISBN 3-503-01399-7.
- Gay, G. Ch. W. (1990): Scherparameter von Müll und Klärschlamm. - In: Inst. f. Grundbau und Bodenmech., TU Braunschweig (1990).
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig (1990): Standsicherheit im Deponiebau, Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen. - Mitteilungen, H.31, ISBN 3-927610-21-6.
- Jourdan, B., P. Spillmann, H. Münz, J. Stitzke, H. Koch, G. Holch und A. Rothmund (1982): Hausmülldeponie Schwäbisch Hall - Homogenisierung und Verrottung des Mülls vor der Ablagerung. - Bundesmin. f. Forschung und Technologie, Forsch.-Bericht T 82-180, Fachinformationszentrum Karlsruhe, ISSN 0340-7608.
- Spillmann, P. u. H.-J. Collins (1981): Erhöhung der Nutzungsdauer von Hausmülldeponien durch betriebliche Maßnahmen; Teil 2: Einfluß der Arbeitsweise des Kompaktors auf die erzielbare Dichte im dünn-schichtigen Einbau.- Müll und Abfall, 13 (1), S. 4 - 13.
- Spillmann, P. (1989 a): Die Verlängerung der Nutzungsdauer von Müll - und Müll-Klärschlamm-Deponien.- Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, H. 27, E. Schmidt Verlag, ISBN 3-503-02808-0.
- Spillmann, P. (1989 b): Gemeinsame Deponierung von Restmüll und Klärschlamm. - In: Collins, H.-J. u. P. Spillmann (Hrsg.) (1989).

Berechnung von Schächten in Deponien

Neue Erkenntnisse

Dipl.-Ing. P. Ney, Dr. F.W. Hug

1. Einleitung

Bei der Neuanlage von Deponien wird heute angestrebt, Schachtbauwerke an die Peripherie, außerhalb der Deponie zu verlagern. Die Notwendigkeit, diese Bauwerke an Tiefpunkten des Geländes anzusetzen, erfordert es jedoch in Einzelfällen, Schächte innerhalb des Deponiekörpers anzuordnen; beim Ersatz beschädigter Schächte ist deren Lage durch die vorhandene Drainage unveränderbar vorgegeben.

Es ist deshalb weiterhin notwendig, sich mit allen auf diese Bauwerke einwirkenden äußeren Kräfte auseinanderzusetzen, um ausreichende Bemessungs- und Konstruktionsgrundlagen für das Schachtbauwerk zu erhalten.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich im wesentlichen auf Hausmülldeponien; sie sind vom Grundsatz her auf andere Deponietypen anwendbar, sofern man die vom Hausmüll abweichenden "bodenmechanischen" Eigenschaften des Deponiegutes in die Überlegungen einbezieht.

2. Ursachen von Schäden

Die bisher aufgetretenen Schäden haben mannigfaltige Ursachen, die heutzutage nur noch zu einem Teil auf mangelndes Problembewußtsein, sowohl bei den planenden/ausschreibenden Stellen als auch bei den Ausführenden und Betreibern, zurückzuführen sind.

Der Ausschreibungstext "1 Stück Sickerwasserschacht, pauschal" ist - zumindestens dem Sinne nach - trotzdem noch nicht vollständig aus der Ausschreibungs- und Vergabep Praxis verschwunden. Es liegt auf der Hand, daß ungenügend oder unpräzise formulierte Anforderungen und Randbedingungen zu technisch, konstruktiv und demzufolge preislich sehr ungleichen, praktisch nicht vergleichbaren Angeboten führen.

Da der Ausschreibende durch mangelhafte Vorgabe bereits gezeigt hat, daß er die Problemstellung nicht beherrscht und demzufolge die eingereichten Angebote technisch/konstruktiv nicht richtig beurteilen kann, wird in der Regel demjenigen der Zuschlag erteilt, der das billigste Angebot vorgelegt hat. Folglich bleiben häufig diejenigen Vorschläge auf der Strecke, die in richtiger Einschätzung der hohen Anforderungen ein fundiertes Angebot unterbreiten.

Auch eine Vorgabe von Bedingungen für die Schachtbemessung und -konstruktion, wie einwirkende äußere Kräfte, Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit usw., kann Schäden nicht vermeiden, wenn das Schachtbauwerk nicht seiner Bedeutung entsprechend sorgfältig geplant, hergestellt und im Betrieb angeschützt wird. So bedeutet das Anordnen eines - meist auf radialsymmetrische Beanspruchung ausgelegten - Schachtes in einer Böschung eine grobe Mißachtung der Berechnungsgrundlagen.

Auch die Anschüttung von Materialien, die sehr unterschiedliche bodenmechanische Eigenschaften aufweisen, bzw. die häufig zu beobachtende unsymmetrische Kiesumhüllung um den Schacht, können zu Schäden führen.

Schäden traten aber auch bei sorgfältig geplanten, hergestellten und eingebauten Objekten auf. Die Analyse derartiger Schadensfälle führt zu der Folgerung, daß Erfahrungen aus dem allgemeinen Tiefbau bzw. Bergbau auf die Verhältnisse in Abfalldeponien - insbesondere Siedlungsabfalldeponien - nicht übertragbar sind.

3. Besonderheiten des bodenmechanischen Verhaltens von Abfällen

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei den Überlegungen, welchen äußeren Kräften ein Schachtbauwerk in einem Müllkörper ausgesetzt ist, ist die Feststellung, daß Abfälle ein mechanisches Verhalten zeigen, das bei Bodenmaterial nicht beobachtet wird. Bei Hausmüll treten z. B. gleichzeitig sehr hohe Scherfestigkeiten und Zusammendrückbarkeiten auf. Mit zunehmender Konsolidierung scheidet sich nach bisherigen Beobachtungen die Scherfestigkeit und die Zusammendrückbarkeit abzumindern; Lockergesteine verhalten sich bezüglich der Scherfestigkeit genau umgekehrt.

Abfallablagerungen werden in der Regel heterogener aufgebaut als Lockergesteine, so daß sich zwar deren Verhalten im großen Maßstab (einigermaßen) beschreiben läßt, jedoch im kleinen Maßstab sehr unterschiedliche, zum Teil widersinnige, Bewegungsabläufe auftreten. Die belastungsabhängigen Setzungen werden, anders als im Boden, durch langfristige belastungsunabhängige Setzungen überlagert, welche auf biologisch-chemisch-physikalische Umwandlungsprozesse in dem Müllkörper zurückzuführen sind.

Von besonderer Bedeutung ist die sehr hohe Zusammendrückbarkeit des Hausmülls. Obwohl dieser Gesichtspunkt für die Planung und Ausführung nicht nur der Schächte, sondern zahlreicher anderer Anlagen (Gasdrainage, Oberflächendichtung usw.) von ausschlaggebender Bedeutung ist, liegen bisher nur wenige diesbezügliche Untersuchungen vor. WIEMER [7] hat z. B. in einer Siedlungsabfalldeponie, bei Dünnschichteinbau, in einer 15 m mächtigen Müllschicht eine Zusammendrückung von 2.50 m (entsprechend 16 %) unter einer Müllauflast von 20 m gemessen.

Bei Hausmülldeponien ist die Annahme verbreitet, daß sich die spezifische Setzung in einer Größenordnung von 25 % bewegt; vereinzelt werden noch höhere Setzungsmaße in die Diskussion gebracht.

4. Praxis der Berechnung von Schächten in Deponien

Üblicherweise werden die äußeren Kräfteinwirkungen auf Schächte in Deponien mit den gleichen Verfahren berechnet, wie Schächte im Boden. Die dort bewährten Rechenansätze (z. B. Steinfeld, Walz, [4], [5], [6]) für die Ermittlung der Erddruckbelastungen beruhen auch bei rotationssymmetrischen Systemen auf der Erddrucktheorie - an deren Voraussetzungen hier vereinfacht erinnert wird.

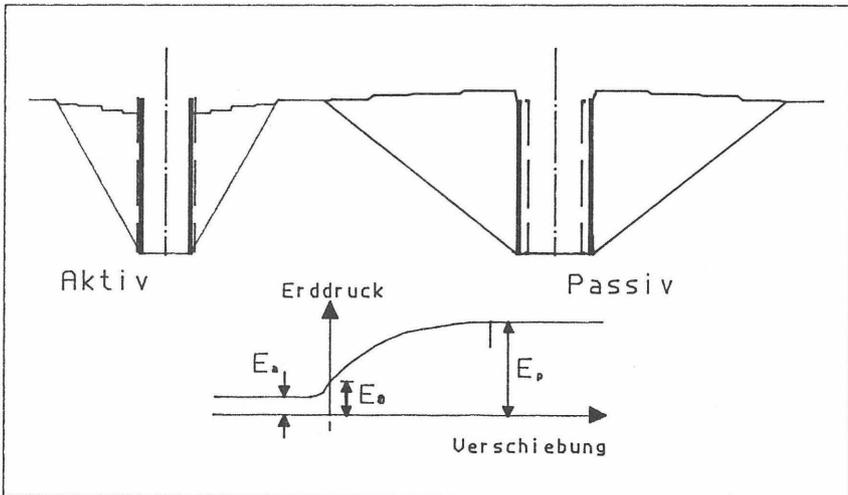


Abb. 1: Prinzipische Skizze Erddruckfälle

- Es werden plastische Grenzzustände vorausgesetzt. Diese beruhen entweder auf dem Minimalprinzip (aktiver Erddruck) oder auf dem Maximalprinzip (passiver Erddruck). [1]
- Es sind nur geringe Verformungen (wenige o/oo) des belasteten Bauwerkes erforderlich um den unteren Grenzwert (aktiven Erddruck) zu mobilisieren. Diese Verformung ist **zum Bauwerk hin** gerichtet.

Zur Auslösung des Erdwiderstandes (passiver Erddruck) sind im Vergleich große von dem Bauwerk weg gerichtete Verformungen erforderlich.

- Bei dem Ansatz des räumlichen aktiven Erddrucks bewirken die zum Bauwerk gerichteten Bewegungen eine innere Verspannung des Bodens (Gewölbewirkung). Demzufolge ist der räumliche Erddruck bei rotationssymmetrischen Bauwerken geringer als im ebenen Fall.

$$E_a (\text{räumlich}) < E_a (\text{eben}).$$

- Andererseits sind die Erdwiderstandskräfte bei rotationssymmetrischen Körpern erheblich höher als im ebenen Ansatz

$$E_p (\text{räumlich}) \gg E_p (\text{eben}).$$

Im Folgenden wird gezeigt, daß die erwähnten gebräuchlichen Bemessungsverfahren in der Regel auf Schächte in Deponien nicht anwendbar sind.

Zunächst ist festzustellen, daß im Falle einer Kiesummantelung um den Schacht, deren Abmessungen das Volumen des "aktiven Erdkeils" erheblich unterschreiten. (Abb. 2). Trotzdem werden in der Praxis derartige Schächte mit den Bodenkennwerten des Kieses und den für den gesamten Erddruckkörper gültigen Tabellenwerten berechnet.

Abb. 2

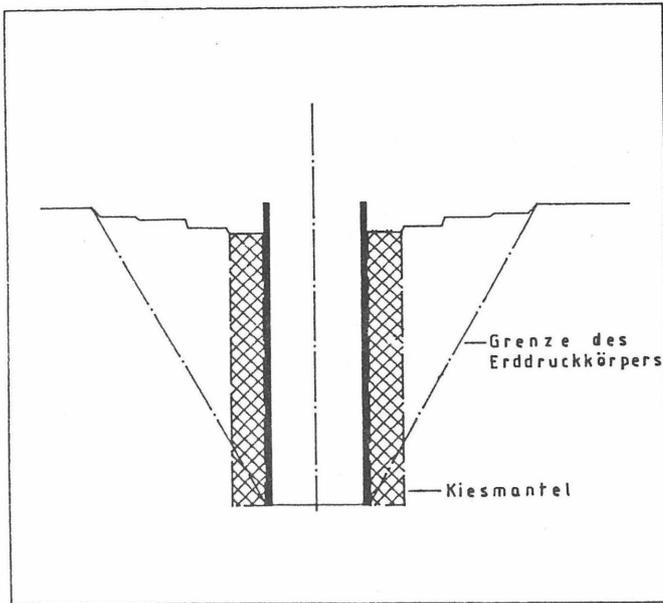


Abb. 2: Erddruckkörper und Kiesummantelung

Die Mißachtung der grundlegenden geometrischen Voraussetzungen des Rechenverfahrens ist jedoch nicht die einzige Kritik, die gegen die gebräuchliche Berechnungspraxis anzumelden ist. Der Grundsatz aus der Statik **"Steife Elemente ziehen die Lasten an"** hat auch in Deponien Gültigkeit.

Schächte und deren Kiesummantelung stellen jedoch in dem stark kompressiblen Deponiemedium verhältnismäßig steife Elemente dar. Es leuchtet demzufolge ein, daß die Anwendbarkeit von Verfahren, die auf dem Minimalprinzip beruhen, diesen Verhältnissen nicht gerecht werden.

Es stellt sich weiterhin die grundsätzliche Frage, ob die Verformungen des Bauwerks ausreichen, um die plastischen Grenzzustände im Deponiegut zu mobilisieren. Die erwähnten Abweichungen der Eigenschaften von Abfällen von den Erfahrungsgrundlagen der Bodenmechanik lassen hier berechnete Zweifel zu. Angesichts der Kompressibilität und Eigenverformungen des Deponiegutes, ist eine Gewölbebildung bei den möglichen geringen Bauwerksverformungen zu bezweifeln.

5. Negative Mantelreibung

Die in der Bodenmechanik in diesem Maße nicht bekannte starke Kompressibilität des Müllkörpers führt zu einem weiteren wesentlichen Unterschied der Verhältnisse in einer Deponie und denjenigen im Boden.

Die Setzungen des Deponiegutes werden in dem Bereich der wesentlich starreren Schachtkonstruktion behindert. Das Müllgut hängt sich an der Mantelfläche der Schachtkonstruktion bzw. deren Kiesummantelung auf und erzeugt hier lotrechte Kräfte im Sinne der aus der Bodenmechanik bekannten "negativen Mantelreibung".

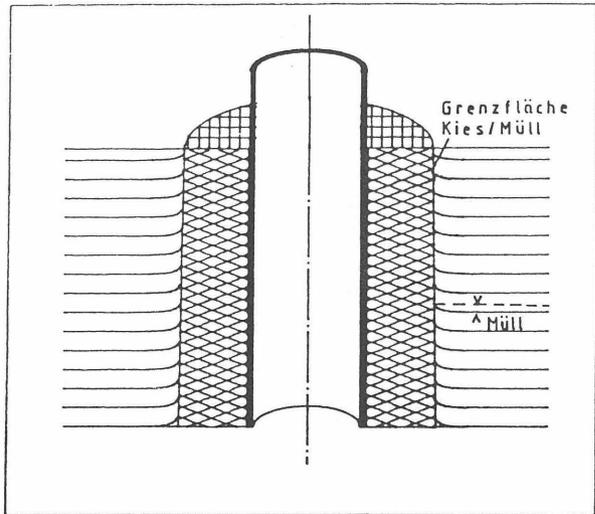


Abb. 3: Wirkung der negativen Mantelreibung

Die hieraus entstehenden Kräfte bleiben in den gebräuchlichen Rechenverfahren unbeachtet; über deren Größe besteht allerdings noch weitgehend Unklarheit. Versuche und Meßwerte an kiesummantelten Schächten zeigen, daß sie erheblich größer sind, als Erfahrungsansätze aus dem Grundbau.

Abb. 4 stellt die Prinzipskizze einer Versuchsvorrichtung dar, mit der die Mantelreibung zwischen Kies und Müll bestimmt werden kann. Der Verlauf von hiermit ermittelten Kraft-, Wegkurven ist beispielhaft in Abb. 5 wiedergegeben.

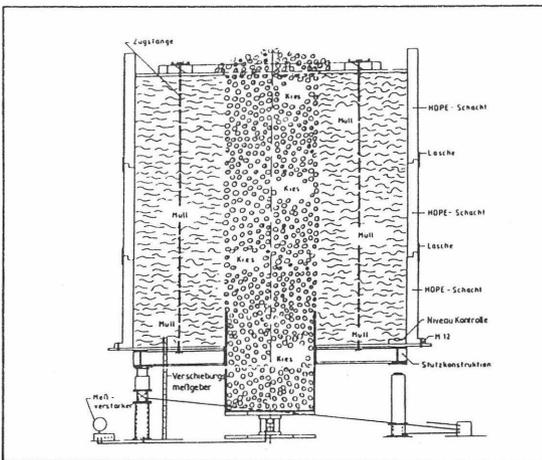


Abb. 4: Versuchsvorrichtung

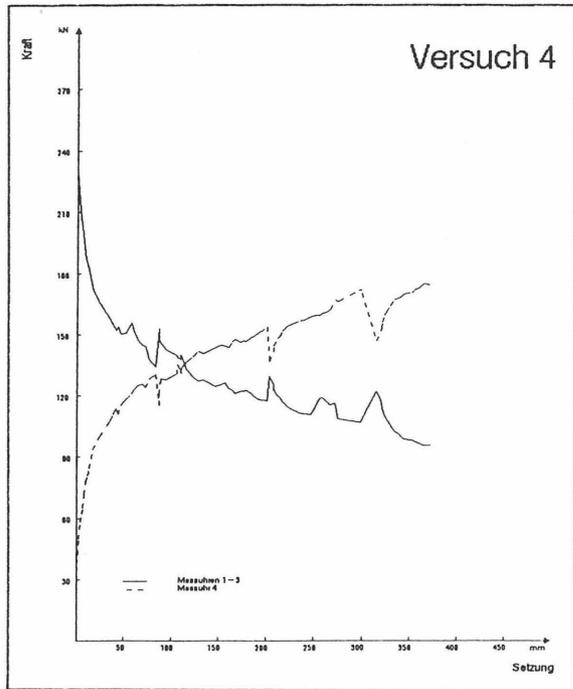


Abb. 5: Kraft-Wegkurven im Mantelreibungsversuch

Dank des Problembewußtseins in der Kreisverwaltung Euskirchen werden mit finanzieller Unterstützung des Umweltbundesamtes innerhalb der Kiesummantelung eines Schachtes der Deponie Mechernich derzeit Spannungsmessungen durchgeführt. Dort war ein Sickerwasserschacht in einem 27 m mächtigen Siedlungsabfallkörper zu ersetzen. Im Rahmen des Wiederaufbaus, und bei der weiteren Schüttung wurden bisher in fünf Messungen Druckmeßdosen eingebaut. Nach dem Ersatz des Schachtes wurde die Deponieschüttung um bisher ca. 16 m auf insgesamt ca. 43 m Gesamtmächtigkeit erhöht. Druckmeßdosen zeigen, daß die lotrechten Spannungen in der Tat mit der Zeit wesentlich höher ausfallen als das Eigengewicht der Kiesüberlagerung erwarten läßt.

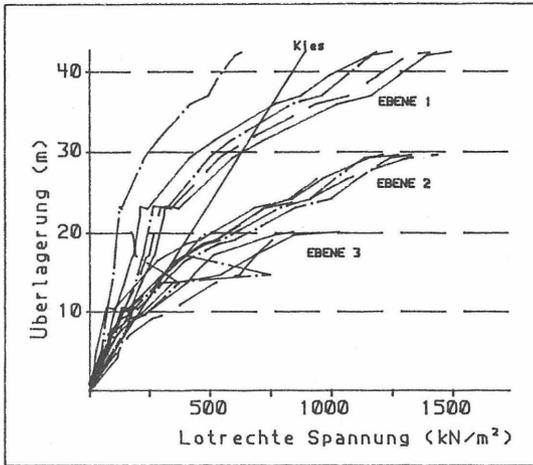


Abb. 6: Lotrechte Spannungen in dem Kiesmantel

In Abb. 6 sind die lotrechten Spannungen in Abhängigkeit der Kiesüberlagerung in dem Bereich des wieder aufgebauten Schachtes dargestellt. Der Meßgeräteaufbau in diesem Bereich umfaßt insgesamt 15 lotrechte Druckgeber, von denen jeweils fünf an verschiedenen Stellen in einer Ebene angeordnet wurden. Aussagekräftige Messungen im Frischmüll liegen noch nicht vor.

Überraschenderweise ist festzustellen, daß bei gleicher Überlagerungsmächtigkeit die lotrechten Spannungen umso rascher zunehmen, je höher die Meßebeine liegt. Dies wird auf das abnehmende Alter, also auf den geringeren Konsolidationsgrad des Mülls mit zunehmender Höhe zurückgeführt.

Die unteren Kurvenbereiche zeigen auch, daß teilweise vertikale Spannungen durch Gewölbewirkung abgebaut werden. Dies ist insbesondere an den Kurven der Ebene 1 sehr deutlich erkennbar. Hier liegt die Spannungszunahme erheblich unter dem Eigengewicht der Kiessäule.

6. Grundsätzliche Überlegungen zu Rechenansätzen

6.1 Schachtbauwerke ohne Kiesummantelung

Bei Schachtbauwerken, an denen das Deponiegut unmittelbar angeschüttet wird, erscheint die Hypothese eines elastisch-isotropen Halbraumes als sehr grobe Näherung noch vertretbar. Allerdings trifft dieses nur im großen Maßstab zu; im kleinen Maßstab ist wie erwähnt, mit heterogenem Verhalten des eingebrachten Abfalls zu rechnen.

Vom Grundsatz her ließen sich sinngemäß die erläuterten Berechnungsverfahren auf derartige Bauwerke anwenden, wenn den lokalen Heterogenitäten in anderer Weise Rechnung getragen wird (z.B. durch Ansatz entsprechender (Un)sicherheitsbeiwerte. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob die geringe radiale Verschiebbarkeit des Schachtes ausreichend ist, um den aktiven Erddruck (Minimalprinzip Abb. 1) zu mobilisieren. Auf jeden Fall ist der Ansatz eines abschirmenden Gewölbedrucks bei stark kompressiblem Deponiegut mehr als fraglich.

Sofern diese Voraussetzungen nicht mit Sicherheit zutreffen, sind höhere Ansätze für die radiale Belastung zu wählen. Hier fehlen gesicherte Erfahrungswerte; in der Praxis wird man sich je nach Deponiegut von dem nur leicht erhöhten aktiven Erddruck über den Erdruchdruck bis zu einem Verdichtungsdruck entscheiden müssen.

Die vertikale Belastung dieser Schächte kann analog zu den Bemessungsansätzen der negativen Mantelreibung auf Grundbauwerke ermittelt werden. Die Größenordnung der Grenzwerte der negativen Mantelreibung zwischen dem Deponiegut und dem Schacht wird experimentell (im Großexperiment) zu ermitteln sein.

6.2 Kiesummantelte Schächte

Den bisher erläuterten Verfahren der Berechnung der äußeren Kräfte auf ein Schachtbauwerk ist gemeinsam, daß sie von der Idealvoraussetzung des elastisch-isotropen Halbraumes ausgehen. Um diese Voraussetzung zu erfüllen, müßte sich der im plastischen Grenzzustand ausbildende kegelstumpfförmige Gleitkeil insgesamt innerhalb der Kiesummantelung befinden (Abb. 2).

Das bedeutet, daß der Durchmesser des Kieskörpers in der Größenordnung mindestens der Schachttiefe entsprechen muß, eine Forderung, die aus ökonomischen Gründen, insbesondere wegen des Verlustes an Deponieraum praktisch nicht erfüllbar ist.

Auf die notwendigerweise begrenzte Kiesummantelung wirkt an der Mantelfläche die negative Mantelreibung (Abb. 3) des sich setzenden Müllkörpers. Um die eingeleiteten lotrechten Belastungen abzutragen, muß sich die mineralische Umantelung gegen den umgebenden Müllkörper radial abstützen. Die Verhältnisse seien an folgender auf Meßergebnissen beruhender Tabelle verdeutlicht:

Tabelle 1: Verformung der Kiesummantelung

Ebene	Mächtigkeit (m)	mittlere lotrechte Spannung (kN/m ²)	Stauchung (m)	Volumen-* änderung %	radiale Ausdehnung cm
1 - 2	12.8	1.194	0.61	4,4	8
2 - 3	9.5	1.315	0.51	5,0	10
3 - 4	13.4	640	1.09	7,9	15

* abzügl. elast. Verformung

Die Ebenen 1 - 3 sind in die Kiesummantelung des alten Müllkörpers, die Ebene 4 in den Bereich des neu eingebrachten Mülls eingebaut. Die in letzterer Ebene eingebauten Druckmeßdosen wurden bereits nach 4 Monaten durch die großen Verformungen des Kieskörpers zerstört.

Infolge der lotrechten Belastung findet also an der Mantelfläche zwischen Kieskörper und Deponiegut eine Verdrängung nach außen statt. Diese erweist sich als umso stärker ausgeprägt, je jünger die Müllablagerung ist. Die Verformungsvoraussetzungen für die Ausbildung des aktiven Erddruckes sind demzufolge nicht mehr eingehalten; im Verhältnis zu dem Ausgangszustand wird die Radialbelastung an der Mantelfläche erhöht, anstatt - wie beim aktiven Erddruck vorausgesetzt - abgemindert (Abb. 1).

Setzt man nun für die Belastung an der Grenzfläche zwischen Kies und Müllkörper, entsprechend der Bewegungsrichtung, den Erdwiderstand ein, so zeigen bereits überschlägige quantitative Untersuchungen, daß die ermittelten waagerechten Belastungen unplausibel und unwirtschaftlich hoch werden.

Somit versagen die in der Bodenmechanik üblichen Verfahren auf der Grundlage plastischer Grenzzustände. Eine Berechnung kann also nur als Abschätzung der Größenordnung der Belastung unter Berücksichtigung elastisch/plastischer Verformungen vorgenommen werden. [1] Diese führen zu Umlagerungen der Radial- und Tangentialspannungen innerhalb der Ummantelung, welche ihrerseits die waagerechte Komponente der äußeren Belastung auf den Schacht bestimmen. [2]

Die mit den Druckmeßdosen in dem Kieskörper gemessenen Spannungen bestätigen erwartungsgemäß die Beziehung $\sigma_{\text{lotrecht}} \gg \sigma_{\text{tangential}} > \sigma_{\text{radial}}$, wie folgende Abb. 7 beispielhaft zeigt:

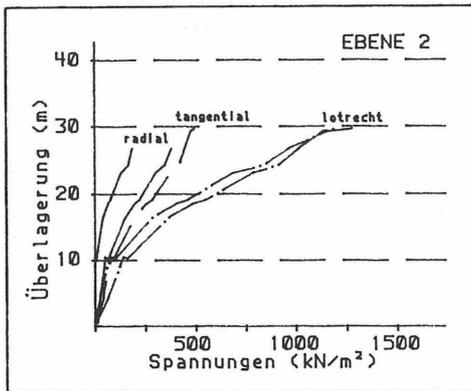


Abb. 7: Spannungen am Schachtmantel

Allerdings ist festzustellen, daß die gemessenen tangentialen Spannungen verhältnismäßig niedrig ausfallen; der Anteil der Gewölbewirkung des Kieskörpers am Tragverhalten des Gesamtsystems erweist sich geringer als erwartet.

Die theoretischen Überlegungen [2], daß die radiale (und lotrechte) Belastung des Schachtes erheblich höher ist als die Ergebnisse gebräuchlicher Berechnungsansätze, wurden durch die Messungen im Maßstab 1 : 1 bestätigt, wobei sich allerdings durch den raschen Aufbau der Deponie bisher keine gesicherten Aussagen über den Endspannungszustand treffen lassen.

7. Schlußfolgerungen

Die beim Wiederaufbau eines Schachtes in der Deponie Mechernich durchgeführten Druck- und Verformungsmessungen haben bestätigt, daß die Spannungen innerhalb einer Kiesummantelung um ein mehrfaches höher sind als mit den klassischen räumlichen Erddruckverfahren berechnet. Vor der Anwendung dieser Verfahren für die Ermittlung äußerer Kräfteinwirkungen auf kiesummantelte Schächte in Deponien wird gewarnt.

Grundsätze, nach denen Berechnungen auf der Basis der Elastizitätstheorie vorgenommen werden können, wurden bereits früher [2] vorgestellt; deren Überprüfung zeigt, daß auch diese nur mit ungünstigen Ansätzen der sowohl Ausgangsbedingungen als auch Sicherheitsbeiwerte anzuwenden sind.

Literatur

- [1] Gudehus, G.: "Erddruckermittlung" in Grundbautaschenbuch, 3. Auflage, Teil 1;
- [2] Ney, P.: "Schäden an Schächten in Deponien" in Deponie 2, EF-Verlag;
- [3] Rojek, E.: Zur Berechnung des räumlichen Erddrucks auf kreiszylindrische Bauwerke, 1984;
- [4] Steinfeld, K.: Über den Erddruck auf Schacht- und Brunnenwandungen, 1958;
- [5] Steinfeld, K.: Über die Wechselwirkung tangentialer und radialer Erdspannungen vor einem zylindrischen Verdrängungskörper (ohne Wandreibung), 1972;
- [6] Walz, B.: Erddruckspannungen auf zylindrische Baukörper im Vergleich mit Messungen am Modell, 6. Exmpl. Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau, Wien 1976;
- [7] Wiemer, K.: Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien, 1982;

MENZEL

Kläranlagenbau GmbH

Ihr Partner für den Umweltschutz.

**Beratung – Projektierung –
Bauausführung
in der Abwasserbeseitigung:**

**7798 Pfullendorf
Industriestr. 3
Telefon (07552) 381
Telefax (07552) 7559**

STATISCHE BERECHNUNG UND BAUAUSFÜHRUNG VON DEPONIEDRÄNAGEN

Dipl.-Ing. Th. Prein, Dr.-Ing. E. Reuter

Gliederung

1. Statische Berechnung
 - 1.1 Berechnungsverfahren
 - 1.2 Berechnungsgrundlagen
 - 1.2.1 Bodenmechanische Kennwerte
 - 1.2.2 Rohrmaterialien
 - 1.3 Modellberechnungen
2. Anforderungen an Dränagesysteme
 - 2.1 Auflager
 - 2.2 Dränagerohre
3. Bauausführung
4. Literatur

1. Statische Berechnung

1.1 Berechnungsverfahren

Die statische Berechnung von Rohrleitungen in Deponien wird heute zumeist nach dem ATV Regelwerk A 127 "Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen" durchgeführt, obwohl die Grundlagen zur Erstellung der Richtlinie unter gänzlich anderen Bedingungen ermittelt wurden; z.B. muß im Deponiebereich normalerweise mit deutlich größeren Überdeckungen als im üblichen Rohrleitungsbau gerechnet werden. Dieser Feststellung kommt dermaßen große Bedeutung zu, da die der Berechnung zugrunde gelegten Formeln einen mathematisch diffizilen Sachverhalt durch praktikable Näherungen abbilden.

Der statischen Berechnung nach dem Arbeitsblatt A 127 liegt die Idealisierung des "Schubsteifen Balkens auf elastischer Bettung" zugrunde. Das Rohr wird als in ein verformbares Medium eingebettet angesehen; statisch gesehen ist dieses System hochgradig unbestimmt. Durch Beschreibung der Auflagerreaktionen mittels experimentell nachgewiesener Lastverteilungen wird diese Berechnung einer einfachen Handhabung ermöglicht. Grundlage dieser Berechnung ist die nur noch im Scheitel und den Kämpferpunkten geforderte Stabilität zwischen Rohr und umgebenden Boden; Effekte der Theorie 2. Ordnung bleiben unberücksichtigt.

Die horizontale Stützung aus dem Erddruck q_r und dem Reaktionsdruck q_r^* behindert die Verformung bzw. lokale Veränderung des Durchmessers. Daraus resultiert, daß biegegewiche Rohre, die zumeist im Deponiebereich eingesetzt werden, eine Stützung durch die Bettung im Bereich der Kämpferzone erfordern. Ein Ausweichen gegenüber der Auflast aus Überschüttung ist jedoch nur soweit möglich, wie die Eigensteifigkeit S_r und die Bettung eine Verformung zuläßt.

Die Umlagerung der Spannungen infolge der Rohrverformung wird in der ATV A 127 durch Einführung zweier Konzentrationsfaktoren berücksichtigt, die die Rohrsteifigkeit und die Verformungsmöglichkeiten der Bettung berücksichtigen. In die Ermittlung der Faktoren gehen Angaben zu

- dem maximalen Konzentrationsfaktor $\max \lambda$ für ein biegesteifes Rohr in einem unendlich breiten Graben (Dammschüttung)
- Verformungsmodule E des Bodens über, neben und unter dem Rohr
- Steifigkeitsverhältnis V_{B} des Systems Rohr / Auflager
- Erddruckbeiwert k_{\pm}

ein.

Die statische Berechnung der Schnittgrößen und Verformungen des Rohres erfolgt nach den Grundlagen der Kreisringstatik.

1.2 Berechnungsgrundlagen

1.2.1 Bodenmechanische Kennwerte

Große Bedeutung kommt bei der Berechnung den bodenmechanischen Rechenansätzen zu, da für die im Deponiebereich eingesetzten Erdstoffe und insbesondere für das Zusammenwirken der unterschiedlichen Stoffe nur unzulängliche Informationen vorliegen. Auch ist über die Deformationsgeschichte der in der Umgebung des Rohres eingebauten bzw. vorhandenen Böden keine Aussage vorhanden (LEONHARDT, 1984). Die in der ATV A 127 angegebenen bodenmechanischen Rechengrößen sind entsprechend nur als Richtwerte zu betrachten und vom bearbeitenden Ingenieur gewissenhaft zu überprüfen.

Dies wird am deutlichsten, wenn man die im Arbeitsblatt A 127 üblicherweise verwendeten Verformungsmodule (Abb. 1) betrachtet. Dabei fällt zunächst auf, daß für Müll kein definierbarer, geschweige denn ein konstanter Schubmodul angegeben werden kann. Auch die im Deponiebereich vorherr-

Zuschenden Überschüttungshöhen unterscheiden sich deutlich, die Spannungen aus Auflast liegen meist erheblich über dem Grenzwert von $0,1 \text{ N/mm}^2$ (entsprechend einer Müllauflast von ca. 6 bis 8 m), für den die Parameter der Richtlinie ermittelt wurden. Die Verformungsmodule können daher keinesfalls aus der Richtlinie übernommen werden, sondern müssen den Bedingungen der Deponie angepaßt werden.

Bodengruppe	nichtbindig	schwachbindig	Mischböden	Lehm, Ton
	G 1	G 2	G 3	G 4
Wichte	20	20	20	20
Reibungswinkel	35	30	25	20
E-Modul $D_{pr}=97\%$	23	11	8	6
E-Modul $D_{pr}=95\%$	16	8	5	4

Abb. 1: Verformungsmodul nach ATV A 127

Zweckmäßigerweise sollten die für die mineralische Dichtung zugrundegelegten Werte für das verwendete Material aus Laborversuchen ermittelt werden. Verformungsmodule können aus KD Versuchen ermittelt werden. Unter Vernachlässigung der Seitendehnung kann der Verformungsmodul vereinfachend zu $E_v = 0.75 * E_g$ berechnet werden. Wichtig ist dabei, daß die Versuche auch in den Spannungsbereichen ausgeführt werden, die den späteren Bedingungen entsprechen.

Untersuchungen über die Auswirkung unterschiedlicher Einbauwassergehalte auf den Verformungsmodul und die daraus resultierenden Eindrückungen von Rohrleitungen in mineralische Dichtungen wurden ebenfalls untersucht und sind in REUTER/PREIN, 1989 enthalten.

Für die als Rohrbettungsmaterial im Deponiebereich üblicherweise verwendeten Kieskörnungen 16/32 mm liegen nur unzureichende Erkenntnisse vor; HOCH, 1989 veröffentlichte Werte von 20-60 N/mm² für eine Kieskörnung 16/32 mm für vertikale Auflastspannungen bis 1000 N/m². Weitere Werte für Verformungsmodule, wengleich auch nicht für Deponien, können SIMONS, 1987 sowie der EAU, 1985 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau entnommen werden. Dort wird für einem Kies ohne Sandfraktion ein kalkulatorischer Steifemodul von 100 - 200 N/mm² angegeben, aus dem ein entsprechender Verformungsmodul ermittelt werden kann. Simons gibt für gleichkörnige Kiese mittlere Steifemodule von 117 - 159 N/mm² bei Auflastspannungen von 600 bis 1400 N/mm² an. In Abb. 2 sind diese Werte vergleichensweise zusammengestellt.

Auflastspannung [N/mm ²]	A 127	Hoch E _z [N/mm ²]	Simons	EAU
0,10	16-23	20	18	-
0,60	-	40	88	-
1,00	-	60	-	-
1,50	-	-	146	150

Abb. 2: Spannweite ansetzbarer Verformungsmodule E_z

Auch wenn die aufgeführten Zahlen keineswegs als ausreichend abgesichert angesehen werden können, um eine Bemessung im Deponiebereich vornehmen zu können, wird doch deutlich, daß der Auflastspannung eine große Bedeutung zukommt. Die vorliegenden ersten Untersuchungen müssen weiter abgesichert werden; auch der Einfluß der Kornform.

Auch für den Verformungsmodul des Deponiekörpers, der in den Rechenwert E_3 eingeht, liegen keine abgesicherten Daten vor. Vergleichsweise kann hier der Steifemodul der EAU, 1985 für organischen Klei mit $0,4-3,0 \text{ N/mm}^2$ (entsprechend einem Verformungsmodul von $0,3-2,2 \text{ N/mm}^2$) oder von Torf mit $0,4-1,0 \text{ N/mm}^2$ ($0,3-0,75 \text{ N/mm}^2$) herangezogen werden. Auch hier ist wegen der Inhomogenitäten im Deponiekörper Vorsicht bei der Anwendung zu hoher Werte, wie z.B. der Übernahme der Werte der ATV A 127, die Verformungsmodule von $2-16 \text{ N/mm}^2$ vorsieht, angebracht.

1.2.2 Rohrkenwerte

Z. Zt. werden im Deponiebereich hauptsächlich Rohre aus Thermoplasten, vornehmlich aus hochdichtem Polyethylen (PEHD), verwendet. Von den Materialeigenschaften ist für die statische Berechnung vor allem der Kriechmodul maßgeblich. Thermoplaste haben die Eigenschaft, bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliches Verhalten zu zeigen, insbesondere gilt dies auch für den Kriechmodul. Weiterhin spielen das einwirkende Medium und die zeitliche Dauer der Einwirkung eine große Rolle, da sie die Festigkeitseigenschaften des Rohres maßgeblich beeinflussen.

Der Einfluß der Temperatur und der Einwirkdauer auf die Festigkeit des Rohres ist aus Zeitstandsuntersuchungen ausreichend bekannt. Ein weiterer, die Materialeigenschaften beeinflussender Faktor ist der Medienfaktor, der den schädigenden Einfluß der umgebenden Flüssigkeit berücksichtigt und über den für Sickerwasser bislang nur unzureichende Kenntnisse vorliegen.

Zur statischen Berechnung von Sickerwasserleitungen aus PEHD müssen die Materialkennwerte unter Beachtung der oben angeführten Faktoren ermittelt werden. Damit ergibt sich für den Elastizitätsmodul unter Dauerbelastung die Beziehung

$$E_L = E_K * a_b * a_T * a_M$$

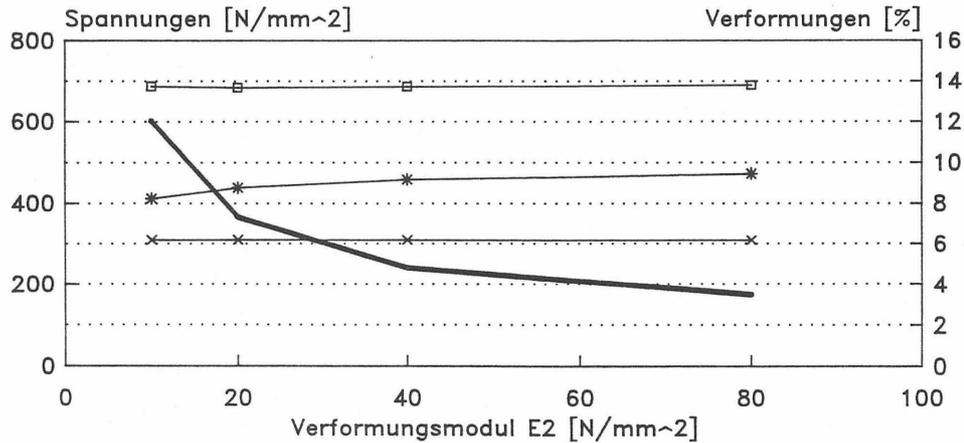
Aus der ATV A 127 kann der Kurzzeitelastizitätsmodul und der Zeitabminderungsfaktor für PEHD mit 0,15 entnommen. Nach HOCH, 1988 kann der Temperaturfaktor für die in Deponien meist zugrundegelegte Temperatur von 30°C mit 0,75 angesetzt werden. Für den Mediumfaktor liegen z. Z. noch keine Werte vor. Auch der Gelbentwurf der DIN 19 667, der der Öffentlichkeit zur Zeit zur Prüfung und Stellungnahme vorliegt empfiehlt zwar die Anwendung der oben genannten Formel, gibt aber keine Werte für die einzusetzenden Parameter an.

Weiterhin ist auch die Querschnittsschwächung des Rohres durch die Lochung oder Schlitzung zu berücksichtigen. Nach BRÖMSTRUP, 1988 ist hierbei von einer 10 bis 30 % Minderung je nach Anordnung der Schlitzung oder Lochung auszugehen.

1.3 Modellberechnungen

Unter Berücksichtigung der oben genannten Voraussetzungen wurden mehrere Modellberechnungen in Form einer Parameterstudie durchgeführt, um die Auswirkungen der Veränderung der einzelnen Parameter aufzuzeigen.

Ausgehend von einem gelochten Sickerwasserrohr aus PEHD, einer Auflastspannung von 750 N/mm² (entsprechend 50 m Müllhöhe bei einer Wichte von 15 KN/m³) wurden der Verformungsmodul der Sickerwasserrigole mit der Körnung 16/32 mm zwischen $E = 10 - 80$ N/mm² variiert (Abb. 3). Nach HOCH, 1989 sollte für den vorgegebenen Modellfall ein Verformungsmodul von ca. 47,5 N/mm² angesetzt werden. Mit diesen Werten wird die zulässige Rohrverformung von 6,0 % nach ATV A 127 nicht überschritten. Weicht der tatsächliche Verformungsmodul jedoch deutlich nach unten ab, wird diese Grenze unterschritten. Wichtig wird dies besonders für die Berechnung von Rohrleitungen in sehr hohen Deponien, da oberhalb von einer Spannung von 1000 N/mm² nach HOCH, 1989



$E_4 = 4 \text{ N/mm}^2$

—□— q_v —×— q_h —*— q_{h^*} ——— Δv

Abb. 3: Einfluß Verformungsmodul E_2

ein konstanter Verformungsmodul von 60 N/mm^2 angesetzt werden soll. Hier wird dann rechnerisch häufig die zulässige Verformung von 6 % überschritten.

In gleicher Weise wurde der Verformungsmodul der mineralischen Dichtung variiert. Die Verformungen bei den zugrundegelegten Verformungsmodulen zwischen $4 - 16 \text{ N/mm}^2$ sind in Abb. 4 dargestellt. Es zeigt sich, daß der Einfluß auf die Rohrverformungen lange nicht so groß ist, wie der des Verformungsmoduls der Dränmaterials.

Neben der Ermittlung der bodenmechanischen Kennwerte der einzelnen Komponenten des Systems Rohr - Mineralische Dichtung - Dränrigole kommt vor allem auch der Frage Bedeutung zu, ob das System sich gemäß dem Modell des schubsteifen Balkens verhält, berücksichtigt man daß der Bereich oberhalb und seitlich des Rohres, für den definierte bodenmechanische Kennwerte angegeben werden können nur sehr begrenzt ist. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Für ein Versuchsfeld der Zentraldeponie Hannover, die mit einer Schütthöhe des Deponiekörpers von ca. 100 m über den umgebenden Gelände, zu den großen Deponien gerechnet werden kann, wurden von der Ingenieurbüro Wersche GmbH, Berechnungen mit unterschiedlichen Rohrwandstärken vorgenommen. Ziel der Untersuchungen war der Versuch die oberhalb der zulässigen Werte liegenden Verformungen der Rohrleitungen einzugrenzen. In Abb. 5 sind die Ergebnisse dieser statischen Berechnung dargestellt. Es zeigt sich, daß durch Wahl einer Wandstärke deutlich größer als der Rohrreihe 5 entsprechend, die Verformungen vermindert werden können. Dennoch bleiben bei dermaßen großen Auflastspannungen die Verformungen oberhalb der Grenzwerte der ATV A 127.

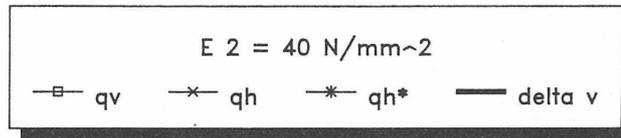
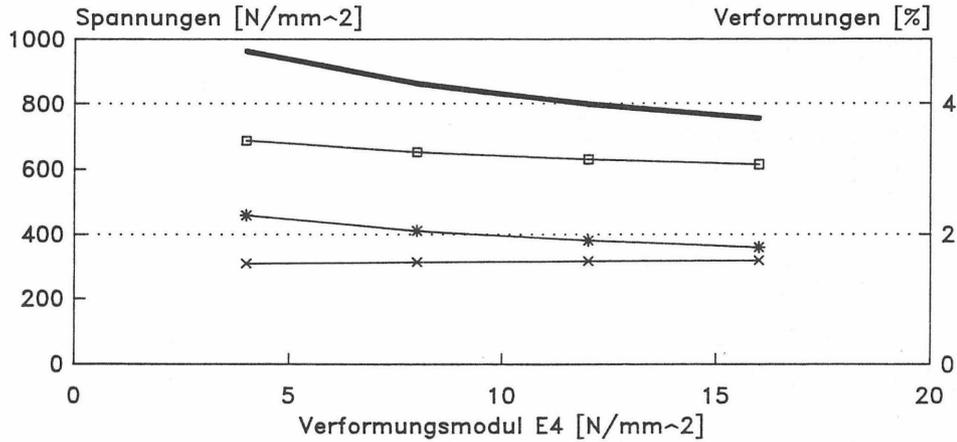


Abb. 4: Einfluß Verformungsmodul E 4

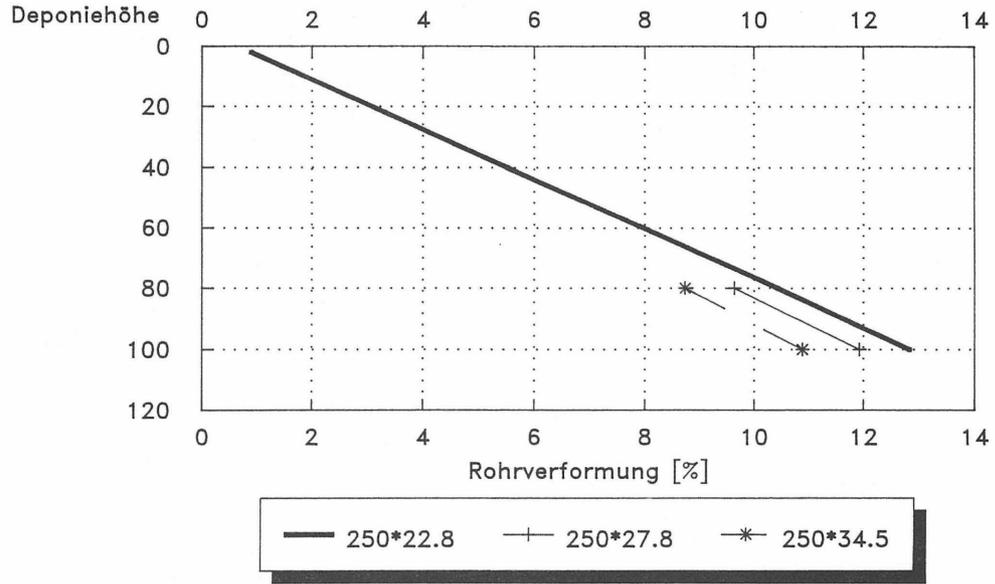


Abb. 5: Einfluß der Rohrwandstärke

2. Anforderungen an Dränsysteme

3.1 Auflager

An das Auflager des Sickerwassersystems wird die Forderung gestellt einerseits die statischen Erfordernisse einer ausreichenden Bettung und damit der Lastweiterleitung in den Untergrund Rechnung zu tragen, andererseits das fließende Sickerwasser möglichst aufstaufrei in das Sickerrohr zu transportieren. Da eine Auflagerung der Sickerrohre direkt auf der Kunststoffdichtungsbahn unter Beibehaltung des geforderten Auflagerwinkels von 120° nur schwer möglich ist, wird in der Praxis meist dem Umstand der ausreichenden Bettung derfolge Rechnung getragen, daß die Sickerrohre oberhalb der Kunststoffdichtung in einem Sandbett verlegt werden, womit ein aufstaufreies Auflager nicht mehr möglich ist.

Andererseits sind bereits in vielen Fällen Sickerrohre direkt in speziell geformten Gräben mineralischer Dichtungen verlegt worden. Günstig wäre es, wenn man sich die hierbei gewonnenen Erfahrungen in der Weise zunutze machen könnte, indem die flächig verlegten Kunststoffdichtungsbahn direkt an das Sickerrohr angeschweißt würden oder ein entsprechendes Formteil verwendet würde, daß die Verlegung der Rohrleitung ohne zusätzliche Sandbettung ermöglicht.

3.2. Dränage

Aufgrund der in der letzten Zeit häufiger festgestellten Inkrustationen in Sickerrohren und Rigolen besteht die Tendenz zu immer größeren Kornabmessungen des Dränagematerials. Das daraus auch höhere Belastungen auf das Rohr einwirken sei an einer Modellrechnung dargestellt:

Auf ein Einzelkorn des Dränsystem mit dem kennzeichnenden Durchmesser d_k wirkt die Last σ_0 auf einer Kreisfläche $A_k = d_k^2/4 * \pi$. Die Last wird auf der Unterseite mit einer angenommenen Fläche vom 1 mm^2 weitergeleitet. Mit diesen Annahmen wurden für bestimmten Körnungen die in der Abb. 6

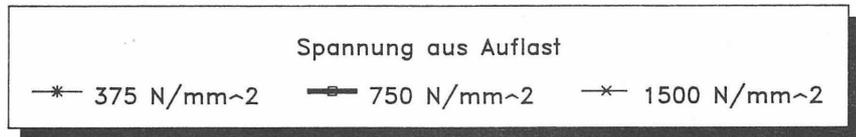
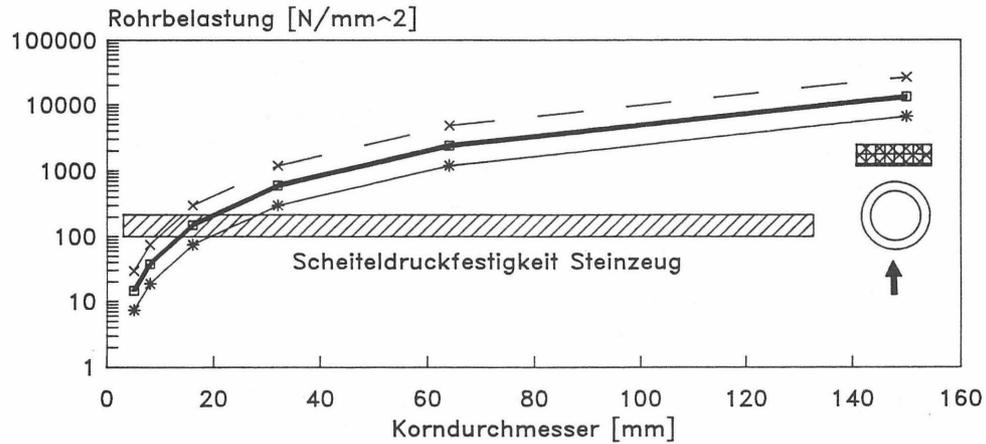


Abb. 6: Korngrößeneinfluß Dränmaterial

quantifizierten Belastungen der Rohrleitung ermittelt.

Diese Abbildung soll verdeutlichen, daß der bei der Festlegung der Körnung der Drainage auch die Frage des Rohrmaterials eine Rolle spielt. Grobe Kieskörnungen stellen auch höhere Forderungen an die Festigkeit des Rohrmaterials. Drainmaterial und Rohrkenwerte müssen sorgsam auf einander abgestimmt werden.

3. Bauausführung

Die Verlegung der Leitungen erfolgt meist nach den in DIN 4033 festgelegten Grundsätzen. Entgegen der Berechnung, die für im Deponiebereich verlegte Rohrleitungen von einem Auflagerwinkel von 90° ausgeht, ist in der Praxis stets ein Auflagerwinkel $> 120^\circ$ herzustellen. Meist wird das Kunststoffrohr nicht direkt auf der Dichtungsbahn aufgelagert, sondern in einem Sandbett, evtl. auch Tonbett oder vergütetem Sandbett, verlegt, da das Einfügen der Kunststoffdichtungsbahnen in ein vorgeformtes, dem Rohrhalmeser entsprechendes Auflager baupraktische Schwierigkeiten aufweist. Abb. 7 zeigt beispielhaft ein solches Auflager.

Da eine solche Ausführung jedoch nicht mit der Anforderung eines aufstaufreien Auflagers zusammenpaßt, wurde in der Ingenieurbüro Wersche GmbH für ein Versuchsfeld der Zentraldeponie Hannover eine Variante entwickelt, die Erfahrungen, die auf der Zentraldeponie Hannover mit der Verlegung von Rohrleitungen aus Kunststoff und Steinzeug direkt im Tonaufleger vorhanden sind, nutzt und der Forderung nach einem aufstaufreiem Auflager nahe kommt. Abb. 8 zeigt die vorgesehene Ausführung. Ein Formteil aus PEHD mit einem Auflagerwinkel von 130° wird direkt in das Tonaufleger eingebaut. Der Innendurchmesser entspricht dem Rohraußendurchmesser mit einer Toleranz. Seitlich werden die PEHD Dichtungsbahnen an das Kunststoffformteil angeschweißt, anschließend wird ein Geotextil in das Formteil eingelegt und in das so vorbereitete Auflager die Rohrleitung aus

Sickerwasserrigole

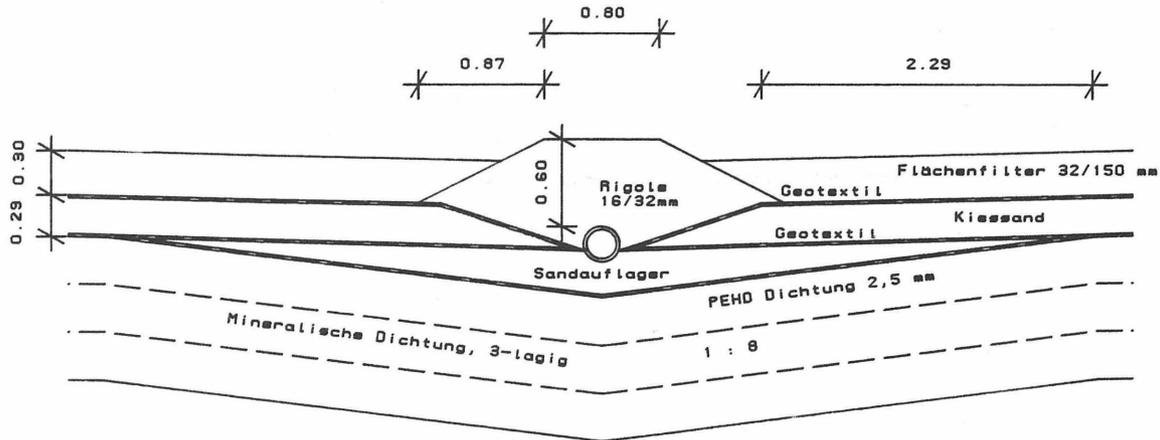


Abb. 7: Übliches Rohrauflager

Sickerwasserrigole

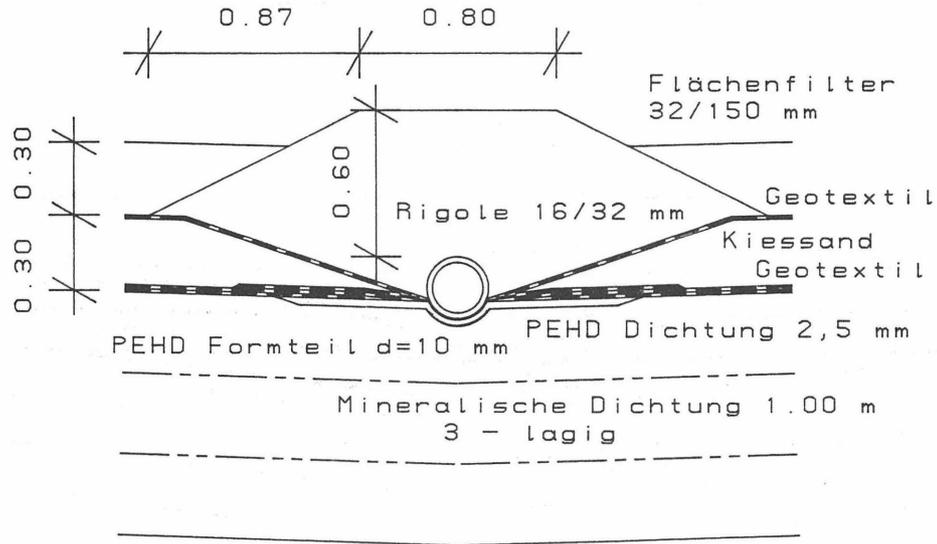


Abb. 8: Aufstaufreies Rohrauflager

PEHD eingefügt. Das zwischenliegende Geotextil sorgt im Bereich zwischen Rohr und Formteil für die Verteilung von Spannungsspitzen, die durch vorhandene Unebenheiten auftreten könnten.

Über die Erfahrungen mit dieser Variante, die im Rahmen des Versuchsfeldes ausgeführt werden soll, wird zu einem späteren Zeitpunkt zu berichten sein.

4. Literatur

- Abwassertechnische Vereinigung (ATV)
Regelwerk A 127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskäna-
len und -leitungen
St. Augustin, 1984
- Brömstrup, H.
Rohre aus PEHD im Deponiebereich
Vortragsmanuscript, 1988
- Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau
Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" EAU 1985
Berlin, 1985
- Hoch, A.
Statische Berechnungen von Sickerrohren unter Abfalldeponien
Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesgewerbeanstalt Bayern, Nürnberg, 1988, 103 - 120
- Hoch, A.
Die statische Berechnung von Schächten und Sickerrohren in Deponien
Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesgewerbeanstalt Bayern, Nürnberg, 1989, S. 201 - 223
- Leonhard, G.
Einige Bemerkungen zum statischen und bodenmechanischen Konzept des ATV Arbeitsblattes A 127
Korrespondenz Abwasser, Heft 6, 1984, S. 528 - 531

- Reuter, E. / Prein, Th.
Untersuchungen zur Standsicherheit von Dränagerohren
in Mülldeponien
Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesge-
werbeanstalt Bayern, Nürnberg, 1989, S. 225 - 257
- Simons, H.
Studienunterlagen TU Braunschweig
Institut für Grundbau und Bodenmechanik TU Braun-
schweig, 1987

Dipl.-Ing. Thomas Prein,
Ingenieurbüro Wersche GmbH, Büssingstr. 8, 3180 Wolfsburg
Dr.-Ing. Ernst Reuter,
Ingenieurbüro Wersche GmbH, Schierholzstr., 3000 Hannover

UNTERSUCHUNGEN ZUR SCHUTZWIRKUNG VON GEOTEXTILIEN

U. Sehrbrock

1. Einleitung

Zwischen Kunststoffdichtungsbahn und Dränage eines Deponieabdichtungssystems ist nach derzeitigen Richtlinien (z.B. RdErl. d. MU. vom 24.06.88, Niedersachsen) eine Schutzschicht anzuordnen. Diese Schutzschicht soll verhindern, daß die Kunststoffdichtungsbahn infolge hoher Müllauflasten oder Belastungen durch den Fahrbetrieb beschädigt wird.

Die Gefahr einer Beschädigung ist - neben der Höhe der Auflast - von der gewählten Körnung (Korngröße und Kornform) des Dränagematerials abhängig. Da als Flächendränage zur Zeit im Regelfall ein Kies mit der Körnung 16/32 mm eingebaut wird, muß die Schutzschicht in der Lage sein, die sich aus Belastung und Körnung ergebende punktförmige Belastung soweit zu verteilen, daß der Untergrund - mit der daraufliegenden Dichtungsbahn - nur noch flächig beansprucht wird.

Die Art der Schutzschicht ist nicht festgelegt, so daß der Planer zwischen verschiedenen Möglichkeiten wählen kann:

- Sandschicht
- Schicht aus bindigem Material (es ist darauf zu achten, daß dieses Material steinfrei ist)
- Geotextil
- Kombination verschiedener Materialien (z.B.: Sandschicht mit darunterliegendem Geotextil)

Eine Schutzschicht aus Sand, welche bei einer entsprechenden Dicke (ab ca. $d=10$ cm) eine optimale Schutzlage darstellt, ist nur mit sehr großen Schwierigkeiten einzubauen. Zum einen ist die Gefahr einer Beschädigung der Dichtungsbahn während des Einbaus der dünnen Schicht relativ groß, zum anderen ist schwer zu kontrollieren, inwieweit die eingebaute Dicke der Sandschicht während des Einbaus der Dränageschicht verändert wurde. In Böschungsbereichen ist ein Einbau einer Sandschicht ab einer gewissen Böschungsneigung überhaupt nicht mehr möglich.

Gleiches gilt für den Einbau einer Schutzschicht aus bindigem mineralischem Material. Bei der Wahl eines solchen Materials ergeben sich noch weitere Schwierigkeiten, da sich die Verteilung über eine Fläche schwieriger als bei Sand gestaltet und zusätzlich eine Verdichtung erforderlich wird. Die Auswahl eines absolut steinfreien Materials würde weitere große Probleme bereiten.

Wegen der bei Einbau einer mineralischen Schutzschicht in Kauf zu nehmenden Schwierigkeiten wird häufig ein Geotextil als Schutzlage gewählt. Diese Produkte bieten gegenüber den anderen Möglichkeiten in einigen Aspekten erhebliche Vorteile: Geotextilien werden industriell - und damit durchgehend kontrollierbar - hergestellt, sie sind leicht zu transportieren und vor allem einfach und schnell auf der Baustelle zu verlegen.

Entwickelt aus Geotextilien für andere Zwecke (Filtern, Trennen) haben verschiedene Hersteller mittlerweile die unterschiedlichsten Formen und Kombinationen von Geotextilien für einen Einsatz als Schutzlagen im Deponiebau auf den Markt gebracht. Es werden angeboten:

- vernadelte Vliesstoffe
- Verbundstoffe aus miteinander vernadeltem Gewebe und Vlies
- mit Bentonit gefüllte, miteinander vernadelte Vliesstoffe (Bentonitmatte)

Bisher gibt es zur Bemessung der geforderten Schutzlage weder einheitliche Richtlinien noch einheitliche Prüfvorschriften. Bei der Bewertung der Wirkung geotextiler Schutzlagen hat die sich hieraus ergebende Unsicherheit dazu geführt, daß verschiedene Stellen mit unterschiedlichen Methoden prüfen und nach unterschiedlichen Kriterien die Eignung des Prüflings feststellen.

Nachfolgend werden einige am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig zur Untersuchung des Tragverhaltens geotextiler Schutzlagen durchgeführte Untersuchungen beschrieben und die angewendeten Auswertungsmethoden vorgestellt.

2. Untersuchungen zur Schutzwirkung von Geotextilien

2.1 Allgemeines

Die Schutzwirkung von Geotextilien beruht auf zwei Mechanismen. Zum einen werden die Einzelkörner der Dränageschicht von den einzelnen Fasern des Vlieses eingehüllt, was zu einem Abpuffern der aufgrund der Geometrie des Einzelkornes entstehenden punktförmigen Belastungen führt (s. Bild 1). Durch Zusammendrückung des Geotextils unterhalb der Körner vergrößern die Einzelfasern der Schutzlage über ihre Einzelzugfestigkeit bzw. über den Verbund mit anderen Fasern die Aufstandsflächen der Kieskörner.

Neben dieser sehr kleinräumigen Lastverteilung unterhalb der Einzelkörner kann mit einer geotextilen Schutzlage noch eine großräumigere Lastverteilung erreicht werden: Dadurch, daß bei Einsinken zweier benachbarter Einzelkörner das Geotextil innerhalb des Zwischenraumes der Einzelkörner gedehnt wird, wird infolge einer gewissen Zugfestigkeit der geotextilen Schutzlage eine großräumigere Lastverteilung erreicht (s. Bild 2). Diese Art des Lastabtrags wird dabei umso bedeutender, je weiter die Einzelkörner einsinken und die Zugfestigkeit der Schutzlage aktivieren.

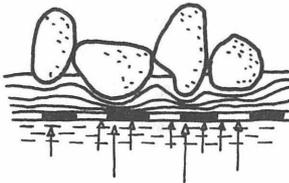


Bild 1: Puffern

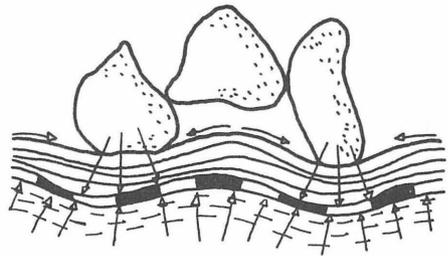


Bild 2: Verteilen

Die Wirkung der Schutzlage und die Auswirkungen unterschiedlicher Eigenschaften einzelner, die Schutzwirkung beeinflussender Größen, beispielsweise des Bodens (Wassergehalt, Scherparameter), des Kieses (Kornform, Korngröße) und der Schutzlage selbst, sind sehr kompliziert in ihrem Zusammenwirken und bisher nicht berechenbar. Geotextilprüfungen, wie sie für andere Einsatzbereiche dieser Produkte entwickelt worden sind, wie z.B.

- Stempeldurchdruckversuch (DIN 54 307),
- Kegelfallversuch,

- Prüfung von Zugfestigkeit und Dehnung (in Anlehnung an DIN 53 857),

liefern zwar Kennwerte der Geotextilien, helfen aber bei der Einschätzung der Schutzwirkung nicht weiter. Die festgestellten Kennwerte beschreiben ein Verhalten der Geotextilien, welches bei einem Einsatz als Schutzlage nicht oder nur in geringem Maße gefordert wird.

2.2 Kleinräumige Lastverteilung (Pufferwirkung)

Zur Bestimmung der kleinräumigen Lastverteilung durch ein Geotextil unter einer punktförmiger Auflast und zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Materialparameter auf die Lastabtragung wurde mit verschiedenen Verbundstoffen ein einfacher Versuch durchgeführt: Die Geotextilien werden auf eine Stahlplatte gelegt. Zwischen Stahlplatte und Prüfling wurde ein Millimeterpapier unter einem Durchschlagpapier angeordnet. Eine auf dem Verbundstoff plazierte Kugel wurde daraufhin über einen Zeitraum von einer Minute belastet, so daß sich eine entsprechend beanspruchte Fläche durch das Kohlepapier auf dem Millimeterpapier abzeichnete. Die Höhe der Belastung wurde so gewählt, daß sich in der beschriebenen Versuchsdurchführung gut ablesbare Abbildungen ergaben. In den folgenden Bildern 3.1 bis 3.6 sind die so sichtbar gemachten Belastungsflächen wiedergegeben.

Es wurden zwei von den Flächengewichten her gleiche Serien von Verbundstoffen untersucht. Eine Produktgruppe war aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD), die andere aus Polypropylen (PP) gefertigt. Die untersuchten Verbundstoffe unterschieden sich - bei einem durchgehend gleichbleibenden Gewebegewicht von 335 g/m^2 - innerhalb einer Gruppe lediglich hinsichtlich des Flächengewichtes der verwendeten Vliese (400 g/m^2 , 600 g/m^2 , 900 g/m^2).

Die Ergebnisse aus diesem Versuch zeigen, daß sowohl für Schutzlagen (Verbundstoffe) aus PEHD als auch für solche aus PP deutlich eine Zunahme der erzielbaren Lastausbreitung mit Zunahme des Flächengewichtes des Vlieses zu verzeichnen ist. Der Vergleich zwischen den sich entsprechenden Verbundstoffen aus den beiden berücksichtigten unterschiedlichen Materialien belegt, daß der PP-Verbundstoff beinahe durchgehend eine geringfügig bessere Lastverteilung aufweist als das vergleichbare Produkt aus PEHD.

Rohmaterial:

PEHD

PP

Bild 3.1:

Gewebe 335 g/m²
Vlies 400 g/m²
65 mm²

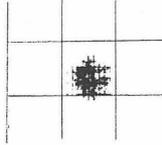


Bild 3.2:

Gewebe 335 g/m²
Vlies 400 g/m²
67 mm²

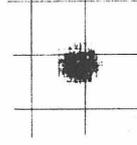


Bild 3.3:

Gewebe 335 g/m²
Vlies 600 g/m²
83 mm²

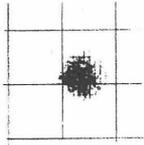


Bild 3.4:

Gewebe 335 g/m²
Vlies 600 g/m²
86 mm²

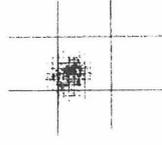


Bild 3.5:

Gewebe 335 g/m²
Vlies 900 g/m²
95 mm²

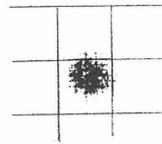
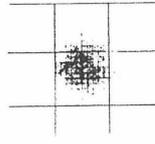


Bild 3.6:

Gewebe 335 g/m²
Vlies 900 g/m²
101 mm²



Der Unterschied im mechanischen Verhalten, das sich in diesen Ergebnissen ausdrückt, zwischen einem Vliesstoff aus PEHD und einem PP-Vlies rührt wahrscheinlich zum einen daher, daß ein materialbedingt unterschiedliches Elastizitätsverhalten vorliegt. Zum anderen ist produktionsbedingt eine Faser aus PP einfacher und intensiver zu kräuseln und zeichnet sich dadurch durch eine größere Sprungkraft aus als eine Faser aus PEHD.

Neben den produktbedingten Unterschieden zeigen die oben dargestellten Versuchsergebnisse weiter, daß eine gleichmäßige, flächenhafte Lastverteilung unter einer reinen Geotextillage - zumindest bei den verwendeten Produkten heute üblicher Gewichtsklassen - nicht zu erreichen ist. Die Pufferwirkung kann allenfalls dazu dienen, Druckspitzen unter scharfkantigen Einzelkörnern durch die kleinräumige Lastverteilung auf ein unschädliches Maß zu reduzieren.

2.3 Großflächige Lastverteilung

2.3.1 Vorversuche

Für erste Vorversuche zur Untersuchung der Schutzwirkung von Geotextilien wurde vor einiger Zeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig ein Versuchsstand eingerichtet, mit dem in sechs einzelnen Ständen einige Versuchsreihen zu dieser Thematik durchgeführt wurden.

Eine der aus runden Töpfen mit Durchmessern von ca. 130 mm bestehenden, mit bis zu 1,5 MN/m² beaufschlagbaren Einheiten ist mit Angaben zu der Anordnung der einzelnen Lagen in Bild 4 dargestellt.

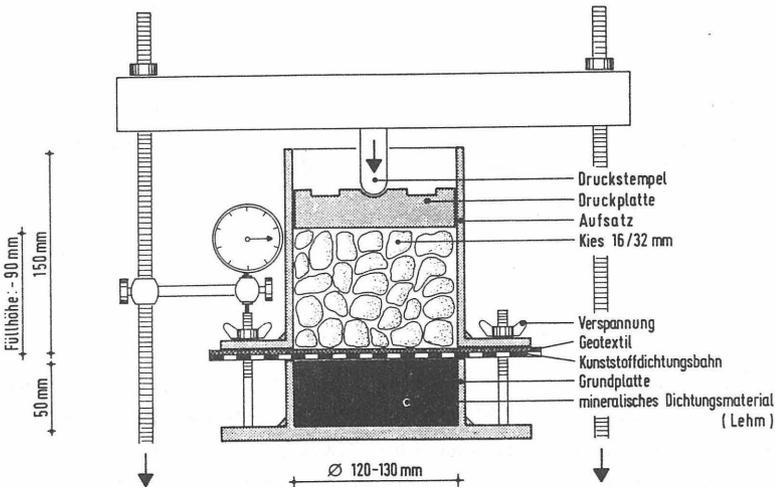


Bild 4: Drucktopf Ø 130 mm

Bei ersten Versuchen verwendete Ersatzmaterialien statt des aufwendig einzubauenden bindigen Bodens als unterste Schicht führten zu keinem befriedigenden Ergebnis. Wie den in Bild 5 dargestellten Last-Verformungskurven zu entnehmen ist, war bei Belastungen von etwa 200 kN/m² ein Zusammenbrechen der Strukturen der eingesetzten Presspappe bzw. des Styrodurs festzustellen. Zum Vergleich sind in diesem Diagramm entsprechende Versuchsergebnisse eines nichtbindigen (Boden 1) und zweier bindiger Böden (Boden 2: Schluff; Boden 3: Ton) mit eingezeichnet.

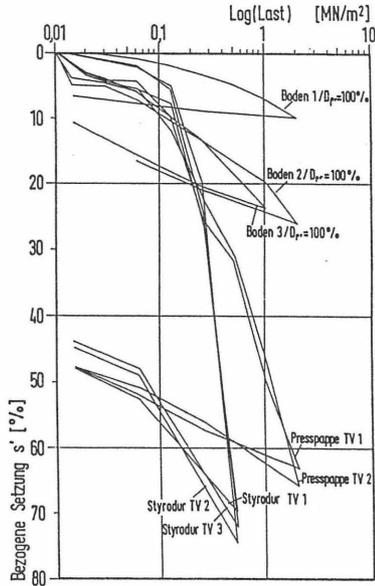


Bild 5: Last-Verformungskurven

2.3.2 Untersuchungen zum Einfluß des Wassergehaltes des Untergrundes

Um in vergleichenden Untersuchungen die Schutzwirkung von Geotextilien und deren Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt des Untergrundes beurteilen zu können, wurde durch Fixierung (Epoxidharz) von Einzelkörnern eines Kieses der Körnung 16/32 mm ein Druckstempel hergestellt. Die Verwendung eines solchen Stempels garantierte für jeden Teilversuch gleiche Druckbilder.

Durch Einsatz zweier Böden (Schluff bzw. Ton), die mit folgenden Verdichtungsgraden und entsprechenden Wassergehalten in die Unterteile der Töpfe eingebaut wurden: D_{Pr} , $D_{Pr} = 0,99$, $D_{Pr} = 0,97$ und $D_{Pr} = 0,95$, wurden unterschiedliche, definierte Untergrundbedingungen geschaffen. Die Proctorkurven der beiden Böden sind als Bild 6.1 und Bild 6.2 wiedergegeben.

Die Versuche wurden sämtlichst mit einer PEHD-Dichtungsbahn $d = 2$ mm gefahren. Als Belastung wurden $1,2 \text{ MN/m}^2$ gewählt. Eine Versuchsserie wurde unter Variation der oben erwähnten Einbauwassergehalte ohne geotextile Schutzlage, eine zweite mit einem auf der Dichtungsbahn eingelegten Verbundstoff, ein Vlies aus PEHD 1200 g/m^2 mit Gewebe, durchgeführt.

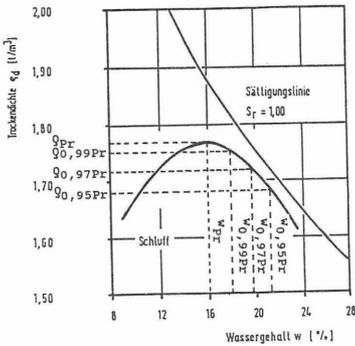


Bild 6.1: Proctorkurve Schluff

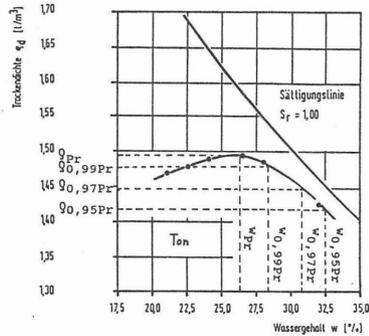


Bild 6.2: Proctorkurve Ton

Durch Vermessen der Dichtungsbahn nach den Versuchen in den - bezogen auf die Positionierung des Druckstempels - immer gleichen Achsen, ist eine Aussage zu den Auswirkungen des veränderten Untergrundes möglich. Die Bilder 7.1 und 7.2 verdeutlichen die festgestellten Verformungen.

Als ein Ergebnis der beschriebenen Versuchsreihe läßt sich feststellen, daß ein Einfluß des Einbauwassergehaltes auf die Beanspruchung der Dichtungsbahn und die Wirkung der geotextilen Schutzlage weder für die Verwendung von Schluff noch von Ton als Untergrund festgestellt werden konnte. Die aufgenommenen Meßwerte zeigen, daß trotz zunehmendem Wassergehalt die Differenzen zwischen Tief- und Hochpunkten entlang der aufgezeichneten Schnittlinie nahezu unverändert bleiben. Lediglich die Absolutwerte der eingetretenen Setzungen wachsen mit steigendem Wassergehalt als Folge von Konsolidationsvorgängen an.

Bei Gegenüberstellung der über den Schnitt aufgenommenen Meßwerte der Versuche mit und ohne Schutzlage wird unabhängig von den Einbauwassergehalten deutlich, daß durch den Verbundstoff die Tiefe der Eindrückungen reduziert wird. Dies belegt die lastverteilende Wirkung des Geotextils und zeigt deutlich, daß eine Schutzwirkung - es sei hier dahingestellt ob ausreichend - erzielt wird.

Druckstempel B1

Höhe des Fixpunktes: Oberkante Drucktopfunterteil + 2 mm
Kunststoffdichtungsbahn

Bodenart: Schluff

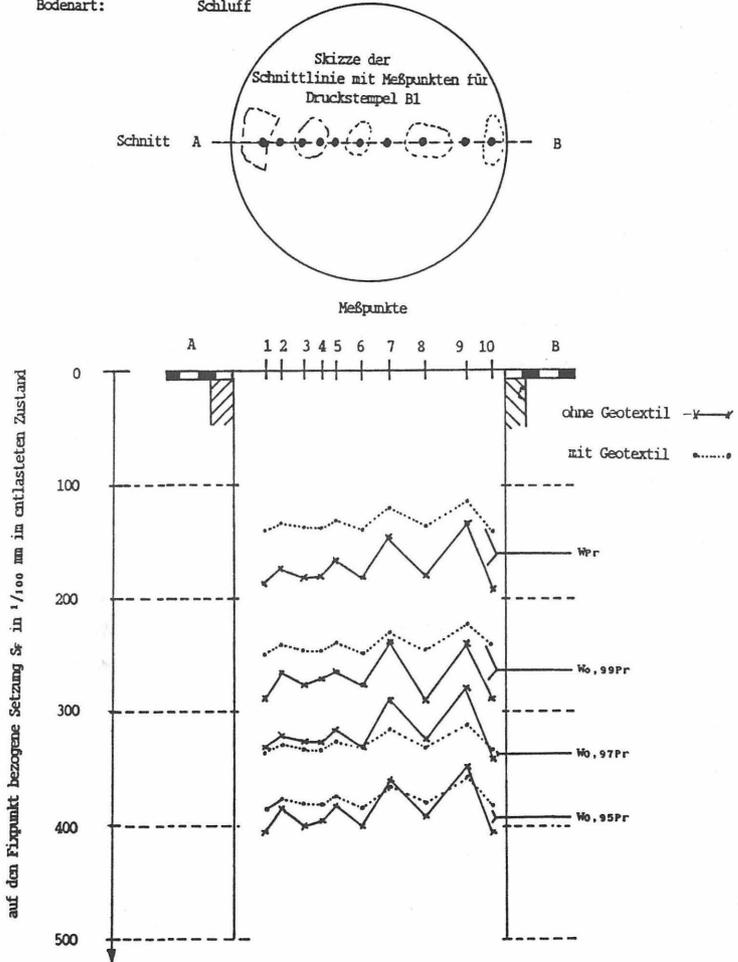


Bild 7.1: Oberflächenverformungen, Schluff

Druckstempel A1

Höhe des Fixpunktes: Oberkante Drucktopfunterteil + 2 mm
Kunststoffdichtungsbahn

Bodenart: Ton

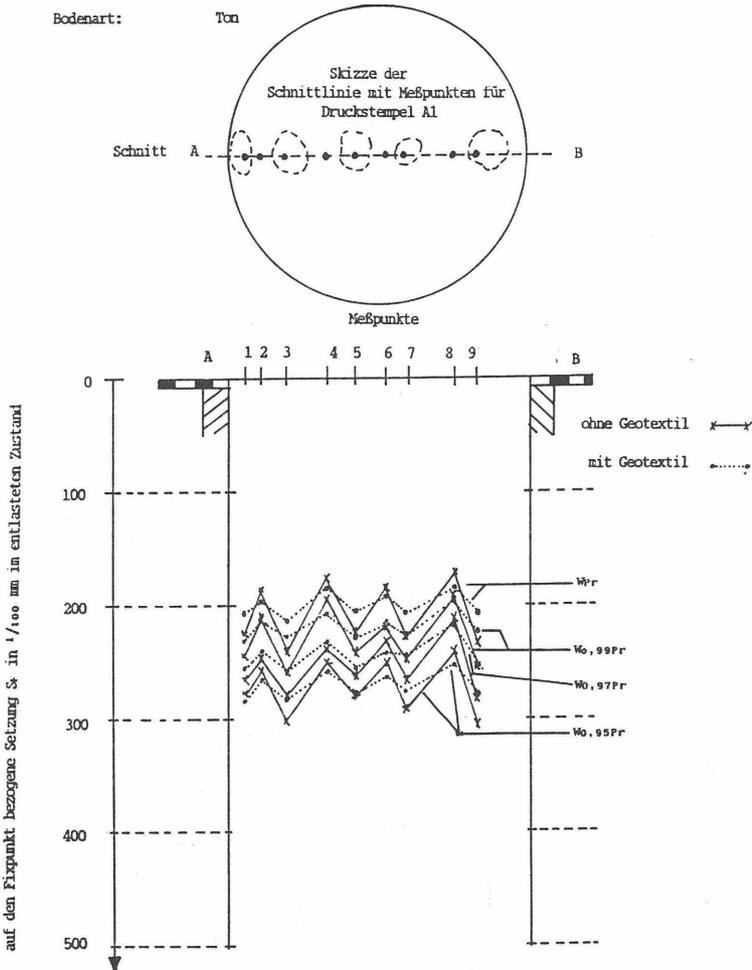


Bild 7.2: Oberflächenverformungen, Ton

2.3.3 Versuchseinrichtung - Versuchsdurchführung, Drucktopf O 300 mm

Für weitergehende Untersuchungen und besonders für Eignungsprüfungen von geotextilen Schutzlagen wird am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig eine eigens dafür aufgebaute Versuchseinrichtung mit Töpfen von einem Durchmesser von 300 mm verwendet. Es stehen drei dieser Töpfe zur Verfügung. Mit dieser Prüfeinrichtung können Lasten bis etwa $1,5 \text{ MN/m}^2$ als Prüflasten aufgebracht werden. Dichtungsbahn und das zu prüfende Geotextil werden, entsprechend zugeschnitten, frei auf den zuvor unter Kontrolle der Einbauwerte eingebauten Boden aufgelegt. Die gewählten Abmessungen gewährleisten übertragbare Versuchsergebnisse bei noch vertretbarem Prüfungsaufwand. In Bild 8 ist die Versuchseinrichtung mit Anordnung der einzelnen Lagen dargestellt.

Zur Überprüfung des Einflusses der Zeitdauer der Belastung auf die Ergebnisse wurden in dem beschriebenen Versuchsstand verschiedene Versuchsreihen gefahren. Dabei wurde bei sonst gleichem Versuchsaufbau die Prüflast von 1 MN/m^2 über einen Zeitraum von einer Stunde, 20 Stunden, 100 Stunden und 200 Stunden konstant gehalten.

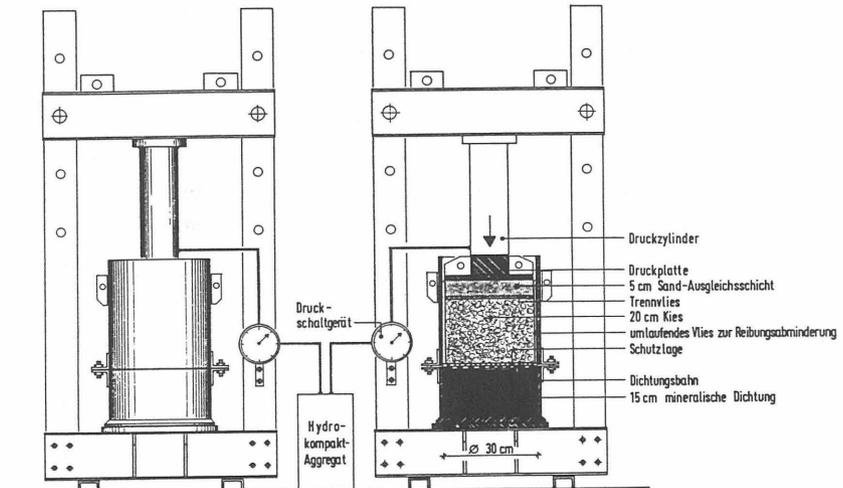


Bild 8: Prüfeinrichtung mit Drucktöpfen O 300 mm

Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung zeigten, daß Probelastungen von 1 bzw. 20 Stunden Dauer allenfalls für eine allererste grobe Bewertung herangezogen werden dürfen. Je länger ein Versuch dauert, umso ausgeprägter waren die an der

Dichtungsbahn feststellbaren Verformungen, wobei allerdings ab einer Belastungsdauer von etwa 100 Stunden, verglichen mit den Ergebnissen eines 200 Stunden dauernden Versuches, in der Regel kaum noch Unterschiede feststellbar waren. Auch nach diesem Zeitraum treten zwar aufgrund der Materialeigenschaften des bindigen Bodens und der eingebauten Kunststoffe noch weitere Veränderungen hinsichtlich der Verformungen auf, diese sind aber bei Ansatz eines zweifachen oder gar dreifachen der späteren Auflast und der daraus resultierenden wesentlich stärkeren Verformung des Untergrundes und - somit natürlich auch der unmittelbar aufliegenden Dichtungsbahn - von untergeordneter Bedeutung.

2.4 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse von Probelastungen

Eine Auswertung der Versuche geschieht bisher rein visuell. Zur Beobachtung der Rückbildung eingetretener Verformungen und für vergleichende Untersuchungen werden die feststellbaren Ausbeulungen und Einkerbungen auf den Dichtungsbahnen sofort nach Ausbau markiert (siehe Bild 13).

Eine Auszählung der festgestellten Deformierungen der Dichtungsbahn bei gleichzeitiger Unterscheidung nach Größe ermöglicht bei vergleichenden Untersuchungen eine zumindest grobe quantitative Unterscheidung der Schutzwirkung und läßt auch Vergleiche von Beanspruchungen durch unterschiedliche Körnungen des Filterkieses zu. Es lassen sich ebenfalls Auswirkungen von unterschiedlichen Schutzlagen (Änderungen hinsichtlich Flächengewicht, Dicke o.ä.) bei sonst gleichen Versuchsverhältnissen erkennen. In den folgenden Abbildungen (Bild 9 bis Bild 11) sind einige Ergebnisse solcher Auswertungen wiedergegeben:

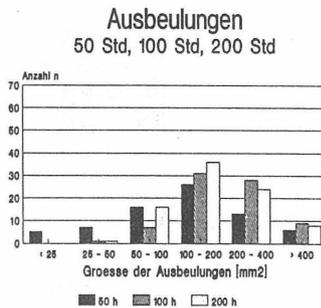


Bild 9: Ausbeulungen bei Variation der Belastungszeit

Mit zunehmender Belastungsdauer ist eine Verschiebung zu großflächigeren

Verformungen zu erkennen, geringer Unterschied zwischen den Werten für 100 Std. und 200 Std., größer zwischen 50 Std. und den beiden längeren Belastungszeiten.

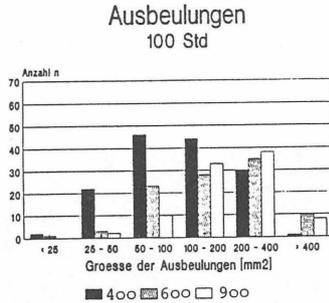


Bild 10: Ausbeulungen bei Variation des Vliesgewichtes

Bei steigendem Flächengewicht des Vlieses zeigt sich von der Tendenz her eine Verschiebung der feststellbaren Ausbeulungen zu flächenmäßig größeren Verformungen bei einer insgesamt geringeren Anzahl.

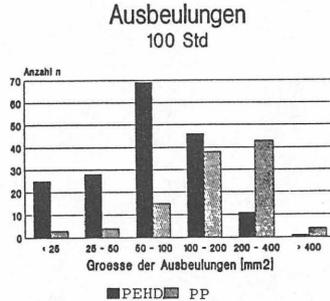


Bild 11: Ausbeulungen bei Variation des Rohmaterials

Die hier ausgewählte Darstellung zeigt - verglichen mit der Auswertung weiterer, diesen Zusammenhang untersuchenden Prüfungen - vergleichsweise deutliche Unterschiede. Unter Berücksichtigung auch der anderen Ergebnisse ist nur sehr vage, erkennbar an der Verschiebung zu flächenmäßig größeren Verformungen, der Trend zu erkennen, daß möglicherweise mit PP-Vliesen eine geringfügig bessere Schutzwirkung erzielt werden kann als mit in Bezug auf das Flächengewicht vergleichbaren Vliesen aus PEHD.

Durch Vermessen der Dichtungsbahnen selbst unmittelbar nach dem Ausbau läßt sich die tatsächliche, während des Belastungsversuches aufgezwungene Verformung wegen der teilweise sofortigen elastischen Rückverformung nicht erfassen. Es ist daher zu empfehlen, die im Untergrund eingepprägten Verformungen zu beurteilen, oder sich nicht elastisch zurückverformende Elemente auf der Unterseite der Dichtungsbahnen einzulegen, welche die Verformungen konservieren. Diese Elemente dürfen allerdings die Lastabtragung nicht beeinflussen.

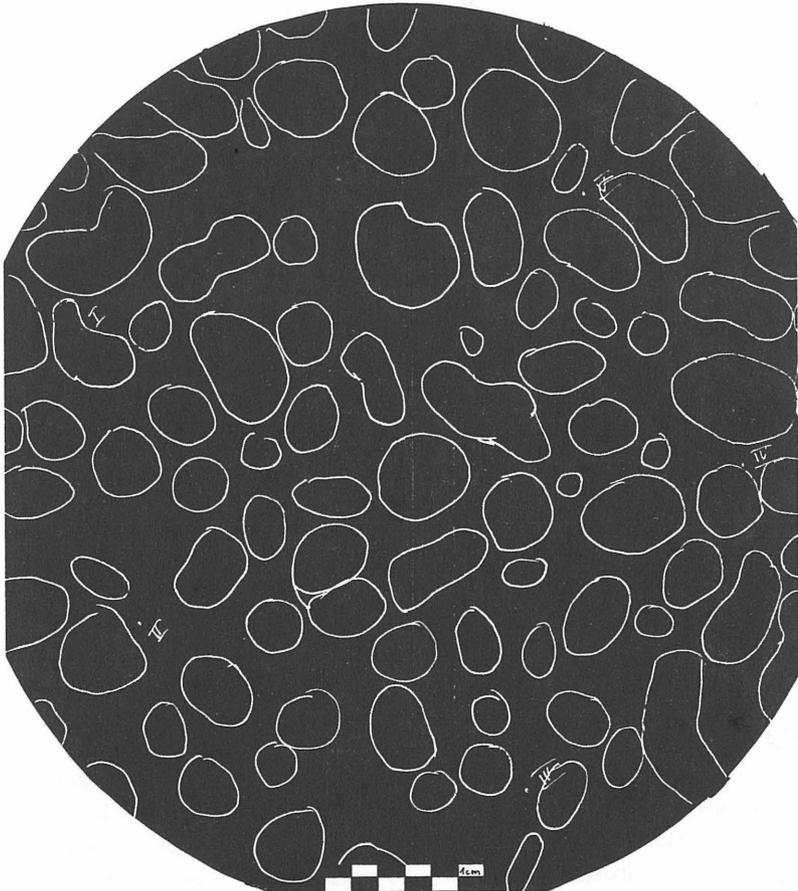


Bild 13: Nach dem Versuch markierte Dichtungsbahn
(verkleinerter Ausschnitt)

Literatur

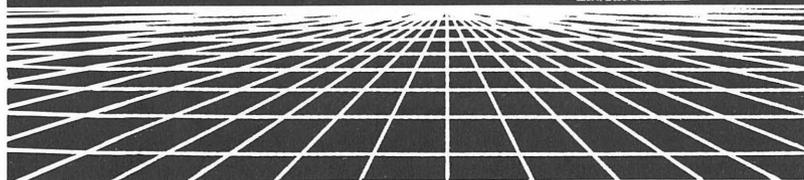
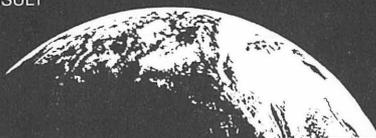
RdErl. d. MU. vom 24.06.1988, Niedersachsen

SEHRBROCK, U. Schutzwirkungen von Geotextilien im Deponiebau
Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik,
Technische Universität Braunschweig, Heft 30, Dez. 1989



WASSER BODEN LUFT
...wir arbeiten für »Mutter Erde«

HPC HARRESS PICKEL CONSULT
8856 Harburg/Schwaben
Tel. 0 90 03 / 39-0
Fax 0 90 03 / 3949



SCHADSTOFFEINBINDUNG MITTELS VERFESTIGUNGSVERFAHREN
HÖHERES ANFORDERUNGSNIVEAU IN DER ZUKUNFT

Dr. Lutz J. Gerschler *

Vortrag beim Seminar
Stand sicherheiten im Deponiebau/Schadstoffe in bindung
durch Verfestigung von Abfällen
19./20. März 1990
Technische Universität Braunschweig,
Institut für Grundbau und Bodenmechanik

* Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall,
Langelinienwall 26, D-3200 Hildesheim,
Tel.: 05121/509-179

Schadstoffeinbindung mittels Verfestigungsverfahren
Höheres Anforderungsniveau in der Zukunft

I N H A L T

1. Einleitung
2. Bisherige Entwicklung
3. Einbindeverfahren und Forderungen
4. Alternative Behandlungstechniken
5. Praktische Anwendung
6. Schlußbemerkungen
7. Literatur

1. Einleitung

Über Einbindeverfahren, die im Ausland mit großem Erfolg und in erheblichem Umfang praktiziert werden, ist vielfach berichtet worden [1,2,3,4]. In der Bundesrepublik Deutschland wurden diese Techniken trotz guter Erfolge einzelner Verfahrensanbieter nur zögerlich eingesetzt, da allgemein verbindliche Regelungen noch fehlten und -zumindest in der Vergangenheit- eine reservierte Grundeinstellung beim Umweltbundesamt in Berlin zu erkennen war [5].

Gute Einbinderverfahren vermögen Schadstoffe in Abfällen bzw. kontaminierten Böden (Altlastenmaterial) so festzulegen, daß damit der Abfallkörper zu einer Barriere wird. Damit wird ein Transport von Schadstoffpartikeln in die Umwelt nachhaltig verhindert. Somit können Einbindeverfahren bei Sanierungstätigkeiten als Alternative zu anderen Behandlungstechniken erreichen, daß Schadstoffanteile so fixiert werden, daß keinerlei Emissionen mehr über den Luft- oder Wasserpfad zu befürchten sind. Man kann also aus einem gefährlichen Abfall ein harmloses Material produzieren [6, 7, 8, 9, 10].

2. Bisherige Entwicklung

Die nachfolgende Aufstellung zeigt in Kurzform die Entwicklung der Technologie mit Einbindeverfahren auf chemischer Basis in der Bundesrepublik Deutschland auf. Der heutige Stand (Januar 1990) ist dadurch gekennzeichnet, daß vom Umweltministerium in Bonn nach einem Expertengespräch im Herbst 1989 Verfestigungsverfahren im Rahmen der TA-Sonderabfall als eine sinnvolle Behandlungsmethode eingestuft wurden und Prüfvorschriften als Entwurf nunmehr vorliegen.

- 1976 Symposium in Berlin, 15 Referenten

- 1979 Praktische Anwendung mit 9 Beispielen
 (Übersichtsartikel)

- 1981 "Schwabacher Versuche", Verfestigung von Säureharz
 und Ölschlämmen (Forschungsbericht)

- 1982 Berichte 1/82 des UBA-Berlin, Literatúrauswertung
 mit Schwerpunkt USA/Kanada

- 1983 Übersichtsbeitrag/Einzelveröffentlichungen
- 1984 Müllhandbuch - Übersichtsartikel
- 1985 Verfahrensvergleich mit Hamburger Hafenschlick
- 1986 Grenzwerte für Verfestigungsverfahren werden von
 der Mainhausenkommission definiert
- 1988 Diverse Forschungstätigkeiten an wissenschaftlichen
 Instituten/Grenzwertdiskussionen
- 1989 Praktische Arbeiten mit großen Volumina werden be-
 kannt (Bochum, Ludwigshafen). Lebhaftes Interesse
 bei Beratungsbüros und Landesämtern. Prüfmethode
 für Behandlungsprodukte werden vom BMU in Bonn de-
 finiert.

Die Erfahrungen im Ausland [13,15] sind gut beschrieben.
Die Einteilung wird in 7 Behandlungstechniken vorgenommen.
Einzelheiten können einem Übersichtsartikel [11] entnommen
werden. Danach sind folgende sieben Behandlungstechniken zu
zu unterscheiden:

1. Verfestigung mit Zement
2. Verfestigung mit Kalk oder Puzzolanen
3. Einbettung in Thermoplaste (Bitumen, Paraffin,
 Polyethylen)
4. Verfestigung mit organischen Polymeren
5. Einkapselung durch Inertmaterial
6. Herstellung "zementöser" Produkte ohne Zugabe wei-
 terer Additive
7. Glasbildung durch Silikate

Für Entscheidungsfindungen nützliche Verfahrensvergleiche finden leider nur selten statt, zumindest werden sie nicht für die interessierte Fachwelt dokumentiert.

So liegen die Schwabacher Versuche [12] zum Deponieverhalten von Verfestigungsprodukten schon zehn Jahre zurück. Damals sind 7 Verfahrensträger beteiligt gewesen, von denen einige keine weiteren Aktivitäten gezeigt haben. Die Kurzfassung zu diesem Bericht stellte abschließend fest: "Die im Großmaßstab mögliche Verfestigung mineralöhlhaltiger Schlämme ist eine kostensparende, umweltfreundliche Alternative zur thermischen Behandlung."

Da zukünftig organische Abfälle (!) nur noch einer thermischen Behandlung unterzogen werden, sind Verfahren zur Behandlung öhlhaltiger Schlämme nicht mehr von großem Interesse.

Ein Vergleich von Verfestigungsprodukten verschiedener Anbieter war 1985 im Zusammenhang mit dem Hamburger Hafenschlick möglich [11]. So konnte das Niedersächsische Landesamt für Wasser und Abfall (NLWA) nach vorgegebenen Rezepturen ein einheitliches Material umsetzen und vergleichend untersuchen. Interessant war bei diesem Vergleich, daß aus 100 Gewichtsteilen Hafenschlick je nach Anwender zwischen 84 und 162 Gewichtsteile Mischungsprodukt entstanden. Aus den Bestimmungen der Nadelpenetration in Anlehnung an DIN 52010 ging hervor, daß die verfestigten Proben mit Werten zwischen 1,5 und 3,5 PE (1/10 mm) hohe Festigkeiten (nach 28 Tagen) aufwiesen [14].

Die Eluate nach DEV S4 bewiesen, daß es zwischen den verschiedenen Firmenrezepten keine sehr großen Unterschiede gab. Deshalb wurde vom NLWA abschließend formuliert:

"Aufgrund der durchgeführten Mischversuche und Untersuchung des Auslaageverhaltens bleibt festzuhalten, daß eindeutige Vor- und Nachteile von Verfahrensvarianten

nicht festgestellt werden können. Alle Mischproben sind in gewisser Weise vergleichbar. Man kann weder eindeutig sehr gute oder sehr schlechte Produkte identifizieren, zumindest reicht dazu nicht die Beurteilung des Auslaugerverhaltens gemäß DEV S4 aus.

Wichtig scheint jedoch zu sein, daß aufgrund der Verschiedenen Mischrezepturen das Produkt H 5 mit einem Gewichtsanteil von 84% besonders günstig auffällt.

Hinsichtlich der Beurteilung sollten weitere Untersuchungen angestellt werden. Dabei ist in erster Linie an Tragfähigkeits- bzw. Festigkeitsuntersuchungen zu denken. Sie wurden im Ansatz mit der Bestimmung der Penetration untersucht. Derartige Penetrationsuntersuchungen oder anderweitige Festigkeitsuntersuchungen sollten angestellt werden.

Darüber hinaus ist in der Praxis die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Abfallprodukten, hier Mischprodukten, von größter Wichtigkeit. Derartige K_f -Wert-Bestimmungen sind bisher offensichtlich noch nicht durchgeführt worden. Diese Durchlässigkeitsbeiwertbestimmung dürfte aber unumgänglich sein, um überhaupt Aussagen über potentielle Auslaugvorgänge zu bekommen."

Und weiter als Schlußwort:

"Verfestigung ist im Labormaßstab möglich, aus Auslaugedaten ist kein Vor- oder Nachteil der einzelnen Mischrezepturen zu erkennen. Nur ein großmaßstäblicher Versuch kann zeigen, ob eine derartige Verfestigung auch in Praxis realisierbar ist. Dabei sind entsprechende Begleituntersuchungen unbedingt erforderlich (Tragfähigkeitswerte, Festigkeitswerte, Durchlässigkeitswerte, evtl. begleitende Grundwasseruntersuchungen)."

Es ist an dieser Stelle mit Bedauern festzuhalten, daß diese vorgeschlagenen Großversuche bisher nicht durchgeführt worden sind, obwohl die Entsorgung des Hamburger Hafenschlicks nach wie vor in Fachkreisen heiß diskutiert wird.

Verfestigung HAFENSCHLICK HAMBURG: Übersicht Massen und Festigkeit, aus [11].

Versuch/ Anbieter	Aus 100 Gew.-% entstehen	PENETRATION (DIN 52010)	
		nach 3 Tagen	nach 28 Tagen
H1 "Schubenz"	122%	67	2,3
H2 "Schubenz"	125%	120	5,3
H3 "GFS"	162%	240	2,1
H4 "GFS"	112%	200	2,7
H5 "Leo"	84%	71	1,5
H6 "Leo"*	110%	180	2,2
H7 "Weiss"	108%	350	3,4
H8 "Weiss"	123%	160	3,0

Hafenschlick Hamburg TS = 31,0% (N = 12)

Hafenschlick Bremen TS = 48,1% (N = 2)

* Hafenschlick Bremen

3. Einbindeverfahren und Forderungen

Die verschiedenen Einbindeverfahren und deren Anbieter sind in mehreren Übersichtsartikeln genannt worden [1,3,8,11, 13].

Ziel der Behandlung ist die Sicherheit, daß Schadstoffe

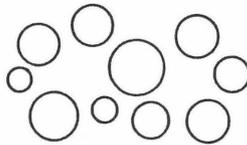
langfristig fixiert werden, damit keine Emissionen auftreten können. Wichtige Forderung zur Erreichung dieses Zieles ist daher seit langer Zeit, daß eine

CHEMISCHE REAKTION

ablaufen muß [2,8]. Diese Reaktion kann z.B. in der Art ablaufen, wie sie in der Abbildung für eine Zement-Matrix skizziert wurde [16].

Einbindung von Schadstoffen

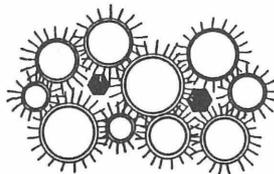
(Zement - Matrix nach Christensen - 1980)



Zementgemisch



Abfallpartikel vom Silicatgel umschlossen



Ausbildung von Fasern und Fixierung der Schadstoffe

Aus Literaturlauswertungen sind eine Vielzahl von Zuschlagstoffen bekannt. In [17] werden 47 Additive genannt, mit denen experimentiert wurde. Die Zahl der möglichen Additive erhöht sich noch dadurch, daß es mehrere - sehr stark unterschiedlich wirkende - Zemente, Aschen, Tone bzw. Tonmehle gibt. Häufig kann eine Optimierung der Reaktion erst durch eine Kombination verschiedener Additive erreicht werden. Für die Behandlung teerhaltiger Stoffe [17] wurden z.B. sieben Additiv-Kombinationen zur Erreichung der günstigsten Ergebnisse eingesetzt.

Gute Verfahren zeichnen sich durch gute Daten aus. Durch die Arbeit der sogenannten "Mainhausen-Kommission" wurden im Dezember 1986 Mindest-Forderungen präzisiert. Als Orientierungshilfe haben diese Anforderungen grundsätzlich auch heute noch Gültigkeit [18].

ANFORDERUNGEN AN DIE VERFESTIGUNG:

- ELUAT - Grenzwerte (Probekörper)
- Mindest - Festigkeit
- UN DURCHLÄSSIGKEIT (k_f - Wert)

Wichtig:

Eine Angabe von Werten ist nur in Verbindung mit den Untersuchungsmethoden zulässig!

Die Prüfung des Eluierungsverhaltens soll an unzerkleinerten Proben erfolgen. Die nachfolgende Übersicht zeigt auf, wie derartige Versuche in Niedersachsen praktiziert werden. Inzwischen wird diese Arbeitsweise sehr häufig angewendet. Im Rahmen der TA-Sonderabfall sind z.Zt. für die Festigkeit nach DIN 1045 ein Grenzwert von 1,0 MN/m² sowie für die

Durchlässigkeit im Triaxialversuch ein Grenzwert von $1,0 \times 10^{-9}$ m/s vorgeschlagen. Als "wünschenswert" sind Prüfergebnisse - Zerfallsziffer nach ENDELL - und - Gefrier-Ton-Verhalten - genannt.

HERSTELLUNG VON ELUATEN

gemäß DIN 38414 T.4:

(siehe auch auch LAGA Richtlinie EW/77, dort heißt es:

"soweit praktisch möglich im Originalzustand untersuchen" und

"unter schonendem Rühren auslaugen")

VERFAHREN IM NLWA HILDESHEIM

A. Übliche Abfälle:

2,5 L. Glasgefäße, Öffnung 85 bzw. 75 mm,
Teflonverschluß, über Kopf drehen
mit 1 U pro Minute, 24 h, Ansatz
1 : 10 (Gewichtsmenge Originalsubstanz)

B. Für verfestigte Produkte:

Zylinderförm. Proben, Becherglas 5 oder
10 Liter, je 100 g 1,0 L. Wasser, Glasstab
um Metallkern, Magnetrührer

\emptyset mm	h mm	Oberfläche cm ²
70	100	297
70	120	341
82	75	300
82	120	415

geeignete
Probekörper

4. Alternative Behandlungstechniken

Die Einbindeverfahren sind bei der Behandlung von Abfällen bzw. Materialien (Böden) von kontaminierten Standorten/Betriebsflächen als ALTERNATIVE zu anderen Entsorgungs- bzw. Behandlungstechniken zu sehen. Bei der Entsorgung organischen Materials wird immer die thermische Behandlung im Vordergrund stehen gemäß den Grundsatzungen zukünftiger Abfall - Konzepte. Es ist jedoch erkennbar, daß alle Behandlungstechniken immer gleichzeitig Vor- und Nachteile aufweisen. In den folgenden Übersichten wurde der - sicherlich unvollkommene - Versuch gemacht, Vor- und Nachteile knapp zu beschreiben. Der Autor ist der Ansicht, daß Einbindeverfahren immer dann vorteilhafte Ergebnisse liefern können, wenn Mischkontaminationen (organische plus anorganische Schadstoffe) vorliegen.

Grundsätzlich besteht die Absicht zukünftig nur anorganischen Abfall ohne erhöhte Anteile an Salzen mit Einbindeverfahren zu behandeln [19].

ALTERNATIVE THERMISCHE BEHANDLUNG

VORTEILE

- Technik verfügbar
- Ausgereifte Technologie
- Organische Schadstoffe werden zerstört

NACHTEILE

- Kapazitäten fehlen
- Kostenintensiv
- Ggf. ist Animpfen des "toten" Bodens erforderlichlich

Kosten: 100 - 800 DM/t

ALTERNATIVE BIOLOGISCHE VERFAHREN

(in-situ-Reinigung für Boden- u. Grundwasser)

VORTEILE

- Boden kann am Ort verbleiben
- Schadstoffe werden abgebaut
- Bei Kies- und Sandböden mit $K_f = 10^{-5}$ m/s gut geeignet

NACHTEILE

- Großer Sauerstoffverbrauch
- Nur bei Kies/Sand erfolgreich durchführbar
- Erfolgskontrolle problematisch
- Bildung von Metaboliten möglich

Kosten: 38 - 300 DM/cbm bzw. 40 - 200 DM/t

ALTERNATIVE BIOLOGISCHE VERFAHREN

(on-site Behandlung)

Vorteile

- Geringer Energieaufwand
- Relativ niedrige Kosten

Nachteile

- Lange Abbauraten
- Bildung von(unbekannten) Metaboliten

(noch Vorteile)

- Eignung von einigen Firmen nachgewiesen
- Für große Mengen geeignet
- Endkonzentration von 300-500 mg/kg KW erreichbar
- Methodenanpassung an die Schadstoffarten möglich

(noch Nachteile)

- Erheblicher Flächenbedarf
- Aufbereitung bei lehmig schluffigem Boden notwendig
- Intensive Begleitanalytik erforderlich
- Anorganische Schadstoffe werden nicht reduziert

Kosten: 110 - 300 DM/cbm
150 - 240 DM/t

ALTERNATIVE PHYSIKAL.-CHEM. VERFAHREN

(Extraktion)

VORTEILE

- Pilotanlagen vorhanden
- Einsatz für größere Mengen nachgewiesen
- Schadstoff wird entfernt
- Verwertung des Bodens möglich
- Bei Kies- und Sandböden sehr wirkungsvoll

NACHTEILE

- Behandlung/Entsorgung des Schadstoffkonzentrats
- Anorganische Schadstoffe werden nicht eliminiert
- Für lehmige/Schluffige Böden weniger geeignet
- Emissionen möglich

Kosten: 180 - 480 DM/cbm
150 - 200 DM/t

ALTERNATIVE PHYSIKAL.-CHEM. VERFAHREN

(Verfestigung)

VORTEILE

- Schadstoffe werden fixiert
- Großtechnisch erprobte Verfahren
- Vorgeschlagene Grenzwerte sind erreichbar
- Bodenmechanisch stabiles und praktisch undurchlässiges Endprodukt
- Besonders günstig bei Mischkontamination

NACHTEILE

- Schadstoffe werden nicht entfernt
- Emissionen bei der Behandlung möglich insbes. bei exothermen Verfahren)
- Verdichten des Endproduktes kann erforderlich werden

Kosten: 80 - 200 DM/t

5. Praktische Anwendung

Über Anwendungen in der Praxis wurde bereits berichtet [4, 7,16,20]. An dieser Stelle soll nur kurz das Sanierungsbeispiel Ludwigshafen [16] vorgestellt werden.

Aus umfangreichen Voruntersuchungen im Rahmen der Gefahrenabschätzung war dort erkannt worden, daß sowohl anorganische als auch organische Schadstoffe (Mischkontamination) auf dem Gelände eines Schrottplatzes eine Sanierung erforderten. Neben der Entfernung von geringen Mengen (wenige Kubikmeter) sollten nach Absprache mit den zuständigen Behörden die Hauptmengen mit dem HDT-Einbindeverfahren behandelt werden. Dazu wurden Höchstwerte für das Material vor und nach Behandlung festgelegt. In einer mobilen Anlage wurde der sanierungsbedürftige Boden behandelt, die endbe-

handelte Masse in Schichtstärken von 40 cm flächendeckend aufgetragen und verdichtet. Nach Abschluß des Wiedereinbringens der Gesamtmasse wurde eine Betonschicht als Oberflächenversiegelung sowie Verschleißschicht aufgetragen. Eine eingebaute Entwässerungsrinne erlaubt nach vorschriftsmäßiger Entwässerung die zukünftige Nutzung des sanierten Geländes.

Die tabellarische Übersicht zeigt die nachzuweisenden Werte für die Rohdichte, Bruchlast und Druckfestigkeit von entsprechenden Prüfkörpern.

Kennz.	Volumen	Rohdichte	Prüffläche	Bruchlast	Druckfestigkeit	
	cdm	kg/cdm	cm ²	kN	kN/cm ²	N/mm ²
L1	8.0	2,15	400	325	0,81	8,1
L2	8.0	2,125	400	300	0,75	7,5
L3	8.0	2,138	400	320	0,80	8,0
	Mittel: 2,179			Mittel: 7,86		

Probekörper bzw. Bohrkerne nach technischer Umsetzung zeigten Durchlässigkeitswerte (K_f) zwischen 3,12 und 9,32 x 10⁻¹⁰ m/s (Alter 19 Tage). Diese Daten belegen, daß nach Ablauf des Einbindevorganges das umgesetzte Material zu einer "Barriere" umgewandelt ist [21,22].

6. Schlußbemerkungen

Einbindeverfahren , bei denen durch Verfestigungsreaktionen die Schadstoffe dauerhaft festgelegt werden können, sind sowohl für Abfälle und Schlämme aber auch für kontaminierte Böden aus Altlasten anwendbar. Diese Technologie wird inzwischen von seriösen Firmen angeboten, die sowohl behördliche Vorgaben erfüllen als auch entsprechende Güteanforderungen garantieren. Die Grenzwert-Bedingungen aus Hessen [18] bzw. die im Entwurf vorliegenden Prüfmethode und Mindestwerte der TA-Sonderabfall (Abschnitt 3.) stellen hohe Anforderungen dar, die zukünftig von den Verfahrensanbietern erreicht werden müssen. Die hohen Anforderungen sind eine Kombination von mehreren bodenmechanischen und wasserwirtschaftlichen Kriterien, die erreichen sollen, daß verfestigte Materialien nach Behandlung eingebundene Schadstoffe langfristig nicht mehr an die Umwelt abgeben können. Einbindeverfahren - richtig eingesetzt - sind daher eine ordnungsgemäße Alternative bei der Behandlung von Abfällen oder zur Sanierung kontaminierter Standorte (Altlasten).

7. Literatur

- [1] Wiedemann, H.U.: Verfahren zur Verfestigung von Sonderabfällen und Stabilisierung von verunreinigten Böden, Berichte 1/82, E. Schmidt Verlag Berlin (1982)
- [2] Gerschler, L.J.: Verfestigung von Sonderabfällen in: Behandlung und Beseitigung von Sonderabfällen, Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, Nr. 43, Hrsg. W. Bischofsberger (1983)

- [3] Materialien 3/77: Verfestigung und Einkapselung von Sonderabfällen zum Zwecke der Ablagerung, Umweltbundesamt Berlin (1977)
- [4] Gerschler, L.J.: Verfestigung von Sonderabfällen, Beispiele - Kosten - Möglichkeiten, Müll und Abfall II, 1979, H. 6, S. 156
- [5] Wiedemann, H.: Private Mitteilung (1987)
- [6] Fritsch, G.: Das GFS-Verfestigungsverfahren, Vortrag Haus der Technik, 21.10.1982, Essen
- [7] Gerschler L.J.: Behandlung von Sonderabfällen und Verwertung als Straßenbaumaterial, Recycling International Berlin, S.1178 - 1181, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH (1984)
- [8] Gerschler L.J.: Verfestigung von Sonderabfällen, Müll und Abfall, Kennziffer 8134, Lieferung 2/84, S. 1-20 (1984)
- [9] Bahadir, M.: Vortragsmanuskript zum Symposium Deponie-sickerwasserbehandlung - Forschungs- und Entwicklungsperspektiven - Stand der Technik, BMFT/UBA/FIW Aachen, 09./11.04.1986, "Einfluß der Abfallvorbehandlung auf die Sickerwasserzusammensetzung"
- [10] Heide, G., Werner, H.: Verfahren zur schadlosen Deposition von sulfathaltigen Kraftwerksaschen im rheinischen Braunkohlenrevier, Braunkohle H. 2, 1981, S. 7-11

- [11] Gerschler, L.J.: Neue Entwicklungen bei der Verfestigung von Sonderabfällen, Müll und Abfall H. 7/88, S. 307 (1988)
- [12] Wackernagel, K.: Deponieverhalten von Verfestigungsprodukten mineralöhlhaltiger Schlämme, Forschungsbericht UBA 80 - 103 02 103 (1980)
- [13] Landreth, R.E.: Survey of solidification/stabilisation technology for hazardous industrial wastes, U.S. Environmental Protection Agency, CINCINATI, EPA-600/2-79-056 (1979)
- [14] Hampel, H.J., Därr, G.M., Faltin, M.: Neue Technologien zur Behandlung von Baggerschlick, Durchführbarkeitsstudie II: Detaillierung, Endbericht Teil 1: Verfestigung von Hafenschlick, Battelle-Bericht (April 1985)
- [15] Thies, A.: Verfestigung von Sonderabfällen, Diplomarbeit Technische Universität Braunschweig (1986)
- [16] Gerschler, L.J., Willer D.: Sanierungserfolg durch Einbindeverfahren, Vortrag beim FGU-Seminar Sanierung kontaminierter Standorte 1989, (Eigendruck des FGU Berlin e.V.)
- [17] Gerschler, L.J.: Gutachten zur Verwendung Teerhaltiger Stoffe, Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall, nicht veröffentlicht (1989)
- [18] N. N.: Gutachten der Sachverständigenkommission Sonderabfalldeponie Mainhausen, Wiesbaden, 19.12.1986

[19] Willer, D., Gerschler, L.J.: Schrottplatzsanierung mit der Einbindetechnologie - Erfahrungen in der Praxis - (im Druck)

[20] Krings, W.: Einsatz von Verfestigungsverfahren bei der Altlastensanierung, Handbuch der Altlastensanierung, R.v. Decker's Verlag (1989)

[21] Stief, K.: Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Depo- nien, Müll und Abfall 1/86, 1986, S. 15-20

[22] Thomé-Kozmiensky, K.J.: Multibarrieren für die Depo- nie, Entsorgungs-Praxis 10/87, 1987, S. 468-469

Anschrift des Verfassers:

Dr. rer. nat. Lutz J. Gerschler, Ährenkamp 1,
3201 Diekholzen

Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Weiterbildendes Fernstudium

Umweltingenieurwesen - Gewässerschutz

Wissenschaftlicher Koordinator:

Prof. Dr.-Ing. U. Maniak
Leichtweiß-Institut für Wasserbau,
Abteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft

Teilnehmer:

Praktiker aus dem Bereich der Wasser- und Abfallwirtschaft
und Fachleute in Verwaltungen, Verbänden, Ingenieurbüros,
Industrie und berufsständischen Vereinigungen.

Telefon: (0531) 391 - 3956 oder 391 - 3950

Baustellenerfahrungen mit der Verfestigung kontaminierter Böden

Dr.-Ing. Wolfgang Krings, Heitkamp Umwelttechnik GmbH, Bochum

1. Einleitung

Durch das Verfestigen kontaminierter Böden werden die darin enthaltenen Schadstoffe in eine mechanisch feste, dichte und chemisch stabile Matrix eingebunden. Dadurch wird ein Austritt der Schadstoffe verhindert. In [1] und [2] ist über kleine Anwendungen im Technikumsmaßstab berichtet. Die Aufsätze [3] und [4] enthalten Details zum Wirkungsmechanismus und zum Chemismus der Verfestigungsbehandlung. In [5] und [6] wird über einige ausführungstechnische Details berichtet.

Böden und auch Sonderabfälle, die ohne eine Behandlung nicht auf Deponien ablagerbar sind, können nach der Verfestigungsbehandlung auf Deponien endgelagert werden. Der neue Entwurf der TA-Abfall trägt diesem Rechnung, und dieses Verfahren ist dort aufgenommen. Um die zur Zeit kontrovers diskutierte Frage des Langzeitverhaltens von Verfestigungsprodukten zu beantworten, ist eine Verfestigungsdeponie errichtet worden, welche hierzu Aufschluß gibt. Im Kapitel 5.1 wird darüber berichtet.

2. Verfahrensablauf bei der Bodenverfestigung

Nach dem Aufnehmen des kontaminierten Bodens, der häufig mit Bauschutt durchsetzt ist, wird dieser in einer Zerkleinerungsanlage soweit aufbereitet, daß die maximale Korngröße höchstens 50 mm beträgt. Der so vorbehandelte Boden gelangt per Förderband in einen Wiegebehälter. Parallel werden dazu in einem anderen Wiegebehälter die Bindemittel entsprechend der in vorherigen Eignungsversuchen ermittelten Rezeptur eingefüllt. Weitere Additive, wie z. B. organische Bindemittel, werden in einem Tank gelagert und ebenfalls zugegeben.

In einem chargenweise arbeitenden Spezialmischer erfolgt die innige Vermi-

schung aller notwendigen Stoffe. Die gesamte Dosierung und Steuerung der Anlage geschieht automatisch.

Da bei der Verwendung von hydraulischen Bindemitteln auch Wasser als Anmachwasser benötigt wird, besteht auch die Möglichkeit kontaminiertes Wasser dafür zu benutzen. Sehr häufig fällt bei Altlastsanierungen ja auch solches Wasser an. In diesen Fällen ist es möglich nur mit einem Verfahren, der Verfestigung, die beiden Probleme Boden und Wasser zu behandeln.

Nach einer Mischzeit von einigen Minuten verläßt das Mischgut als pastöse mörtelartige Masse in erdfeuchter Konsistenz den Mischer. In noch frischem Zustand erfolgt der Transport zur Einbaustelle. Beim Einbau mit gleichzeitiger Verdichtung entstehen keine Porenstrukturen. Aus dem Erdbau bekannte Methoden der Verdichtung kommen zur Anwendung. Der lagenweise Einbau geschieht in Lagen von cirka 30 cm Dicke.

Je nach Umgebungstemperatur und dem Mischungsverhältnis setzt in 2 - 12 Stunden der Erhärtungsprozeß ein. Am darauf folgenden Tag ist die Erhärtung soweit abgeschlossen, daß eine Befahrung mit dem Lkw möglich ist.

3. Funktionsweise der Verfestigung

Bei der Verfestigungsbehandlung werden die Schadstoffe fein verteilt in eine dichte Bindemittelmatrix eingeschlossen. Durch die Verwendung von pH-Wert-erhöhenden Bindemitteln entstehen bei vielen Schadstoffen (besonders bei Schwermetallen) wasserunlösliche Verbindungen, die eine zusätzliche Sicherheit gegen den Austrag der Schadstoffe bringen. Bei dem Vorhandensein von organischen Schadstoffen haben sich organische Dispersionen als zusätzliche Bindemittel in Kombination mit hydraulischen Bindemitteln bewährt. Dieses KOMBI-Verfahren ist patentiert. Weil die hydraulischen Bindemittel ein basisches Milieu schaffen, können die organischen Bindemittel nicht abgebaut werden und die dichtende Funktion des organischen Bindemittels bleibt dauerhaft erhalten.

Tabelle 1: Verfestigung / Einbindung

Bindemittel	Kontaminationen
hydraulische Bindemittel Flugaschen	Schwermetalle und geringe organische Stoffanteile
<u>noch zusätzlich:</u> organische Bindemittel (KOMBI - Verfahren)	höhere organische Stoffanteile und Mischkontaminationen

4. Rezepturen, Bindemittel, Eignungsprüfungen

Überwiegend setzt man hydraulische Bindemittel und Steinkohlenflugaschen, die latent hydraulische Eigenschaften haben, ein. Beim Einsatz dieser Bindemittel treten beim Mischen und Abbinden nur sehr geringe Wärmetönungen auf, so daß auch leichtflüchtige Stoffe nicht ausgetrieben, sondern eingebunden werden. Hiermit lassen sich Schwermetalle und organische Kontaminationen in geringen Konzentrationen verfestigen. Bei höheren organischen Konzentrationen wird durch den Einsatz der schon erwähnten Kunststoffdispersion die sichere Einbindung erreicht.

In Laborversuchen werden vorab die geeigneten Bindemittelzusätze optimiert und mit der wirtschaftlichen Rezeptur werden Eignungsprüfungen durchgeführt.

Neben den mechanischen Kenngrößen:

- Druckfestigkeit
- Dichtigkeit
- Zerfallsneigung bei Unterwasserlagerung

wird auch das Auslaugverhalten untersucht.

In [7] sind Anforderungen an verfestigte Abfallstoffe definiert und begründet. Wahrscheinlich werden diese Anforderungen zukünftig zum Standard werden. Im schon erwähnten Entwurf der TA-Abfall sind diese Anforderungen weitestgehend übernommen.

5. Ausführungsbeispiele

5.1. Verfestigungsdeponie

In zwei Bauabschnitten sind circa 12.000 m³ kontaminierter Boden, der beim Aushub auf einem Gelände einer ehemaligen Teerpappenfabrik anfiel, verfestigt worden. Der stark bindige Boden mit einem Schluffgehalt von mehr als 60 % war mit Bauschutt durchsetzt. An Hauptkontaminationen sind BTX und PAK anzuführen.

Der vorgefundene Kontaminationsgrad war so hoch, daß eine Ablagerung nur auf einer Sonderabfalldeponie zu höheren Kosten als die Verfestigung endgültig verursachte möglich gewesen wäre. Eine Ablagerung auf der Zentraldeponie Kornharpen, Stadt Bochum, die der Deponieklasse 3 des Richtlinienentwurfes von Nordrhein-Westfalen entspricht, konnte nach der Verfestigungsbehandlung erreicht werden.

Da es sich hier um eine neuartige Anwendung handelt, ist aus Sicherheitsgründen, aber auch um neuere Erkenntnisse zu gewinnen, eine untere mineralische Abdichtungsschicht von 60 cm Dicke mit einem k_f -Wert von weniger als 10^{-9} m/s mit einer aufliegenden 2 mm dicken PEHD-Folie angeordnet worden. Darüber befindet sich eine 30 cm dicke Drainageschicht, welche durch ein Vlies abgedeckt ist. Die untere Abdichtung dient dazu, sämtliches eventuell auftretendes Sickerwasser aufzufangen und so dessen Menge und Inhaltsstoffe zu bestimmen.

Auf die Vliesschicht ist das frisch gemischte Material lagenweise bei unmittelbar folgender Verdichtung eingebaut worden.

Die Verfestigungsdeponie hat eine Grundfläche von ca. 70 m x 80 m, sie ist 4 m bis 6 m hoch, und die Seitenflächen sind abgebösch. Nur die Seitenflächen sind mit einer Folie von oben abgedeckt, damit ablaufendes Wasser eindeutig von Sickerwasser getrennt werden kann.

Nur mit einer gut wasserwegsamem kulturfähigen, begrünten Bodenschicht, ist

die Oberseite des Deponiekörper abgedeckt. Bild 1 zeigt einen schematisierten Schnitt durch die Deponie.

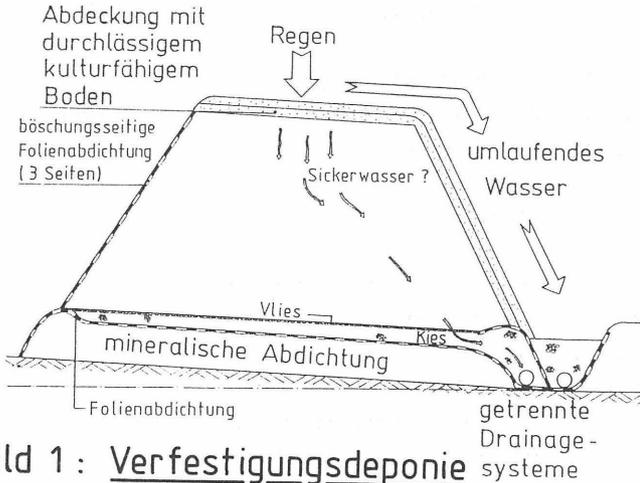


Bild 1 : Verfestigungsdeponie -systeme

An der Unterkante des Böschungfußes ist ein separates Drainagesystem angeordnet, in dem das umlaufende Wasser aufgefangen wird. Die Arbeiten sind 1989 abgeschlossen worden. Die Beobachtungen der Sickerwässer wird noch circa 3 Jahre erfolgen.

Die während der Aufbauphase gewonnenen Erkenntnisse deuten darauf hin, daß praktisch kein Sickerwasser anfällt und nur umlaufendes Hangwasser oder Kluftwasser auftritt. Dieses Wasser ist kaum mit Schadstoffen belastet.

Im ersten Bauabschnitt wurde der kontaminierte Boden nur mit hydraulischen Bindemitteln und Steinkohlenflugasche verfestigt. Ungefähr 30 Gewichtsprozent an Stoffen sind zugegeben worden.

Dagegen erfolgte die Verfestigung im zweiten Bauabschnitt mit dem KOMBI-Verfahren. Hierbei wurden hydraulische Bindemittel und organische Bindemittel angewandt. Insgesamt sind es circa 25 Gewichtsprozent.

Die Verfestigungsanlage war in der Nähe der Einbaustelle des Materials installiert. Eine Asphaltsschicht dichtete die Grundfläche nach unten ab. Regenwasser in diesem Bereich wurde in Tanks aufgefangen und als Zugabewasser beim Mischprozess verwertet.

Das Kernstück der Verfestigungsanlage ist ein 2.250 l fassender, chargenweise arbeitender Hochleistungs-Zwangsmischer als Ringtrog-Mischer in niedriger, kompakter Bauweise.

Stoffdaten und Erfahrungen:

- Befahrbarkeit mit dem Lkw nach einem Tag
- Volumenzunahme nach Einbau und Verdichtung < 7 %
- Keine Setzung des Deponiekörpers
- Druckfestigkeit nach 28 Tagen > 5 N/mm² (Mindestwert) und > 9 N/mm² (Mittelwert). Die Druckfestigkeit steigt im Laufe der Zeit weiter an.
- Rohdichte im frischen Zustand cirka 1,8 kg/dm³
- Kein Zerfall bei Unterwasserlagerung
- k_f -Wert geringer als 10^{-10} m/s
- Eluate nach DEV-S4 so gering belastet, daß eine Einstufung nach den Eluatwerten in der Deponieklasse 2 möglich ist. Beim KOMBI-Verfahren werden auch Phenole gut eingebunden. Nur mit hydraulischen Bindemitteln ist der Einbindungseffekt geringer.

Beteiligte Institute und Firmen:

Im Auftrage der Stadt Bochum führte die Heitkamp Umwelttechnik GmbH die Verfestigungsarbeiten auf der vom Fuhrpark betriebenen Zentraldeponie Kornharpen durch. Die Genehmigung zum Betrieb der Verfestigungsanlage und zur Errichtung der Verfestigungsdeponie erteilte der RP Arnsberg in Form einer Änderung der Planfeststellung der in Betrieb befindlichen Deponie.

Das STAWA Herten ist als zuständige Fachbehörde eingeschaltet. Die wissenschaftliche Begleitung und laufende Überwachung erfolgen vom Inst. für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig. Die Analysen macht

das Chemische Untersuchungsamt der Stadt Bochum.

5.2 Verfestigen von Altlastböden im Mobilbetrieb

Mit einer mobilen kleinen Verfestigungsanlage werden Altlastböden an Ort und Stelle mit Bindemitteln vermischt. Im noch frischen, nicht erhärteten Zustand wird dieses Material zur Deponie gebracht und dort abgelagert und verdichtet, bevor es endgültig aushärtet.

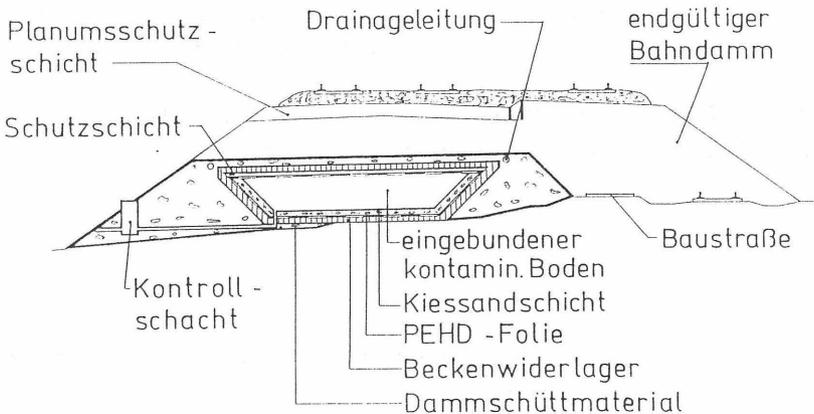
Mehrere kleinere Projekte wurden auf diese Art und Weise in Zusammenarbeit mit der Zentraldeponie Emscherbruch in Gelsenkirchen abgewickelt. In diesem Falle ist der RP Münster zuständig.

5.3 Verfestigen von Teerböden und Ablagerung in einen Damm

Beim Neubau eines Dammes einer S-Bahnstrecke mußte dieser Damm ein sogenanntes Säureharzbecken, angefüllt mit nicht standfesten Teer-Rückständen einer stillgelegten Kokerei, durchqueren.

Eine Entsorgung dieser Stoffe war nicht möglich, da keine Deponie diese annahm und auch keine Behandlungsanlage, z. B. für eine thermische Behandlung zur Verfügung stand.

Bild 2 : Bahndammschnitt



Die Rückstände wurden aufgenommen, mit dem KOMBI-Verfahren an Ort und Stelle in einer mittelgroßen Verfestigungsanlage verfestigt und in den Damm eingebaut.

Das verfestigte Material ist allseitig in eine PEHD-Folie eingeschweißt worden. Durch die Behandlung der pastösen Rückstände ist die Standfestigkeit erhöht und die Schadstoffe sind eingebunden, so daß ein Einbau in den S-Bahn-Damm möglich wurde (Bild 2).

Da eine thermische Behandlung für die angetroffene Belastung nicht möglich war, konnte nur das Verfestigungsverfahren hier eingesetzt werden.

Insgesamt sind ungefähr 550 m³ kontaminiertes Material verarbeitet worden. Die reinen Verfestigungsarbeiten dauerten nicht länger als drei Wochen und sind mit Erfolg abgeschlossen.

Auftraggeber war die Bundesbahndirektion Essen. Als Fachgutachter ist das Erdbaulaboratorium Ahlenberg tätig gewesen. Die Erd- und Verfestigungsarbeiten führte die Heitkamp Umwelttechnik GmbH aus.

5.4 Sanierung eines Gaswerksgeländes

Der sandige bis schluffige Boden eines Gaswerksgeländes, welcher mit PAK, Phenol, Naphtalin, Cyanid usw. kontaminiert war, wurde nach der Behandlung mit dem KOMBI-Verfahren zu der in der Nähe befindlichen Deponie verbracht und dort für den Unterbau einer neu zu bauenden Deponiestraße verwandt.

Die Firma Kulturtechnik GmbH, Bremen, überwachte die Arbeiten. Heitkamp verfestigte den Boden. Auftraggeber war die Stadt Nienburg.

6. Ausblick

Durch eine schadstoffangepaßte Rezepturgestaltung ist es möglich kontami-

nierte Böden nach einer Verfestigungsbehandlung auf einer Deponie bei Reduzierung der Deponieklasse abzulagern. In vielen Fällen sind zumindest die Anforderungen der Deponieklasse 3 des Richtlinienentwurfes von NRW erreichbar. Sehr oft ist auch Klasse 2 möglich.

Aufgrund der bisher gemachten Erfahrungen hält der Verfasser es für möglich, daß in Zukunft verfestigte Böden an Ort und Stelle bei einfachen Baukonstruktionen eingebaut werden. Die Festigkeit des Bodens kann so weit gesteigert werden, daß der Bau von Straßenunterbauten, Lärmschutzwällen usw. möglich ist.

Da in nächster Zeit verstärkt eine thermische Behandlung von Sonderabfällen erfolgen soll, wird der Anteil der Rückstände dieser Anlagen zunehmen.

Die Rückstände müssen deponiert werden. Der Schadstoffgehalt ist teilweise so groß, daß eine Endlagerung nach geltender Meinung nur in einem Salzstock möglich ist. Der Verfasser hält es für sinnvoll, nach einer Verfestigungsbehandlung diese künftigen Massenabfallstoffe zu verwerten oder abzulagern. Es deuten sich hier wirtschaftliche und genehmigungsfähige Lösungen an.

Literatur

- [1] Krings, Wolfgang: "Baumaßnahmen zu Altlastensanierungen, z. B. Verfestigung", Seminar Altlasten und kontaminierte Standorte, Ruhr-Universität Bochum, April 1986
- [2] NN: "Mechanische und chemische Stabilisierung", Umweltmagazin S. 85-86, Juni 1987
- [3] Fritsch, Georg: "Untersuchungen zur Verfestigungsbehandlung als Alternative bei der Lösung der Altlastprobleme", Vortrag am 17.03.1987 vor der Gesellschaft Deutscher Chemiker
- [4] Fritsch, Georg: "Verfestigungsverfahren zur Altlastensanierung,

Fallbeispiele", Handbuch der Altlastensanierung, Decker`s Verlag, Heidelberg

- [5] Krings, Wolfgang: "Einsatz von Verfestigungsverfahren bei der Altlastensanierung", Handbuch der Altlastensanierung, Decker`s Verlag, Heidelberg
- [6] Enseling, Alfons und Wolfgang Krings: "Verfestigung kontaminierter Böden und Ablagerung auf der Deponie", Altlasten 2, Prof. Dr.-Ing. Karl J. Thome`-Kozmiensky, Berlin 1988
- [7] Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig: "Entwicklung von Untersuchungsverfahren zur Beurteilung des Verhaltens von verfestigten Abfällen bei der Ablagerung auf Deponien und zur Festlegung v. Güteanforderungen" April 1987

ERFAHRUNGEN AUS DER ANWENDUNG DER IN DER TA ABFALL (ENTWURF) GEFORDERTEN KRITERIEN FÜR DIE EIGNUNGSPRÜFUNG UND DIE GÜTE- ÜBERWACHUNG VERFESTIGTER ABFÄLLE

P. Beckefeld

1. Einleitung

Nach dem Entwurf der Technischen Anleitung für besonders überwachungsbedürftige Abfälle (TA Abfall) wird die Verfestigung als eine Übergangslösung zur kurzfristigen Verbesserung des Ablagerungsverhaltens von Abfällen zugelassen. Die Verfestigungsprodukte müssen dazu jedoch definierte Güteanforderungen erfüllen.

Die im Anhang H der TA Abfall vorgeschriebenen Prüfverfahren zur Beurteilung verfestigter Abfälle wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens für den Regierungspräsidenten Münster vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der Technischen Universität Braunschweig entwickelt. Sie wurden bereits 1987 bei der Versuchsdeponie verfestigter kontaminierter Böden in Bochum-Kornharpen im technischen Maßstab angewendet. Die dabei gesammelten Erfahrungen wurden bei der Erstellung des Güteüberwachungskonzeptes der TA Abfall berücksichtigt.

2. Güteanforderungen der TA Abfall (Entwurf) an verfestigte Abfälle

Zur Kontrolle der Güteanforderungen werden die verfestigten Abfälle einer Eignungsprüfung, einer Gütekontrolle während des Einbaus sowie Prüfungen am Deponiekörper unterzogen. Dabei werden die mechanischen Eigenschaften Zerfallsbeständigkeit, Festigkeit und Wasserdurchlässigkeit, sowie das Auslaugverhalten der Verfestigungsprodukte untersucht.

Für die **Eignungsprüfung** sind Probekörper des Verfestigungsproduktes nach einem Verfahren herzustellen, das bezüglich Rezeptur, Mischverfahren und Verdichtung der geplanten Anwendung im technischen Maßstab entspricht. Die Probekörper sind zylindrisch mit einer Höhe $h = 10$ cm und einem Durchmesser $d = 10$ cm (Festigkeitsprüfung, Durchströmungsversuch) bzw. $d = 7$ cm (Eluierung DIN 38 414-S4) herzustellen. Sie werden unter Luftabschluß bis zum Erreichen des Prüfzeitpunktes gelagert.

In Tabelle 1 sind die in der Eignungsprüfung zu bestimmenden mechanischen Eigenschaften mit den zugehörigen Anforderungen zusammengestellt.

Parameter	Versuch	Prüfzeitpunkt in Tagen	Versuchsdauer	Anforderung TA Abfall (Entwurf)
Zerfallsziffer	Zerfallsversuch nach ENDELL	28	≥ 24 [h] (Meßwertkonstanz)	$z \leq 2$ %
Einaxiale Druckfestigkeit	in Anlehnung an DIN 18 136	14, 28, 56	---	$q_u \geq 1,0$ MN/m ²
Durchlässig- keitsbeiwert	in Anlehnung an DIN 18 130	28	≥ 28 [d]	$k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s

Tabelle 1: Anforderungen der TA Abfall (Entwurf) an verfestigte Abfälle

Das Auslaugverhalten der verfestigten Abfälle ist, sofern eine ausreichende Eluatmenge gewonnen werden kann, sowohl im Durchströmungsversuch als auch in Anlehnung an DIN 38 414-S4 zu untersuchen. Im Durchströmungsversuch in der Triaxialzelle ist das zu Beginn des Versuches entstehende Eluat in ausreichender Menge zu sammeln und auf Inhaltsstoffe zu analysieren. Das in Anlehnung an DIN 38 414-S4 erhaltene Eluat ist ebenfalls zu analysieren und damit zu vergleichen.

In der Güteüberwachung wird festgestellt, ob das zu deponierende Verfestigungsprodukt die in der Eignungsprüfung optimierten Eigenschaften auch erreicht. Die Güteüberwachung beinhaltet die Kontrolle der Rezeptur, die Führung eines Betriebstagebuches sowie die Entnahme von Rückstellproben und deren Untersuchung analog der Eignungsprüfung zur Kontrolle der mechanischen Eigenschaften. Material, das die Festlegungen aus der Eignungsprüfung nicht erfüllt, muß wieder aufgenommen und erneut behandelt werden.

Die Prüfung am Deponiekörper schließlich dient der Beurteilung des Langzeitverhaltens der verfestigten Abfälle. Dazu sind aus der Deponie gebohrte Kerne analog der Eignungsprüfung zu untersuchen und mit den dabei sowie bei der Güteüberwachung ermittelten Ergebnissen zu vergleichen.

3. Anwendung der Kriterien auf verschiedene Verfestigungsprodukte

Die im Entwurf der TA Abfall vorgeschriebenen Prüfverfahren wurden vom IGB bereits seit 1986 für die Untersuchung einer Vielzahl unterschiedlicher Verfestigungsprodukte angewendet. Einige Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen hier vorgestellt werden.

Relativ häufig wird die Verfestigung zur Zeit bei der Behandlung kleinerer Mengen kontaminierter Böden eingesetzt. In erster Linie PCB und PAK, aber auch andere organische Stoffe sowie Schwermetalle werden dabei mechanisch eingebunden. Je nach Kontamination, Bindemittelgehalt und Bodenart können dabei sehr hohe Festigkeiten - bis zu $q_u = 20 \text{ MN/m}^2$ - und geringe Wasserdurchlässigkeiten - bis $k = 10^{-12} \text{ m/s}$ erreicht werden. Die Bandbreite erreichbarer Eigenschaften ist dabei sehr groß.

Bei der Verfestigung von Schlämmen werden in der Regel nicht so günstige Werte erzielt. Verfestigte industrielle Klärschlämme weisen häufig Festigkeiten um $q_u = 0,02 \text{ MN/m}^2$ auf, es können jedoch auch um den Faktor 100 größere Werte erreicht werden. Die Durchlässigkeitsbeiwerte liegen dabei meist um bei $k = 10^{-9} \text{ m/s}$.

Flugstäube aus Verbrennungsanlagen weisen nach einer Verfestigung meist gute mechanische Eigenschaften auf. Rückstände aus Rauchgasreinigungsanlagen binden zum Teil nach Zugabe von Wasser und Verdichtung beim Einbau bereits so ab, daß die Anforderungen der TA Abfall erfüllt werden.

In Tabelle 2 sind exemplarisch für die Vielzahl untersuchter Verfestigungsprodukte einige Versuchsergebnisse des IGB aus Eignungsprüfungen zusammengestellt, bei denen zumindest das Kriterium der Zerfallsbeständigkeit erfüllt war.

Die Tabelle macht deutlich, daß je nach Material, Kontamination und Verfahren augenscheinlich *verfestigte* Abfälle höchst unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen können. Auch nach Optimierung von Rezeptur und Mischverfahren konnten einige Verfestigungsprodukte die Anforderungen der Eignungsprüfung nicht erfüllen. Andere Produkte dagegen haben weitaus bessere Eigenschaften als für die Deponie gefordert.

Ausgangsmaterial	Mechanische Eigenschaften	Zerfallsziffer z [%]	Einaxiale Druckfestigkeit max. q_{II} [MN/m ²]	Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]
KW-belasteter Boden (Gaswerk)		< 2	6,5	4×10^{-10}
PAK-belasteter Boden (Kokerei)		< 2	5,3	7×10^{-10}
Teerverunreinigter Boden (Stahlwerk Abscheider)		< 2	6,2	1×10^{-7}
PCB-belasteter Boden		< 2	2,5	2×10^{-10}
PCB-belasteter Boden		< 2	11,8	9×10^{-10}
PAK-belasteter Boden		< 2	8,1	1×10^{-11}
organ. verunreinigter Boden		< 2	21,7	$< 10^{-12}$
organ. verunreinigter Boden		< 2	19,5	3×10^{-12}
Bleicherde		< 2	3,6	2×10^{-12}
Lack-und Farbreste		< 2	1,4	3×10^{-10}
Sandfangschlamm		< 2	1,9	1×10^{-8}
Kanalschlamm		< 2	1,3	2×10^{-8}
Ölschlamm		< 2	0,13	3×10^{-9}
Galvanikschlamm		< 2	0,02	1×10^{-9}
Rotschlamm		< 2	3,2	5×10^{-11}
Kokereirückstände		< 2	4,7	3×10^{-10}
MVA-Stäube		< 2	6	2×10^{-10}
MVA-Stäube		< 2	1,4	4×10^{-10}

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften verschiedener Verfestigungsprodukte

Vom IGB wurden auch umfangreiche Untersuchungen zur Deponierbarkeit verfestigter Reststoffe aus dem Erzbergbau durchgeführt. Unter anderem wurde ein Bergematerial unter Zugabe von Flugasche mit Zement verfestigt. Mit dem Anteil an Flugasche in der Mischung (0-25 %) änderten sich die mechanischen Eigenschaften des Verfestigungsproduktes. Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften lieferte die in Bild 1 in Abhängigkeit vom Flugascheanteil dargestellten Ergebnisse.

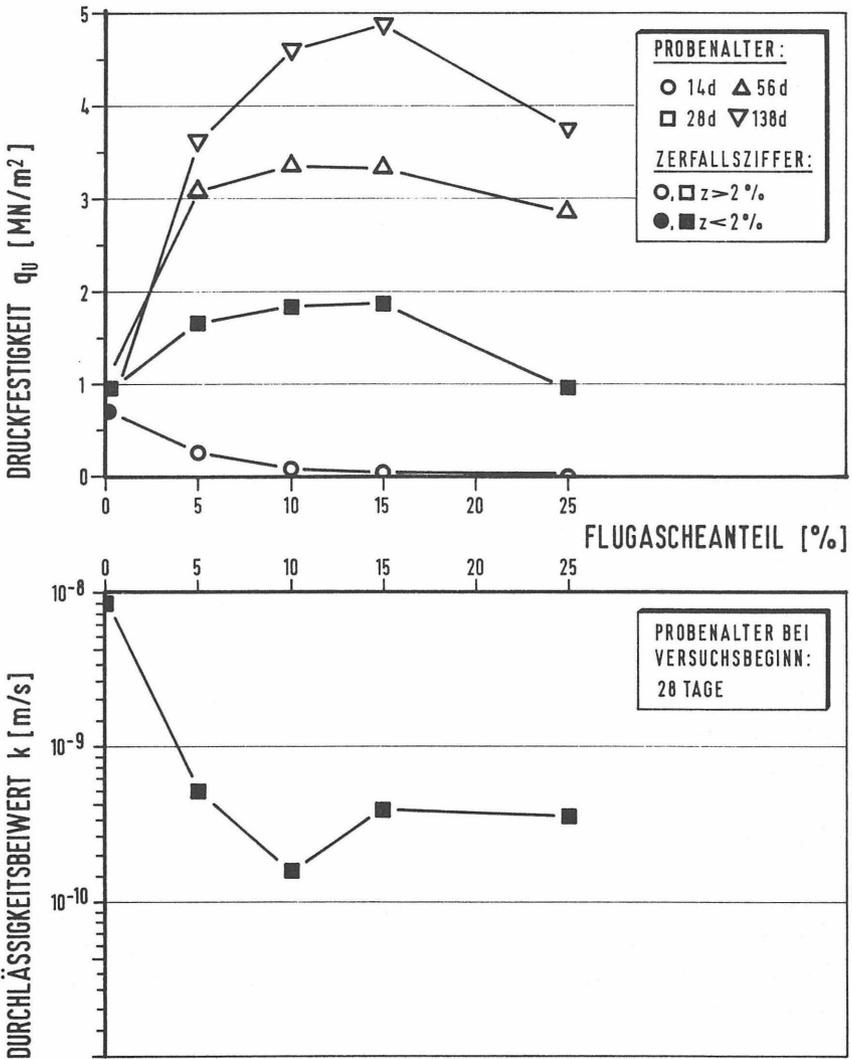


Bild 1: Untersuchungsergebnisse unter Zugabe von Flugasche verfestigter Berge aus dem Erzbergbau

Bereits nach 14 Tagen war der ohne Flugaschezusatz verfestigte Probekörper zerfallsbeständig, nach 28 Tagen erfüllten alle untersuchten Mischungen dieses Kriterium. Aus den Ergebnissen der Druckfestigkeitsprüfungen ist die lange Aushärtungsdauer der Mischungen abzulesen. Nach 14 Tagen erreichte lediglich die Mischung ohne Aschezusatz eine nennenswerte Festigkeit. Nach 28 Tagen betrug die Druckfestigkeit aller Probekörper mindestens $q_u = 1 \text{ MN/m}^2$. Mit zunehmender Zeit stieg die Festigkeit noch stark an. Nach 138 Tagen wurden bis zu $q_u = 5 \text{ MN/m}^2$ erreicht. Der Durchlässigkeitsbeiwert der mit Flugasche verfestigten Proben war geringer als $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

4. Versuchsdeponie Kornharpen

4.1 Projekt

Auf der Deponie Kornharpen wurden seit 1987 Versuche zur Verfestigung und Deponierung kontaminierter Böden unter umfassender wissenschaftlicher Begleitung durchgeführt. In einer auf dem Versuchsgelände installierten Mischanlage wurden ca. 11.000 m³ hauptsächlich durch PAK verunreinigter Böden mit Bindemitteln gemischt. Das erdfeuchte Mischgut wurde lagenweise mit Erdbaugeräten auf der Versuchsdeponie eingebaut und verdichtet. In voneinander getrennten Bauabschnitten kamen zwei verschiedene Rezepturen - die Hydraulische und die Kombinationsverfestigung - zur Anwendung. Beide Bauabschnitte sind durch eigene Abdichtungssysteme mit getrennter Sickerwasser- und Oberflächenwasserfassung vom restlichen Deponiegelände getrennt.

4.2 Eignungsprüfung

In der Eignungsprüfung wurde die Streubreite des Ausgangsmaterials sowie die mechanischen Eigenschaften, das Erstarrungsverhalten und die Verarbeitbarkeit der Verfestigungsprodukte geprüft und anhand der Ergebnisse die Rezepturen, der Einbau und die erforderliche Verdichtung festgelegt.

Für die Ermittlung des beim Einbau auf der Deponie zulässigen Bearbeitungszeitraumes wurde im Labor Material zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Mischen verarbeitet. Als Bearbeitungszeitpunkte wurden 0, 3, 6, 9 und 12 Stunden nach dem Mischen gewählt. Die jeweils hergestellten Probekörper wurden wie in Tabelle 1 angegeben untersucht. Ein Vergleich der dabei erhaltenen Ergebnisse zeigte, innerhalb welchen Zeitraumes das Material verarbeitet werden kann, ohne daß sich die mechanischen Eigenschaften über die geforderten Grenzwerte hinaus verschlechterten.

Bild 2 zeigt am Beispiel einer in pumpfähiger Konsistenz hergestellten Mischung der Kombinationsverfestigung, wie stark der Durchlässigkeitsbeiwert ansteigt, je später das Material verarbeitet wird. Bereits nach 3 Stunden ist die Wasserdurchlässigkeit um 3 Zehnerpotenzen gegenüber dem sofort verarbeiteten Material gestiegen nach 12 Stunden sogar um 6 Zehnerpotenzen.

Im Zerfallsversuch blieben nur die sofort und die nach 3 Stunden hergestellte Mischung beständig, für die später verarbeiteten Materialien wurden Zerfallsziffern von 5 %, 9 % bzw. 15 % festgestellt.

Bei der Druckfestigkeitsprüfung war erst nach 12 Stunden eine Abnahme der Festigkeit zu beobachten.

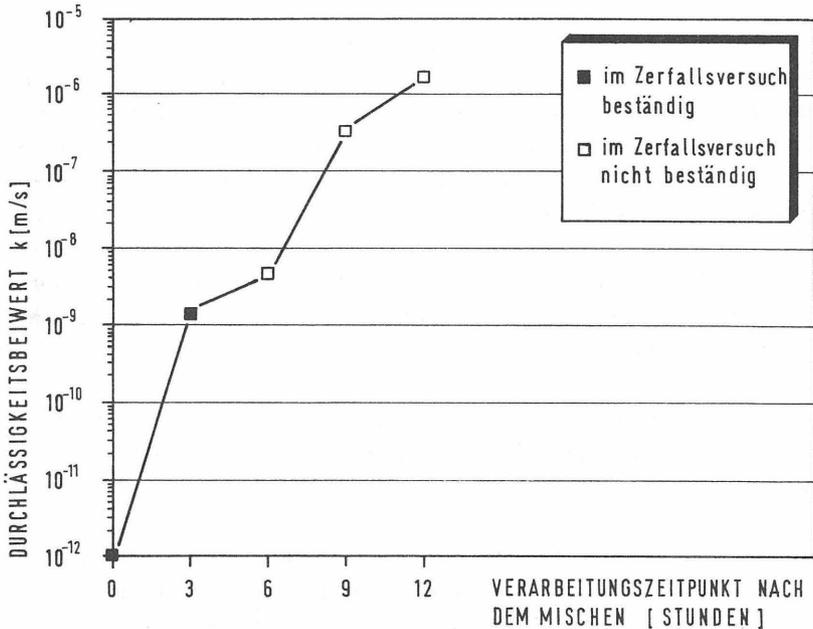


Bild 2: Verschlechterung des Durchlässigkeitsbeiwertes mit zunehmendem Verarbeitungszeitraum

Je nach Konsistenz der Mischung und Rezeptur wurden anhand dieser Untersuchungen für den Deponiebetrieb mögliche Verarbeitungszeiträume von 2 Stunden bis maximal 9 Stunden festgelegt. Der Einbau des Verfestigungsproduktes zu einem späteren als dem jeweils zugelassenen Zeitpunkt hätte eine erhebliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften verursacht und mußte somit im Betrieb vermieden werden. Material, das nicht innerhalb des

vorgeschriebenen Zeitraumes in der Deponie eingebaut werden konnte, mußte wieder zerkleinert und erneut in der Mischanlage behandelt werden.

4.3 Güteüberwachung

In der Güteüberwachung wurden die mechanischen Eigenschaften sowie das Auslaugverhalten des verfestigten Bodens an Rückstellproben geprüft. Die Einhaltung der vorgegebenen Mischzeiten, des Verarbeitungszeitraumes und der Verdichtung wurden ebenfalls kontrolliert.

In der elektronisch gesteuerten Mischanlage wurde jede gemischte Charge protokolliert. Durch Auswertung der Druckerprotokolle konnte die Einhaltung der Rezeptur für das Verfestigungsprodukt über die gesamte Betriebsphase überprüft werden.

Nach einer kurzen Einarbeitungsphase im 1. Bauabschnitt wurden die Rezepturen sehr gut eingehalten. Die in der Eignungsprüfung festgelegten Mischungsanteile wurden, bei einer Standardabweichung von nur 0,3 %, im Mittel erreicht. Einzelne Werte wichen bis maximal 10 % von den gegebenen Sollwerten ab. Die Eignungsprüfung hatte gezeigt, daß auch größere als die beobachteten Rezepturschwankungen zu keiner signifikanten Änderung der mechanischen Eigenschaften des Verfestigungsproduktes geführt hätten.

Am Beispiel der Bindemittelzugabe ist die Einhaltung der Rezepturen hier dargestellt. Bild 3 gibt die Häufigkeitsverteilung der Bindemittelzugabe der mittleren von drei untersuchten Stichproben des 2. Bauabschnittes wieder.

Im Betriebstagebuch der Versuchsdeponie wurde der Einbauort jeder Charge dokumentiert. Darin wurden ebenfalls Angaben über die Witterung und die Temperatur beim Einbau registriert.

Die Kontrolle der mechanischen Eigenschaften erfolgte an Rückstellproben, die aus der Verfestigung einer für 500 m³ behandelten Abfalls repräsentativen Referenzmischung im Handproctorgerät hergestellt wurden. Das Material wurde in 3 Lagen in einen zylindrischen Schalkörper mit Fußplatte eingefüllt und mit 11 Schlägen je Lage verdichtet.

Zusätzlich wurden aus dem eingebauten, ausgehärteten Verfestigungsprodukt 8 Kerne gebohrt. Analog der Eignungsprüfung wurden die mechanischen Eigenschaften der Rückstellproben und der Bohrkerngeprüft. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Güteüberwachung des 2. Bauabschnitts den optimierten Werten aus der Eignungsprüfung gegenübergestellt.

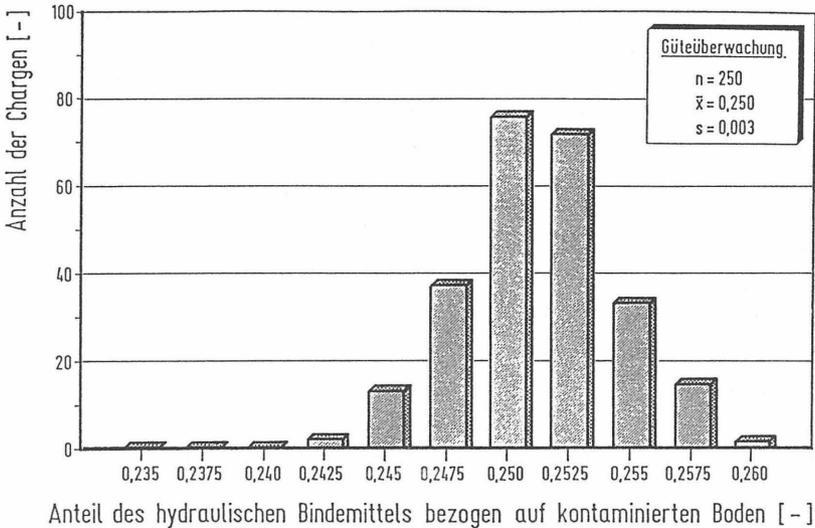


Bild 3: Häufigkeitsverteilung der Bindemittelzugabe, bezogen auf kontaminierten Boden; Stichprobe vom 02.11.-07.11.1988, 2. Bauabschnitt

4.4 Langfristige Überwachung

Die mechanischen Eigenschaften der Rückstellproben gleichen in etwa denen der in der Eignungsprüfung auf die gleiche Art hergestellten Probekörper. Die untersuchten Bohrkerne zeigen dagegen auch abweichende Werte. Die Druckfestigkeit der Bohrkerne ist etwas geringer als die der im Proctorgerät verdichteten Probekörper, jedoch immer noch sehr hoch. Im Durchströmungsversuch wurden sehr unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte an den Bohrkerne beobachtet. Der Mittelwert entspricht dabei zwar dem aus der Eignungsprüfung, die Werte waren jedoch von $k = 3,1 \times 10^{-8}$ m/s bis $k = 3,5 \times 10^{-12}$ m/s sehr breit gestreut.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Herstellung repräsentativer Rückstellproben problematisch ist und bei der Planung vorab besonders berücksichtigt werden muß.

Parameter	Eignungsprüfung	Güteüberwachung 2. Bauabschnitt					
		Rückstellproben			Bohrkerne		
		Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum
Zerfallsziffer z [%]	0	0	0	0	0	0	0
Druckfestigkeit							
$q_{u\ 14}$ [MN/m ²]	5,47	7,53	3,73	12,50	---	---	---
$q_{u\ 28}$ [MN/m ²]	7,93	8,67	5,97	13,22	6,72	5,45	8,52
$q_{u\ 56}$ [MN/m ²]	11,26	11,35	7,75	16,81	---	---	---
Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	6×10^{-11}	1×10^{-12}	$< 10^{-12}$	$1 \times 10^{-7*}$	9×10^{-11}	4×10^{-12}	3×10^{-8}
* Austrocknung der Probekörper durch Transportschäden							

Tabelle 3: Ergebnisse mechanischer Untersuchungen aus Eignungsprüfung und Güteüberwachung

Die Versuchsdeponie wird noch zwei Jahre nach Abschluß der Betriebsphase wissenschaftlich begleitet. Kernpunkt dieser Begleitung ist die Beobachtung des Wasserhaushaltes des Deponekörpers. Die entstehenden Sickerwasser- und Oberflächenwassermengen werden für beide Bauabschnitte getrennt elektronisch erfaßt. Für diese Messungen sind in den Dränageschächten Meßbehälter mit Hebevorrichtung installiert. Mit Druckaufnehmern wird jede Minute der Wasserstand im Meßbehälter ermittelt und im angeschlossenen Datensammler registriert. In regelmäßigen Abständen - zur Zeit jeweils vierteljährlich - werden die Meßdaten ausgelesen und ausgewertet.

Bild 4 zeigt für den 2. Bauabschnitt die registrierte Sickerwassermenge im Zeitraum vom 01.10.1989 bis zum 01.12.1989. Zusätzlich sind die in diesem Zeitraum registrierten Niederschläge größenordnungsmäßig angegeben.

Die entstandene Sickerwassermenge ist sehr gering. Starke Niederschläge wirken sich erst nach mehrtägiger Verzögerung auf die Sickerwasserneubildung verstärkend aus. Aus den Messungen läßt sich für den 2. Bauabschnitt ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von nur

Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens des Deponiekörpers wurden Anfang 1989 entlang der Mittelachse der Deponie 8 Kernbohrungen abgeteuft. Aus den gewonnenen Bohrkernen wurden 10 unterschiedliche Abschnitte ausgewählt, die vom IGB näher untersucht wurden.

Die Untersuchung umfaßte die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften und des Auslaugverhaltens der Bohrkernabschnitte.

Zunächst war festzustellen, daß bei den Bohrungen ausschließlich durchgehende Kerne gewonnen werden konnten. Nur wenig Material war in Bruchstücke zerfallen. Diese Bruchstücke und weitere, fester erscheinende Kernabschnitte wurden im Zerfallsversuch auf ihre Beständigkeit untersucht. Es war kein Zerfall zu beobachten, alle Proben blieben unter Wasser beständig.

Die Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit lieferte sehr unterschiedliche Werte. Die Druckfestigkeiten lagen zwischen $q_u = 1,97 \text{ MN/m}^2$ und $q_u = 13,79 \text{ MN/m}^2$. Probekörper, deren Druckfestigkeit nach dem Durchströmen in der Triaxialzelle ermittelt wurde, wiesen Festigkeiten zwischen $q_u = 1,21 \text{ MN/m}^2$ und $q_u = 5,15 \text{ MN/m}^2$ auf.

Im Durchströmungsversuch in der Triaxialzelle wurden Durchlässigkeitbeiwerte erreicht, die überwiegend zwischen $k = 1,8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ und $k = 1,2 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ lagen. Bei einem Probekörper lag die Durchlässigkeit sogar unterhalb der Meßgrenze der Apparatur ($k < 1,0 \times 10^{-12} \text{ m/s}$), es konnte keine Durchströmung festgestellt werden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Parameter	Mittelwert	Minimum	Maximum
Zerfallsziffer	0	0	0
Druckfestigkeit			
q_u	4,35	1,92	13,79
nach Durchströmen:			
q_{ud}	2,99	1,21	5,15
Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	$3,5 \times 10^{-12}$	$< 1 \times 10^{-12}$	$1,8 \times 10^{-8}$

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Bohrkernabschnitte

Der Durchströmungsversuch in der Triaxialzelle wurde gleichzeitig zur Beurteilung des Auslaugverhaltens genutzt. Die nach dem Durchströmen aus der Probe ausgetretene Wassermenge wurde gesammelt. Es wurden täglich pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Die zu Versuchsbeginn erhaltenen Eluate wurden chemisch analysiert.

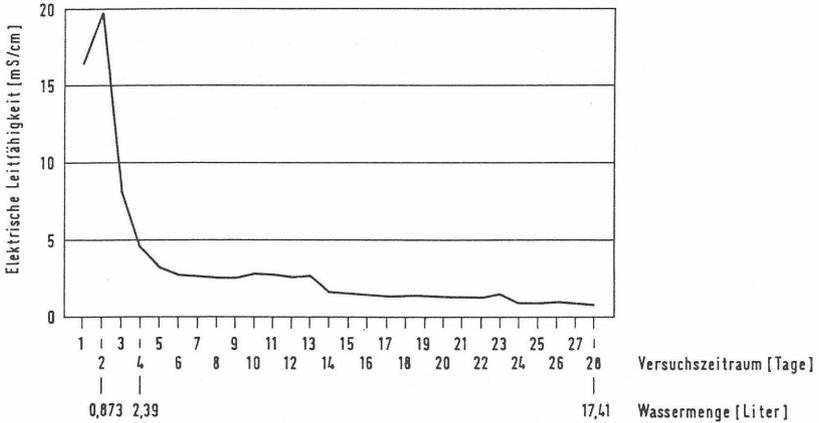


Bild 5: Elektrische Leitfähigkeit im Eluat des Durchströmungsversuches, Probe 1, $k = 1,8 \times 10^{-8}$ m/s

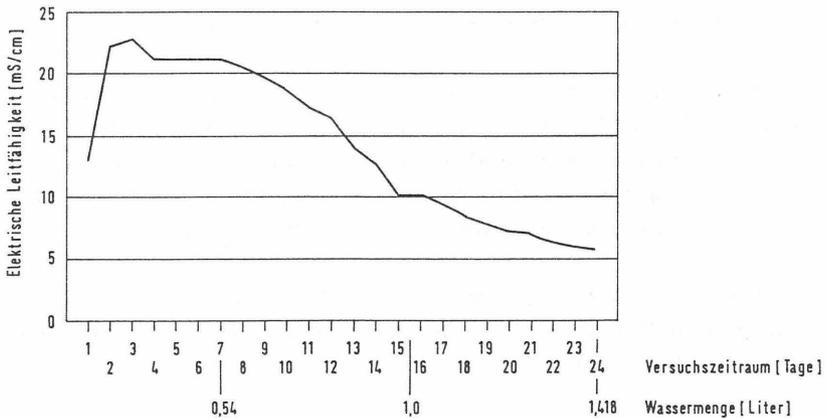


Bild 6: Elektrische Leitfähigkeit im Eluat des Durchströmungsversuches, Probe 2, $k = 1,2 \times 10^{-9}$ m/s

Es zeigte sich, daß die zu Versuchsbeginn sehr hohen Stoffkonzentrationen im Eluat mit zunehmender Durchströmung stark absanken. In den Bildern 5 und 6 ist diese Abnahme der Konzentrationen exemplarisch für die elektrische Leitfähigkeit dargestellt.

Die beiden untersuchten Probekörper unterscheiden sich dabei bezüglich ihrer Wasserdurchlässigkeit. Bei der Probe 1, die etwa um eine Zehnerpotenz durchlässiger ist als die Probe 2, sind bereits nach 4 Versuchstagen die auslaugbaren Stoffe im wesentlichen ausgetragen worden. Im später gewonnenen Eluat waren nur noch geringe Konzentrationen festzustellen. Bei der undurchlässigeren Probe 2 erstreckte sich der Stoffaustrag über den gesamten Versuchszeitraum von 24 Tagen. Bezogen auf die durchgeströmte Wassermenge jedoch war das Auslaugverhalten der beiden Probekörper in etwa gleich.

6. Zusammenfassung

Die Anwendung der in der TA Abfall (Entwurf) geforderten Kriterien auf unterschiedlichste verfestigte Abfälle hat gezeigt, daß die gestellten Anforderungen von einer Vielzahl von Verfestigungsprodukten erreicht werden können. Je nach Abfallart und Verfestigungsverfahren ist eine große Bandbreite in den mechanischen Eigenschaften festgestellt worden.

In der Eignungsprüfung sind die Einflüsse aus Schwankungen der Rezeptur, der Verdichtung, und vor allem des Verarbeitungszeitraumes auf die mechanischen Eigenschaften des Verfestigungsproduktes zu ermitteln. Abfallinhaltsstoffe können durch die Optimierung der mechanischen Eigenschaften häufig zumindest physikalisch eingebunden werden.

Ausschlaggebend für den Erfolg einer Verfestigungsmaßnahme ist die richtige Umsetzung aus dem Labormaßstab der Eignungsprüfung in den technischen Maßstab auf der Deponie. Einhaltung der Rezeptur, intensives Mischen, zügige Verarbeitung und vor allem sorgfältiger Einbau in den Deponiekörper mit ausreichender Verdichtung sind die wesentlichen Punkte, die dementsprechend im Rahmen der Güteüberwachung kontrolliert werden müssen.

Die Ergebnisse von Untersuchungen am Deponiekörper lassen darauf schließen, daß die Verfestigung von Abfällen, die den gestellten Anforderungen entspricht, eine langfristige Einbindung von Schadstoffen ermöglicht.

PRAXISNAHE PRÜFUNG DES DEPONIEVERHALTENS VON REAKTIVEN MASSENGÜTERN

Dr. J. Frigge

DMT - DeutscheMontan Technologie
Institut für Chemische Umwelttechnologie
Franz-Fischer-Weg 61
4300 Essen 13 (Kray)

Bei Prüfverfahren soll der Nutzen, also die Abwendung von Schäden, in einem sinnvollen Verhältnis zum Aufwand stehen. Je größer der Schaden sein kann, der durch eine falsche Prüfung/Charakterisierung entsteht, desto höher darf der Aufwand dafür sein, daß die Prüfmethode das infrage stehende Verhalten richtig beschreibt. Für Deponien heißt das, daß bei Massengütern sehr genau, d.h. praxisnah geprüft werden muß. Fehlbeurteilungen nach beiden Seiten haben bei Gütern, die in Mengen von einigen 100 000 t/a anfallen, fatale Folgen. Wird nämlich das Gefahrenpotential unterschätzt und das Material entsprechend deponiert, entsteht neben dem ökologischen auch ökonomischer Schaden - etwa für die Beseitigung der entstandenen Altlast. Bei einer Überschätzung des Gefahrenpotentials und entsprechender Ablagerung entstehen ebenfalls Schäden, und zwar neben den ökonomischen (Die Entsorgungskosten sind unnötig hoch und belasten letztlich die Volkswirtschaft.) auch beträchtliche ökologische - (Knapper und damit wertvoller Sonderdeponieraum wird vergeudet). Großlysimeter, die im folgenden beschrieben werden, bieten die Möglichkeit, das Deponieverhalten von unterschiedlichen Materialien praxisnah und flexibel zu beurteilen [1 - 3]

- Die Lysimeter (*Abbildung 1*) sind zylindrische Gefäße mit 2 m^2 Grundfläche und 2 m Höhe
- Sie sind aus thermisch verschweißtem Polyethylen oder Polypropylen hergestellt, damit die anorganische Analytik - auf diese beschränken sich die Arbeiten - nicht durch Kontamination oder Oberflächeneffekte gestört wird.
- Sie werden nicht zusätzlich beregnet, sondern sind nur der natürlichen Witterung ausgesetzt, damit alle Effekte voll wirksam werden, die auch in einer realen Deponie infolge des Wechsels von Regen- und Trockenperioden ablaufen.

- Die Eluate werden nach unten über ein Siphon abgezogen, damit von da kein Sauerstoff zutreten und das Milieu verändern kann.
- Die senkrechte Wand des Lysimeters stellt eine Störung dar, weil sie das Einsickern des Wassers beeinflusst. Dieser Effekt ist sichtbar gemacht und für den Zentralbereich des Lysimeters dadurch reduziert worden, daß der untere, 50 cm hohe, mit einer abgestuften Kiesfilterschicht gefüllte Teil des Lysimeters in einen äußeren Kreisring und einen inneren Kreis unterteilt ist. Beide Bereiche haben eine Grundfläche von je 1 m^2 und werden getrennt an ihrer jeweils tiefsten Stelle entwässert. Auf diese Weise werden die Eluate, die durch den gestörten Wandbereich gesickert sind, bevorzugt im äußeren Kreisring der Filterschicht gesammelt. Im Zentralbereich sind die Störeinflüsse geringer.
- Die Lysimeteranlage mit 26 Gefäßen ist auf dem Fundament einer ehemaligen Koksofenbatterie errichtet.

Diese Lysimeter liefern mit den im Zentralbereich gesammelten Eluaten ein praxisnahes Auslaugverfahren. Sie sind von ihren Abmessungen her geeignet für Stoffe, bei denen die entscheidenden Reaktionen in einer Schicht von 1 bis $1\frac{1}{2}$ m Dicke ablaufen. Das dürften vorwiegend feinkörnige, homogene Materialien wie z.B. Verbrennungsrückstände und Filterstäube sein. Für den sehr inhomogenen Hausmüll und vergleichbare Abfälle sind erheblich größere Abmessungen, vor allem auch bezüglich der Höhe, erforderlich, auch deshalb, weil die aeroben und anaeroben Zersetzungreaktionen anders nicht erfaßt werden können.

Will man die Auslaugeigenschaften, die sich im Lysimeterversuch ergeben, vergleichen mit denen, die in Labortests ermittelt werden, so ist eine Darstellung günstig, bei der die auf die Masseneinheit des Einsatzgutes m bezogene Gesamtfracht F_{spez} über dem Eluat-zu-Feststoff-Verhältnis Q aufgetragen wird [4]. Für Lysimeter und Säulentests errechnet sich die spezifische Gesamtfracht durch Aufsummieren der für die einzelnen Beprobungen berechneten Einzelfrachten $f_i = V_i \cdot c_i$, wo V_i die Eluatmenge und c_i die darin gemessene Konzentration der betrachteten Komponente bei der Beprobung i sind. Bei Kaskadentests ist für die Berechnung von Q davon auszugehen, mit wieviel Flüssigkeit eine bestimmte Feststoffmenge bzw. mit wieviel Feststoff eine bestimmte Flüssigkeitsmenge in den einzelnen Stufen zusammengekommen ist [2]. In den *Abbildungen 3 und 4* sind die Vergleiche für Sulfat im Filterstaub einer Trockenfeuerung und einer Rostfeuerung dargestellt. Unten sind jeweils die Werte für die Lysimeter, bei denen innerhalb des Versuchszeitraumes von über 3 Jahren die Q -Werte immer noch unter 1

lagen, in einem geänderten Maßstab dargestellt. Es wird deutlich, daß sich bei dem wenig reaktiven Produkt aus der Trockenfeuerung recht gut übereinstimmende Kurven ergeben. Für das Rostfeuerungsmaterial sind die Unterschiede zwischen Lysimeter und Säule auf der einen und Kaskade auf der anderen Seite dagegen erheblich. Noch größer werden die Unterschiede, wenn Rückstände aus der Wirbelschichtfeuerung mit i.a hoher Basenkapazität untersucht werden [5]. Die *Abbildungen 5 und 6* zeigen, daß im Kaskadentest 50 bis 100 g Sulfat/kg ausgewaschen werden, wobei bei Probe C bei $Q = 40$ schon eine Erschöpfung festzustellen ist. Im Lysimeter treten diese Erschöpfungen bei unter 1 g Sulfat/kg ein. Zudem sind die Eluatmengen vor allem im Zentralbereich mit Q deutlich unter 0,2 in einem Zeitraum von über 2 Jahren sehr klein. Bei einem weiteren Wirbelschicht-Rückstand ist bei dem 150 m hoch gefüllten Lysimeter seit über 2 Jahren kein Eluat abgegeben worden, wohl aber bei einem, das mit dem gleichen Material nur 30 cm hoch gefüllt ist. Das zeigt, daß Abbindevorgänge und die dadurch bedingte Wasserdurchlässigkeit nur in Lysimetern richtig wiedergegeben werden, daß dafür aber auch eine gewisse Mindestschichtdicke vorhanden sein muß, die sicher material-spezifisch ist.

Zu den Labortests ist anzumerken: Unsere Säulen (*Abbildung 7*) haben 27 cm Höhe und 14 cm Innendurchmesser und sind aus Polypropylen gefertigt. Sie werden von unten nach oben durchströmt, was Kanalbildung und Randeffekte reduziert. Das Probengut wird in einfache Rohrstücke eingefüllt, die nach dem Versuch aufgeschnitten werden können. Der druckfeste Außenteil ist aus Normbauteilen gefertigt.

Die Schütteltests werden in 2-l-Vierkantflaschen vorgenommen. Diese Flaschen werden mit 100 g Probengut oder der Menge, die 100 g Trockensubstanz entspricht, und mit 1 l Deionat gefüllt. Sie werden 24 Stunden lang langsam um ihre Längsachse gedreht. Das bewirkt eine schonende Umspülung des Probengutes mit Eluat.

Als Ergebnis der bisherigen Lysimeter- und Labortests ist festzustellen

- Für inerte, nicht reaktive Stoffe unterscheiden sich die verschiedenen Elutionsverfahren nicht wesentlich, d.h. nicht um Größenordnungen. Labortests reichen also aus für eine Charakterisierung.

- Reaktive Stoffe werden in Kurzzeittests falsch eingestuft, während im beschriebenen Lysimeter mineralogische, hydrogeologische und auch mikrobielle Effekte gut wiedergegeben werden.
- Das Abbinden/Wasserundurchlässigwerden im Lysimeter erfordert eine-materialabhängige-Mindestschichtdicke. So sind die Lysimeterergebnisse z.B. bei Wirbelschicht-Rückständen nicht völlig gleichzusetzen mit dem Verhalten in einer realen Monodeponie. Es ist zu erwarten, daß diese, wenn sie Mächtigkeiten von einigen Metern haben, auch wasserundurchlässig werden.
- Die Untersuchungen zur Verbesserung des Deponieverhaltens, die im Rahmen einer Dissertation bei uns zur Zeit laufen, sind noch nicht abgeschlossen. Wir haben Mischungen - homogen gemischte Stoffe und schichtweise eingebrachte Stoffe - zunächst in unseren Säulen daraufhin überprüft, ob sich eine Reduzierung des Schadstoffaustrages feststellen läßt. Die gleichen Tests wurden in Lysimetern angesetzt. Diese sind nach 12 Monaten immer noch trocken. Das zeigt schon, daß eine gründliche Lysimeteruntersuchung den Rahmen einer Dissertation sprengt. Es muß längerfristig gedacht und gearbeitet werden. Das vom BMFT geplante Verbundvorhaben "Deponiekörper" bietet sich dafür an.

Wo könnten Einsatzmöglichkeiten für diese Tests im halbtechnischen Maßstab liegen?

- Zunächst planen wir, mindestens 4 Lysimeter mit Wirbelschichtrückständen im Lauf des Sommers zu leeren und dabei den Deponiekörper gründlich zu untersuchen, und zwar chemisch, mineralogisch und auch - das ist besonders wichtig - bezüglich bodenmechanischer Eigenschaften.
- Bisher noch nicht näher untersuchte Reststoffe, die in Massen anfallen oder von denen das zu erwarten ist, sollten möglichst bald einer "Typenprüfung" im Lysimeter unterzogen werden. Dabei wäre etwa an Rückstände aus der Müll- und Sonderabfallverbrennung zu denken, allein oder gemischt mit geeigneten Bindern, aber auch an Altlasten-Material, das zur Beseitigung organischer Schadstoffe thermisch behandelt worden ist. Über das Verhalten anorganischer Komponenten nach dieser Behandlung liegen kaum Erkenntnisse vor.
- Die Richtlinien, die die Deponierbarkeit betreffen, müßten für derartige Tests erweitert und die aus den Ergebnissen abgeleiteten Beurteilungskriterien anerkannt werden. Dabei dürften weniger die Schadstoffkonzentrationen in den Eluaten/Sickerwässern eine Rolle spielen als vielmehr die spezifischen Frach-

ten, die pro Zeiteinheit (Jahr) an die Umwelt abgegeben werden, sowie deren zeitliche Veränderung. Verfestigungsmaßnahmen, die genau das beeinflussen, würden so sachgerecht beschrieben.

Die vorgestellten halbtechnischen Lysimeter sind geeignet, körnig und mehr oder weniger homogen anfallende Massengüter, wie z.B. Verbrennungsrückstände, praxisnah auf ihr Deponieverhalten zu prüfen und zu charakterisieren. Sie bieten die Möglichkeit, im Deponiekörper ablaufende Reaktionen zu untersuchen und besser zu verstehen. Aus den in Zeiträumen von wenigen Jahren ermittelten Tendenzen der Eluateigenschaften können - unter Umständen in Kombination mit anderen Prüfmethode - Rückschlüsse auf das Langzeitverhalten realer Deponien gezogen und Hinweise darauf abgeleitet werden, wie möglichst umweltneutrale Deponiekörper aus den beschriebenen Massengütern aufzubauen sind.

Die Untersuchungen wurden finanziell gefördert vom Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus und der EG-Kommission.

Literaturverzeichnis

- [1] Hünert, R.: Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung des Deponieverhaltens
Dissertation Universität Paderborn (1986)
- [2] Frigge, J.: Lysimeteruntersuchungen zur Beurteilung des Deponieverhaltens
von Kraftwerksnebenprodukten
VGB Kraftwerkstechnik 68(1988), S. 143-150
- [3] Hünert, R. und J. Frigge: Auffangbehälter für Versickerungsmesser
EPO 173 971 A 2
- [4] Frigge, J.: Prüfung des Deponieverhaltens. - Wie praxisnah sind Labortests?
Gewässerschutz-Wasser-Abwasser 105 (1988) S. 142-160
- [5] Frigge, J.: Charakterisierung von Wirbelschicht-Flugasche bezüglich ihrer
Nutzung und ihres Deponieverhaltens
- [6] Frigge, J. u. R. Hünert: Vorrichtung zur inversen Säulen-Elution
G 8707 159.2

- Abb. 1 Skizze Lysimeter
- Abb. 2 Kaskadentest, Durchführung und Berechnung der Eluat-zu-Feststoff-Verhältnisse Q
- Abb. 3 Aus Trockenfeuerungs-Filterstaub im Kaskadentest, im Säulentest und im Lysimeter eluierte Sulfatfrachten
- unten: Im Lysimeter eluierte Sulfatfracht, geänderte Maßstäbe
- Abb. 4 Aus Rostfeuerungs-Filterstaub im Kaskadentest, im Säulentest und im Lysimeter eluierte Sulfatfrachten
- unten: Im Lysimeter eluierte Sulfatfracht, geänderte Maßstäbe
- Abb. 5 Wirbelschicht-Rückstände, spezifische Sulfatfrachten in den Eluaten (unterschiedliche Maßstäbe!). Ordinate jeweils Sulfatfracht in g/kg Probe
- Abb. 6 Säule zur inversen Elution

1.Stufe:

0.1 kg Feststoff werden mit 1 l Wasser eluiert. Das Eluat wird abfiltriert und analysiert.

0.1 kg Feststoff sind mit 1 l Wasser in Berührung gekommen.

$$Q = 10$$

2.Stufe:

Der eluierte Feststoff wird mit frischem Wasser bis zu einem Gesamtgewicht von 1.100 kg versetzt und weiter eluiert. - Die Masse des eluierten Feststoffanteils ist dabei gegen die Masse des eingesetzten Feststoffes vernachlässigt worden. - Das Eluat wird abfiltriert und analysiert.

0.1 kg Feststoff sind mit 2 l Wasser in Berührung gekommen.

$$Q = 20$$

3.Stufe:

Der eluierte Feststoff wird mit frischem Wasser bis zu einem Gesamtgewicht von 2.100 kg versetzt und weiter eluiert. - Die Masse des eluierten Feststoffanteils ist dabei gegen die Masse des eingesetzten Feststoffes vernachlässigt worden. - Das Eluat wird abfiltriert und analysiert.

0.1 kg Feststoff sind mit 4 l Wasser in Berührung gekommen.

$$Q = 40$$

4.Stufe: entsprechend.

$$Q = 60$$

1.Stufe:

2 l Wasser mit 0.2 kg Feststoff versetzen, schütteln, filtrieren, Teil des Filtrates zur Analyse.

2 l Eluat sind mit 0.2 kg Feststoff in Berührung gekommen.

$$Q = 10$$

2.Stufe:

1.5 l des Filtrates mit 0.2 kg Feststoff versetzen, schütteln, filtrieren, Teil des Filtrates zur Analyse.

1.5 l Eluat sind mit 75% des Feststoffes aus der 1.Stufe und mit dem gesamten Feststoff aus der 2.Stufe, also mit 0.35 kg in Berührung gekommen.

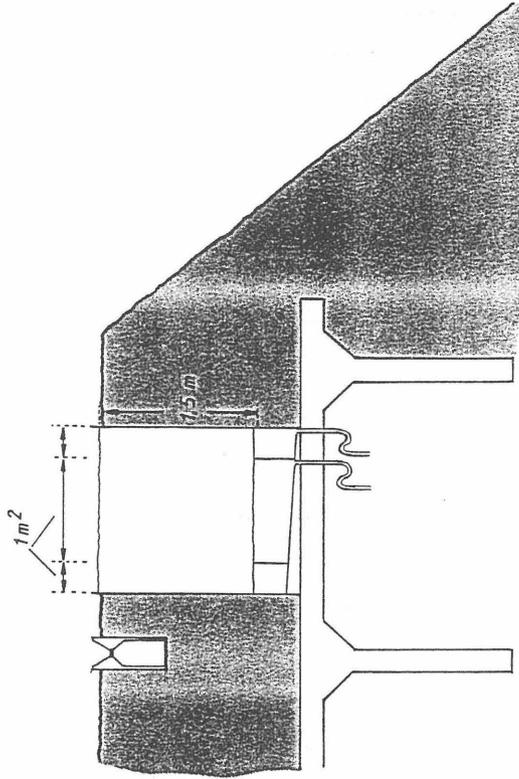
$$Q = 1.5/0.35 = 4.29$$

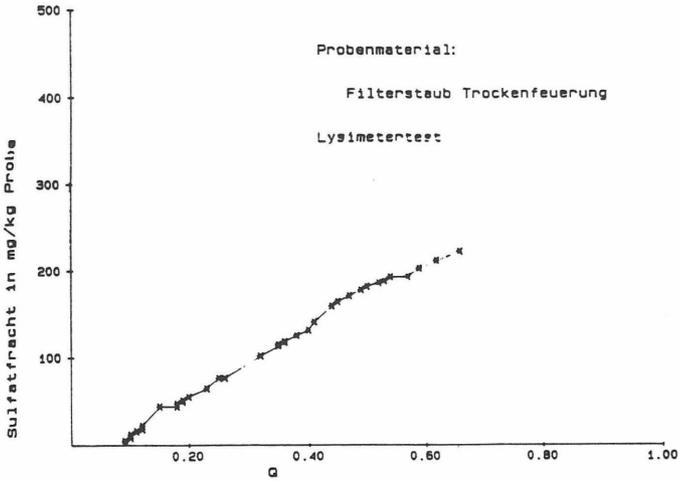
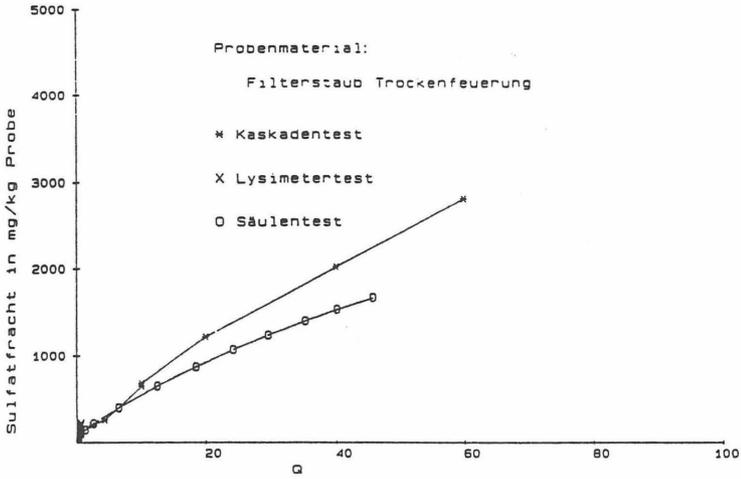
3.Stufe:

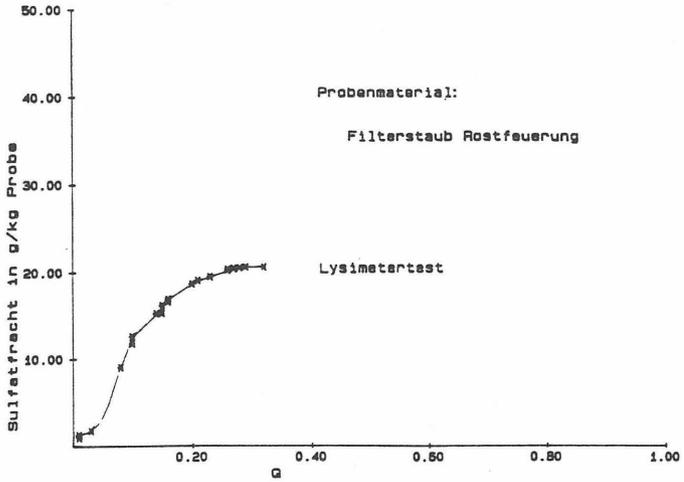
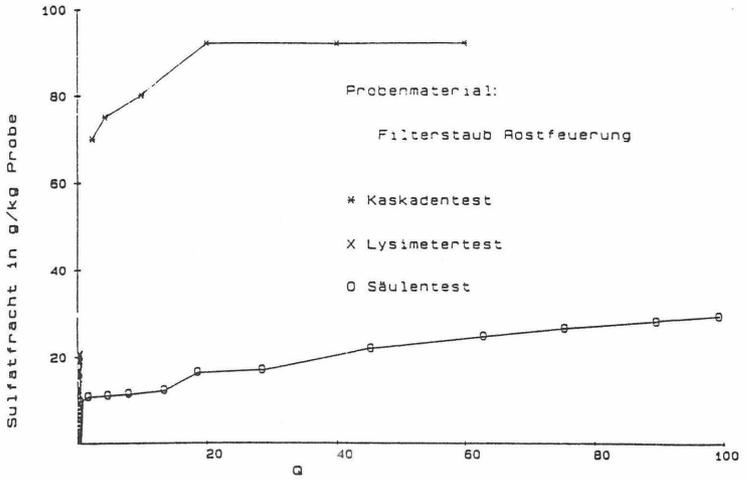
1 l des Filtrates mit 0.2 kg Feststoff versetzen, schütteln, filtrieren, Filtrat zur Analyse.

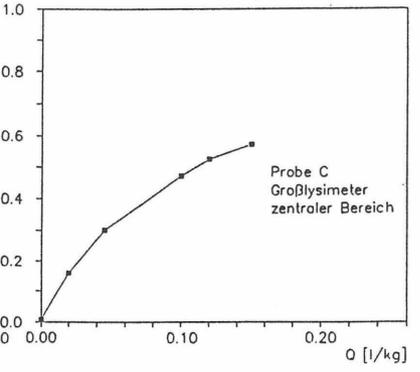
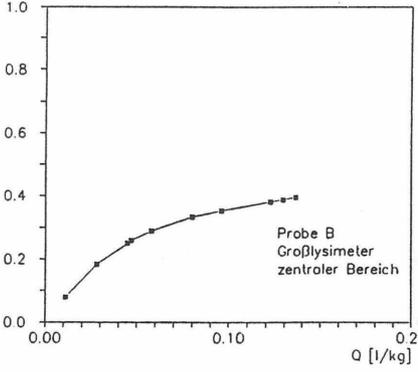
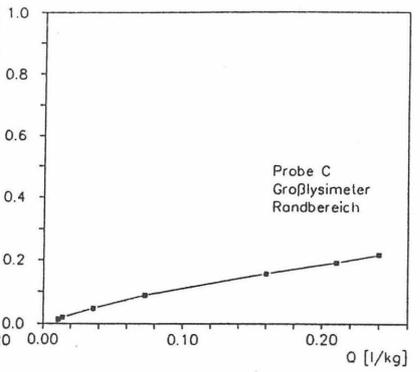
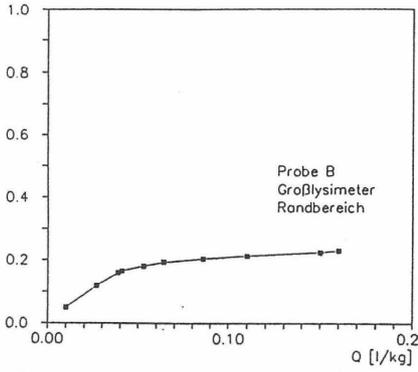
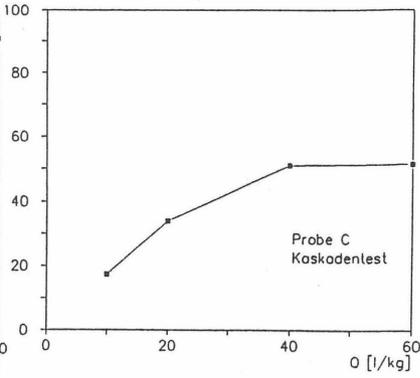
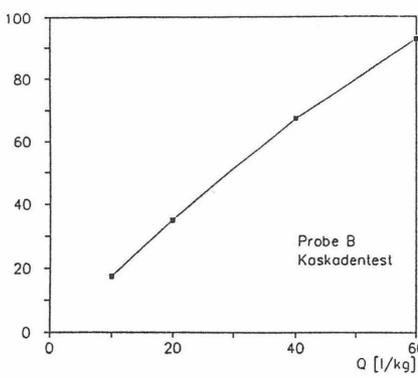
1 l Eluat ist mit 50% des Feststoffes aus der 1.Stufe, mit 66.7% des Feststoffes aus der 2.Stufe und mit dem gesamten Feststoff aus der 3.Stufe, also mit 0.433 kg in Berührung gekommen.

$$Q = 1/0.433 = 2.31$$



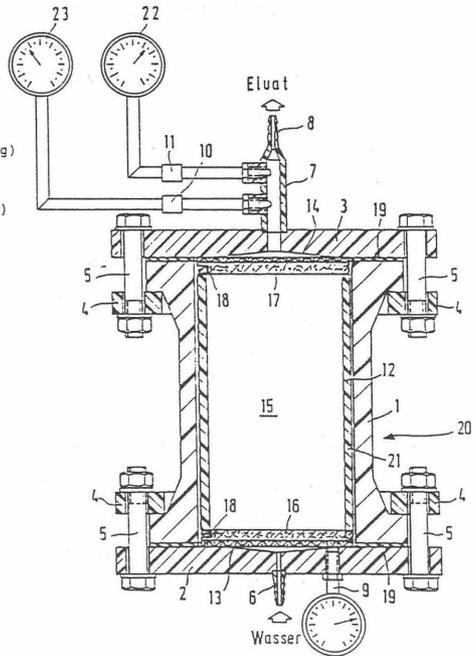






BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Druckzylinder
- 2 Bodenplatte
- 3 Kopfplatte
- 4 Halteflansch
- 5 Halteschraube
- 6 Anschlußnippel (aufgabeseitig)
- 7 Rohrstück
- 8 Anschlußnippel (abflußseitig)
- 9 Druckmeßgerät
- 10 Probenahmeanschluß
- 11 Probenahmeanschluß
- 12 Innenrohr
- 13 Siebboden (aufgabeseitig)
- 14 Siebboden (abflußseitig)
- 15 Probenraum
- 16 Filter (aufgabeseitig)
- 17 Filter (abflußseitig)
- 18 Dichtring
- 19 Dichtring
- 20 Außengehäuse
- 21 Feststoffprobenbehälter
- 22 Meßgerät
- 23 Meßgerät



Beratende Ingenieure für das Bauwesen



Ingenieurgesellschaft m.b.H.

Arbeitsgebiete:

Pockelsstraße 9
Telefon: 0531-34 52 71
Telefax: 0531-34 00 56

3300 Braunschweig

Fuhlsbüttler Straße 257
Telefon: 040-61 40 91
Telefax: 040-61 41 90

2000 Hamburg 60

Umweltschutz -

Umweltechnik

■ **Deponietechnik, Abfallwirtschaft**

Erarbeitung von Standortanalysen, Entwürfen und technischen Gesamtkonzepten, Projektsteuerung, Ausschreibung, Bauüberwachung

■ **Altlasten und Altstandorte**

Erfassung und Erkundung, Zustandsanalysen, Bewertung von Risiken, Erstellung von Durchführbarkeitsstudien und Sanierungskonzepten, Planung und Überwachung von Arbeitsschutzmaßnahmen, Ausschreibung, Vergabeberatung, Bauüberwachung

■ **Geomonitoring**

Langzeitüberwachung, Nachsorge, Qualitätskontrolle

■ **EDV - Entwicklung**

EDV - gestützte Ablauf-, Termin- und Kostenplanung, Erstellung von Software, Anwenderschulung

■ **Koordination, Präsentation, Seminare**

Übernahme von Koordinationsaufgaben, Ergebnispräsentation, Durchführung von Seminaren

Verfahren zur Ablagerung von Rauchgasreinigungsrückständen aus Müllverbrennungsanlagen

von

Dr. R. Oberste-Padtberg und Dr. A. Roeder

Rheinische Kalksteinwerke Wülfrath

1. Einleitung

Die oberirdische Ablagerung unkonditionierter Reststoffe aus der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen (MVA) wird durch das Inkrafttreten der TA Sonderabfall [1] weitgehend erschwert, da zum einen der Anteil an löslichen Bestandteilen und zum anderen der eluierbare Schwermetallgehalt eines großen Teils dieser Reststoffe die Grenzwerte dieser Verordnung überschreiten.

Somit ist also die Beherrschung des auslaugbaren Bestandteils von Müllverbrennungsrückständen ein zentrales technisches Problem.

Die Bearbeitung dieses Themas ist an vielen Stellen in vollem Gange und umfaßt Vorschläge zur Verbesserung der Deponietechnik ebenso wie solche zur Vorbehandlung der Stäube.

2. Chemische und mineralogische Beschreibung von Rauchgasreinigungsrückständen aus Müllverbrennungsanlagen

Prinzipiell sei bei den Rauchgasreinigungsrückständen aus Müllverbrennungsanlagen unterschieden zwischen denen aus der physikalischen (also Flugstäube, die in Filtern abgetrennt werden) und solchen aus der chemischen Reinigung (MVA-Salze) durch Absorption von hauptsächlich HCl, SO₂,

SO₃ und HF durch Ca(OH)₂. Die sich hieraus ergebenden Phasen in den Rückständen sind neben basischem Chlorid (CaCl₂ * Ca(OH)₂ * n H₂O), Calciumchlorid (CaCl₂ * n H₂O), Anhydrit (CaSO₄), Halbhydrat (CaSO₄ * 1/2 H₂O), Gips (CaSO₄ * 2 H₂O) und Fluorit (CaF₂), welche den Restportlandit (Ca(OH)₂) schalenförmig umgeben. Aus diesem Aufbau der chemischen Rauchgasreinigungsrückstände ergibt sich, daß die leichtlöslichen Bestandteile (hier: hauptsächlich CaCl₂), welche das nicht verbrauchte Absorptionsmittel (Portlandit) umgeben, bei der Elution nach DEV S 4 zu fast 100 % ausgelaugt werden. Darüber hinaus wird das Absorptionsmittel durch die hohe CO₂-Aktivität in den Rauchgasen noch partiell zu CaCO₃ karbonatisiert und kann, anlagenbedingt, durch Flugaschepartikel verunreinigt sein. Somit treten in den o. g. Rückständen noch unterschiedliche Mengen an Ca-Al-Silikaten, Alkali-Al-Silikaten sowie Eisenoxiden und -hydroxiden neben metallische Komponenten, wie z. B. Al, auf. Sowohl an den Flugaschepartikeln als auch an den Rauchgasreinigungsrückständen kondensieren leichtflüchtige Schwermetallverbindungen, meist Pb-, Zn- und Cu-Verbindungen, die als Chloride oder basische Chloride (z. B. ZnCl₂ * 4 Zn(OH)₂) anfallen. Die zu erwartenden Schwankungsbreiten von MVA-Salzen sind in [2] aufgeführt.

3. Aktuelle Deponierungspraktiken ohne Rückstandskonditionierung

In vielen Fällen werden derzeit die unbehandelten MVA-Stäube in kleinen Deponien zwischen- oder endgelagert, wobei in der Regel diese Ablagerungsstellen über Basisabdichtungen verfügen, doch nicht alle über eine getrennte Erfassung von Sicker- und Oberflächenwasser. Die Einlagerung erfolgt sowohl in trockener als auch in erdfechter Form.

Für die trockene Einlagerung werden die Stäube in Big Bags oder in Container gefüllt und innerhalb des Deponiebereiches gestapelt. Nachteilig ist bei dieser Art der Ablagerung die schlechte Ausnutzung des Deponievolumens wegen der geringen Schüttdichte der Stäube, die in einigen Fällen $0,5 \text{ Mg/m}^3$ und weniger betragen kann und die nicht holhraumfreie Stapelung bei Verwendung von Big Bags. Schließlich führt Wasserzutritt bei Schädigung oder Verrottung der Verpackung zu einer Volumenkontraktion und darüber gestapelte Behälter können in Bewegung geraten und ebenfalls beschädigt werden. Das angestrebte Ziel der sicheren Isolierung der Stäube vom Niederschlagswasser durch Verpackung wird nicht mit der gewünschten Sicherheit erreicht.

Bei der erdfeuchten Einlagerung wird nach dem Vermischen der Stäube mit Wasser die erdfeuchte Masse zum Einlagerungsort gebracht und per Schaufellader verteilt und teilweise mit einer Walze verdichtet. Die Durchlässigkeit von solchen verdichteten Deponiekörpern schwankt beträchtlich, unter anderem auch in Abhängigkeit vom Rest- Ca(OH)_2 -Gehalt: Hohe Restkalkgehalte führen zu niedriger Durchlässigkeit und vice versa. Wegen der stets vorhandenen Basisabdichtungen kann bei allen diesen Deponietypen eine Grundwasserkontaminierung ausgeschlossen werden [3].

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang auch die verlässliche Abdichtung einer 60 cm mächtigen mineralischen Dichtschicht unter einer großen Halde von Salzrückständen (mit 80 % NaCl), die in der Nähe von Fulda, seit 1954 beginnend, auf einer Fläche von 28 Hektar aufgeschüttet wurde und der derzeit noch 3 Mio. Mg/a zugeführt werden: Ständige Grundwasseranalysen im Umkreis der Deponie weisen aus, daß keine chloridhaltigen Lösungen austreten [4].

Generell sind Kleindeponien zur Entsorgung von MVA's in deren unmittelbarer Nähe mit den Nachteilen behaftet, daß die Anzahl der Deponiestandorte, die in der Kapazität meist begrenzt sind, in unerwünschter Weise anwächst, daß häufig keine ordnungsgemäße Entsorgung, respektive Behandlung anfallender Sicker- und Oberflächenwässer gegeben ist und daß bei manchen solcher Kleindeponien bei der Ablagerung als erdfeuchte Masse auch Staub- und Geruchsprobleme auftreten.

4. Das Wülfrather 3-Stufen-Konzept zur Deponierung von MVA-Reststoffen

Um den teilweise widersprüchlichen Einflußgrößen - Dringlichkeit der sicheren Entsorgung von MVA's bei langen Genehmigungsverfahren von Deponievorhaben auf der einen und nicht abgeschlossene Entwicklungsarbeiten auf der anderen Seite - zu genügen, wurde bei den Rheinischen Kalksteinwerken Wülfrath ein Konzept [5] entwickelt, welches in der 1. Stufe mit der Deponierung von mit Zement verfestigten MVA-Stäuben beginnt und, zu einem späteren Zeitpunkt, in weiteren Stufen, die Möglichkeiten der Vorbehandlung von MVA-Stäuben einbezieht, um den knappen Deponieraum zu schonen. Dieses Konzept ist zusammengefaßt in Bild 1 dargestellt:

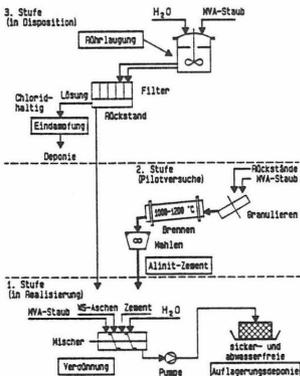


Bild 1: Mehrstufiges Konzept der Deponierung und Behandlung von MVA-Stäuben

- In der 1. Stufe werden die salzhaltigen MVA-Stäube mit salzarmen Rückständen, wie z. B. Wirbelschichtaschen, verdünnt und mit Zement und dem erforderlichen Anmachwasser vermischt und auf Durchlässigkeitswerte $K_f < 10^{-9}$ m/s eingestellt. Mit der Mörtelmischung wird lagenweise eine monolithische sicker- und abwasserfreie Auflagerungsdeponie aufgebaut.

In dem stets angestrebten Multibarrieren-System für Deponien stellt damit der Deponiekörper selbst eine wesentliche Barriere dar.

- In der nächsten, der 2. Stufe, ist die Verwendung von Alinitzement mit einem Chloridgehalt von etwa 9 % vorgesehen, der in einer separaten Anlage aus MVA-Stäuben und weiteren Rückständen gebrannt wird.
- Schließlich ist als 3. Stufe für einen Teil der MVA-Stäube eine hydrometallurgische Auslaugung in der Disposition; die dabei anfallenden Rückstände dienen dann später der Verdünnung der MVA-Stäube der ersten Stufe.

Anfang 1988 wurde für eine Auflagerungsdeponie mit einem Volumen von insgesamt 5 Mio. m³ und einer geplanten jährlichen Einlagerung von 0,25 Mio. Mg verschiedener Rauchgasreinigungsrückständen - davon 0,05 bis 0,07 Mio. Mg/a MVA-Stäube - das Planfeststellungsverfahren eröffnet.

4.1 Großtechnische Auflagerungsdeponie von mit Zement verfestigten MVA-Stäuben - 1. Stufe des RKW-Konzeptes

Über das Deponieverhalten von mit Zement verfestigten Aschen, Flugstäuben und auch MVA-Stäuben im Hinblick auf

erzielbare Festigkeiten, Absenkung der Durchlässigkeit, Veränderung der Eluierbarkeit von Begleitelementen und Salzen etc. finden sich in zunehmendem Maße ausführliche Angaben in der Literatur, in denen Labor-, aber auch Feldversuche beschrieben werden (s. z. B. [2], [5], [6]).

Die Verfestigung mit Zement bietet die Möglichkeit, die Durchlässigkeit auf zuverlässig $K_f < 10^{-9}$ m/s - also auf die Durchlässigkeit von Dichtschichten - abzusinken. Hierzu ist es notwendig, Rezepturen zu entwickeln, die ein Aushärten ohne Bildung von treibenden Mineralien erlauben und mit denen sich wasserstabile abgebundene Körper bilden lassen.

Das Verhalten der ohne Vorbehandlung auslaugbaren Anteile ist bei der Verfestigung mit Zement unterschiedlich: Während durch die drastische Absenkung der Löslichkeit im hohen und stark gepufferten pH-Bereich der Portlandzementbindung die Schwermetalle gut eingebunden werden - dies gilt vor allem für Cd, Pb, Zn, aber auch für Cu ([6], [7], [8]) - wird dagegen CaCl_2 nur in beschränktem Maße chemisch gebunden. Wegen der sehr niedrigen Durchlässigkeit kann aber bei ausreichender Mächtigkeit der Deponie davon ausgegangen werden, daß sich die CaCl_2 -Auslaugung auf die Oberfläche bei Kontakt mit Niederschlagswasser beschränkt und daß darüber hinaus die Deponie praktisch "dicht" ist und kein Sickerwasser durchläßt.

Dies ergibt sich aus Praxis- (s. z. B. [6]) und Laborversuchen mit verfestigten Müllverbrennungsrückständen: Die Umspülung eines verfestigten MVA-Salz-Körpers mit ständig nachlaufendem Frischwasser führt zu einer oberflächlichen Auslaugung dessen löslicher Bestandteile. Somit nimmt z. B. die Cl-Auslaugung aus einem solchen Körper mit der Zeit drastisch ab, wie aus Bild 2 zu ersehen ist.

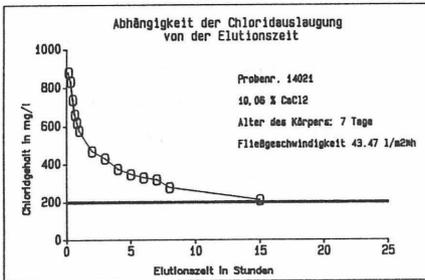


Bild 2: Cl-Auslaugung aus einem mit Zement verfestigten Deponie-Zement-Mörtel

In [9] werden unterschiedliche "Speichermineralien" beschrieben, die sowohl Schwermetalle als auch Chloride in ihr Kristallgitter einbauen können. Hier wird zwischen Speichermineralien der ersten (Calciumsulfatoaluminat-hydrate, Ettringit) und solchen der zweiten Generation (Calciumsilikathydrat) unterschieden. Durch deren fortschreitenden Bildung nimmt der Anteil an z. B. leichtlöslichen Chloriden mit zunehmender Reaktionszeit ab.

Über die Anfang 1988 zur Genehmigung eingereichte Auflage-
rungsdeponie von RWK ist bereits an anderer Stelle be-
richtet worden, z. B. [10]. Mörtelmischungen werden zur
Erreichung der niedrigen Durchlässigkeit von K_f
< 10^{-9} m/s die erforderlichen Mengen Zement und Anmach-
wasser zugesetzt, und sie werden den Deponieflächen zuge-
führt. Als Deponiestandort ausgewählt wurde eine nieren-
förmige Fläche von 20 Hektar neben einem nicht mehr in
Betrieb befindlichen Kalksteinbruch (Dachskuhle) in der
Nähe von Wülfrath.

Die Mischstation ist für den jährlichen Durchsatz von
0,25 Mio. Mg an Reststoffen und MVA-Stäuben konzipiert.
Die Zusammensetzung der Mischungen für die zwei Deponien
erfolgt unter dem Gesichtspunkt der Minimierung des
Zementbedarfs, im Falle der Monodeponie II mit den MVA-
Stäuben wird darüber hinaus in der Mischung der $CaCl_2$ -Ge-
halt auf < 10 % eingestellt. Durch diese Verdünnung las-
sen sich die für die Deponierung erforderlichen technolo-
gischen Werte stets gut erreichen.

Die vorgestellte Auflagerungsdeponie hat einerseits technischen Zuschnitt - das Volumen von 5 Mio. m³ sollte in 17 bis 20 Jahren aufgefüllt sein - andererseits soll durch entsprechende Einrichtungen, z. B. durch Basisabdichtungen mit aufgelegtem Flächenfilter, der Nachweis der Sickerwasserfreiheit erbracht werden; es ist danach auch ein Pilotprojekt.

4.2 Herstellung und Einsatz von Alinitzement bei der Reststoffverfestigung - 2. Stufe des RKW-Konzeptes

Bei der Verfestigung von Rückständen mit Zement beansprucht die Zementkomponenten in unerwünschter Weise Deponieraum. Es liegt darum die Überlegung nahe, den Zement selbst aus Rückständen herzustellen. Eine in diesem Sinne gute Lösung ist die Herstellung von Alinitzement unter Verwendung von MVA-Stäuben als Bestandteil in der zu brennenden Rohmehlmischung und diesen Zement als hydraulisches Bindemittel einzusetzen.

Der Alinit-, auch Chlorzement genannt, ist gut bekannt; in der UdSSR werden jährlich über 0,1 Mio. Mg hergestellt. Die Hauptkomponente, Alinit - $21 \text{ CaO} * 6 \text{ SiO}_2 * \text{Al}_2\text{O}_3 * \text{CaCl}_2$ - ist ein hydraulisches Mineral, welches nach Wasserzugabe diesen Binder schnell aushärten läßt, mit Frühfestigkeiten, die denen vom Portlandzement weit überlegen sind [11], [12]. Wegen der niedrigen, nur 950°C bis 1 100°C betragenden, Brenntemperatur ist der Energieaufwand bei der Herstellung von Alinitzement vergleichsweise niedrig [13]; das CaO/SiO₂-Verhältnis wird mit 2,65 - 3,25 angegeben [11] und liegt damit in einem Bereich, der für viele MVA-Stäube in etwa zutreffend ist [2].

In Labor- und kleintechnischen Versuchen wurden die Herstellungsbedingungen von Alinitzement unter Verwendung von

MVA-Salzen und -Flugaschen ermittelt, und es wurden Verfestigungs- und Eluierungsversuche durchgeführt. Für die Herstellung wurden MVA-Stäube verwendet, deren Analysen in [14] aufgeführt sind.

Das Rohmehl wird je nach Zusammensetzung der Reststoffe aus MVA-Salz, MVA-Flugasche und CaO (als Kalksteinmehl zugegeben) zusammengesetzt und in granulierter Form bei 1 050°C gebrannt [14]. Das gebrannte Gut wird anschließend zementfein aufgemahlen.

Nach dem Brennen wurden an wichtigen mineralogischen Phasen röntgenografisch festgestellt: Alinit, Belit sowie CaCl₂-haltiges Calciumaluminat.

Eluierversuche, an den unverfestigten Zementen mit der 10fachen Menge Wasser und über 24 Stunden durchgeführt, zeigen, daß nur maximal 53 % des Chloridgehaltes auslaugbar sind, verglichen mit 98 % in den ungebrannten Ausgangsstoffen; d. h. fast 50 % oder mehr des Chloridanteils sind im Alinitzement fest gebunden und nicht auslaugbar (s. [14]).

Bei Abbindeversuchen erreicht der Alinitzement bei einem Wasser/Zement-Wert von 0,22 Druckfestigkeiten von etwa 32 N/mm² nach 24 h und etwa 42 N/mm² nach 28 d-Lagerung. Das ausgehärtete Material ist wasserstabil (mehrmonatige Lagerung unter Wasser ohne Rißbildung).

In Proctorversuchen wurde dann die Eignung von Alinitzement für die Verfestigung von unbehandelten MVA-Stäuben und Flugaschen ermittelt. In Verfestigungsversuchen einer Mischung von 20 % MVA-Salz, 40 % MVA-Flugasche und 40 % Alinitzement (Probe 3, Tabelle 1) und einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 0,37 stiegen nach einer Hydratationsdauer von 1 d, 7 d und 28 d die Druckfestigkeiten von 4,7 über 13,0 auf 25,4 N/mm² an (der 1 d-Wert übersteigt da-

mit deutlich die in [2] geforderte Druckfestigkeit von $> 0,2 \text{ N/mm}^2$, welche zur Befahrbarkeit eines Deponiekörpers nach 24 h notwendig ist).

Weiter wurden Oberflächenauslaugungsversuche an Proctorkörpern ($r = 5 \text{ cm}$, $h = 12 \text{ cm}$) angestellt, um die Reduktion der Chloridauslaugung nachzuweisen von mit Alinitzement gebundenen Mischungen im Vergleich zu solchen, die mit Portlandzement (PZ) oder Hochofenzement (HOZ) gebunden sind. Die Mischungen der 4 Proben sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Auslaugung werden die Oberflächen der Proctorkörper mit einer stündlichen Frischwassermenge von 10 l/m^2 umspült; begonnen wurde jeweils nach einer Aushärtezeit von 24 h. Die Tabelle weist aus, daß - bei etwa gleichen Chloridkonzentrationen - aus der mit Alinitzement gebundenen Mischung (Probe 3) nach 78 h im Vergleich zu den PZ, respektive HOZ gebundenen Mischungen deutlich geringere Chloridmengen ausgelaugt werden; die besten Werte werden mit der reinen Alinitzementprobe erreicht (Probe 4), aus der, trotz höchster Chloridkonzentration, nach 78 h nur 13,4 % ausgelaugt werden.

Danach ist Alinitzement, hergestellt unter Verwendung von MVA-Stäuben, ein gut geeigneter Deponiebinder. In naher Zukunft sind Betriebsversuche zur Herstellung einer Menge von einigen Tonnen geplant. Bei diesen Betriebsversuchen steht die Rauchgasreinigung nach dem Brennaggregat im Vordergrund; die bei der Reinigung anfallenden Chloride werden wieder der Rohmehlmischung zugeführt.

Tabelle 1

Proctorkörper mit unterschiedlichen Deponierezepturen:
Oberflächenauslaugung, Durchlässigkeiten und Druckfestigkeiten

Proctor-Versuch Proben-Nr.		1	2	3	4
PZ	%	22	-	-	-
HOZ	%	-	22	-	-
Alinitzement	%	-	-	40	100
MVA-Staub	%	50	50	20	-
WS-Asche	%	28	28	-	-
MVA-Flugasche (Tabelle 1)	%	-	-	40	-
Wasser/Feststoff		0,6	0,6	0,37	0,22
Chloridkonzentration in g/l im Festkörper		108	108	110	161
davon ausgelaugt nach 78 h in	%	50,2	61,0	28	13,4
K _f -Wert (m/s) nach 28 d		< 10 ⁻⁹	< 10 ⁻⁹	< 10 ⁻⁹	< 10 ⁻⁹
Druckfestigkeiten in N/mm ²					
nach 24 h		1,8	0,5	4,7	32,1
nach 28 d		8,0	14,0	25,4	42,1

5. Abtrennung der löslichen Salze durch hydrometallur-
gische Behandlung der MVA-Stäube - 3. Stufe des RKW-
Konzeptes

Die hydrometallurgische Behandlung von MVA-Stäuben, wie sie in Bild 1 schematisch dargestellt ist, wird zunehmend diskutiert, weil sich die Salzkomponenten, vornehmlich das CaCl₂, in wäßrigen Lösungen schnell und fast vollständig lösen und vom inerten Rückstand abgetrennt werden können. Einige Vorschläge gehen dahin, den im Chloridgehalt abgesenkten Rückstand mit Zement zu verfestigen und aus dem Filtrat die Schwermetalle und das CaCl₂ auszu-

kristallisieren oder, wenn es statthaft ist, das vorbehandelte Filtrat dem Vorfluter zuzuleiten [15], [16].

Die RKW-eigenen Untersuchungen sind darauf ausgerichtet, mit einer möglichst geringen Lösungsmenge die Salzkompone-
nten vom MVA-Staub abzutrennen, um ein konzentriertes Filtrat zu erhalten, und dadurch den Energieaufwand für die Auskristallisation des CaCl_2 zu minimieren; das verunreinigte CaCl_2 muß einer geeigneten Deponie zugeführt werden, da eine Verwertung nicht gesehen wird.

Die Zielvorgaben

- hohe Salzkonzentration im Filtrat und
- gut gewaschener Rückstand mit nur geringem noch löslichen Chloridanteil

sind eng über die Menge der dem Waschprozeß zugeführten Wassermenge miteinander verknüpft; die Optimierung wird derzeit im halbtechnischen Maßstab durchgeführt.

Für den gewaschenen Filtrerrückstand zeichnet sich im Hinblick auf die Absenkung des Chloridanteils als begrenzender Faktor die im Filterkuchen verbleibende Restfeuchte von 40 bis 50 % ab. Diese Restfeuchte kann nur mit erheblichem Aufwand an Waschwasser in Verbindung mit geeigneten Filtertypen auf vorgesehene, sehr geringe Chloridkonzentration gebracht werden. In einer technischen Ausführung muß darum davon ausgegangen werden, daß der gewaschene Rückstand immer noch bis zu 2 % an löslichen Chloridverbindungen enthält.

Bei der Verfestigung von gewaschenen Rückständen mit z. B. einem Restchloridgehalt von 2 % verringert sich der Zementbedarf um 60 % bis 80 % im Vergleich zu ungewaschenen MVA-Stäuben mit z. B. 20 % Chlorid für die Erreichung der für die Auflagerungsdeponie erforderlichen

niedrigen Durchlässigkeit und ausreichenden Druckfestigkeit. Für den zu verbringenden Rückstand hilft damit die hydrometallurgische Vorbehandlung ebenfalls, wertvollen Deponieraum zu schonen. Es darf aber nicht übersehen werden, daß die hydrometallurgische Behandlung einen hohen apparativen und energetischen Aufwand erfordert und daß für die CaCl_2 -Verbringung zusätzlicher Deponieraum benötigt wird.

6. Abschließende Anmerkung

Die bei der Müllverbrennung in den Rauchgasreinigungsstufen anfallenden Flugaschen und Stäube können wegen des hohen Anteils wasserlöslicher Salze und der Schwermetallgehalte keine Weiterverwendung, z. B. in der Baustoffindustrie, finden sondern müssen entsorgt werden. Für die Deponierung empfiehlt sich die Zuführung der Rückstände aus mehreren Anlagen auf eine größere zentrale Deponie, die den hohen Sicherheitsanforderungen genügt und besser kontrollierbar ist als viele Kleindeponien.

Für eine solche Deponie ist das dreistufige Konzept einer sicker- und abwasserfreien Auflagerungsdeponie entwickelt worden. In der ersten Stufe, deren Realisierung derzeit betrieben wird, werden die MVA-Stäube mit Aschen aus der kohlestämmigen Verbrennung verdünnt und nach einer in Einzelheiten beschriebenen Deponierungstechnik mit Zement verfestigt.

In der nächsten, der 2. Stufe, ist vorgesehen, als hydraulischen Binder einen aus MVA-Stäuben hergestellten Alinitzement zu verwenden. Das knappe Deponievolumen wird hierdurch besser genutzt und außerdem ist etwa die Hälfte des bis zu 9 % betragenden Chloridgehaltes vom Alinitzement nicht auslaugbar.

Schließlich ist als 3. Stufe in der späteren Disposition vorgesehen, einen Teil der Stäube hydrometallurgisch vorzubehandeln und den ausgewaschenen Rückstand, der für die Verfestigung nur geringe Zementmengen benötigt, der Auflagerungsdeponie zuzuführen.

Gegenwärtig sind die Bemühungen darauf gerichtet, für die 1. Stufe dieses Konzeptes die Genehmigung zu erhalten, denn auch für die nachfolgenden Stufen - Verwendung von Alinitzement und Einlagerung von Filtrerrückständen - ist die Deponiegenehmigung zwingende Voraussetzung.

7. Literatur

- [1] Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Sonderabfall) Teil I Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch-physikalische und biologische Behandlung und Verbrennung von Sonderabfällen, Drucksache 360/90 vom 30.06.89
- [2] A. Roeder, H. P. Hennecke, J. Stradtman, G. Radermacher: Die Deponierung verfestigter Rückstände aus Rauchgasreinigungsanlagen auf zwei Monodeponien; 1. Teil; Müll und Abfall 19, Heft 7, S. 277 - 287 (1987)
- [3] B. Timm: Konzept zur Reststoffentsorgung der thermischen Abfallbehandlung in Schweden; VDI-Berichte 753, S. 35 - 50 (1989)
- [4] Firma Kali & Salz, Werk Neunhof-Ellers; Unveröffentlichte Mitteilung (1988)

- [5] A. Roeder, R. Oberste-Padtberg: Mehrstufiges Konzept verfestigter MVA-Stäube auf einer Monodeponie; Müllverbrennung und Umwelt 3 (K. J. Thomé-Kozminsky, Herausgeber), EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik, S. 771 - 784 (1989)
- [6] K. Fichtel: Schlacke/Reststoff/Additivverfahren des Bayrischen Landesamtes für Umweltschutz, Müllverbrennung und Umwelt 3 (K. J. Thomé-Kozminski, Herausgeber), EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik, S. 745 - 769 (1989)
- [7] S. Sprung, W. Rechenberg: Einbindung von Schwermetallen in Sekundärstoffen durch Verfestigung mit Zement; Betontechnische Berichte 5/88, S. 193 - 198 (1988)
- [8] B. Johnke, C. Vater: Hausmüllverbrennung - ein umweltverträglicher Behandlungsschritt auf einem umweltentlastenden Entsorgungsweg; Müll und Abfall 2/89, S. 49 - 57 (1989)
- [9] G. Gebhard, W. Lukas, H. U. Bambauer: Stabilisierung von Rückständen aus der Braunkohleentschwefelung; VGB Kraftwerkstechnik V. 69, Heft 4, S. 384 - 392 (1989)
- [10] A. Roeder, R. Schäfer, W. Liebetrau, F.-W. Wenzel: Die Deponierung verfestigter Rückstände aus Rauchgasreinigungsanlagen auf zwei Monodeponien, Teil 2: Technische Details zu den Monodeponien; Müll und Abfall, 20. Jahrg., Heft 2, S. 46 - 58 (1988)
- [11] F. Massazza, C. Giliole: Contribution to the alinite know-ledge; Il Cemente, No. 2, S. 101 - 106 (1983)

- [12] F. v. Lampe, G. Oliew: Vergleich der hydraulischen Aktivitäten von Trikalziumsilikat, Alit und Alinit; Silikattechnik 39, No. 11, S. 379 - 382 (1988)
- [13] B. J. Noudelmann: Fabrication de ciment d'alinite á basse température; Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, No. 735, 2, S. 111 - 112 (1982)
- [14] R. Oberste-Padtberg, J. Neubauer: Laborversuche zur Herstellung von Alinitzementen aus Müllverbrennungsrückständen; Wasser, Luft und Boden 10/89, S. 62 - 65 (1989)
- [15] U. Dietler, J. Viedersheim: Aufbereitung und Verfestigung von Rückständen der Rauchgasreinigung aus Kehrichtverbrennungsanlagen; Bundesamt für Umweltschutz (CH), S. 1 - 162 (1988)
- [16] N. Knoche: Konzept der Entsorgung der MVA Basel; VDI-Bericht 753, S. 77 - 91 (1988)

Verfasser: Herren Dr. A. Roeder und
Dr. R. Oberste-Padtberg

Rheinische Kalksteinwerke GmbH
Abt. Forschung und Entwicklung
Wilhelmstr. 77
5603 Wülfrath

GEOWISSENSCHAFTLICHE UND VERFAHRENSTECHNISCHE ASPEKTE DER UNTERTAGE-DEPONIERUNG VON SONDERABFÄLLEN

Th. Brassler, Th. Meyer, U. Mühlenweg

Einleitung

Abfälle mit erhöhtem Gefährdungspotential sind - trotz umfassender Vermeidungs- und Verwertungsstrategien - unvermeidbare Begleiterscheinung einer hochentwickelten Industriegesellschaft. Aus geowissenschaftlichen und chemisch-physikalischen Gründen kann die untertägige Ablagerung von bestimmten Abfallarten (mit toxischen Schwermetallen und/oder leichtlöslichen Salzen) in Bergwerken und Kavernen im Salzgestein als grundsätzlich sichere Entsorgungsalternative angesehen werden [1-7]. Hohlräume in anderen Formationen, wie z. B. Ton oder Granit können unter bestimmten Voraussetzungen ebenfalls für eine Reststoffentsorgung in Frage kommen [8-10]. Zum Nachweis der vollen Funktionstüchtigkeit von Untertagedeponien, zu dem auch die Vermeidung möglicher Spätfolgen gehört, ist jedoch eine umfassende standort- und abfallbezogene Sicherheitsbewertung erforderlich. Aus diesem Grunde müssen u. a. das Langzeitverhalten der abzulagernden Abfälle und mögliche Wechselwirkungen unter Ablagerungsbedingungen analysiert und bewertet werden.

Abfallinhalte

Rückstände (exemplarisch) aus der Sonderabfall- bzw. Hausmüllverbrennung gliedern sich auf in Verbrennungsschlacke, Filterstaub aus der Abgasentstaubung sowie Rückstände aus der Schadgasabscheidung durch Naß-, Quasitrocken- und Trockenverfahren.

Die Anwesenheit von Schwermetallen (Tab. 1) in löslicher Form stellt den Hauptgrund ihrer Umweltschädlichkeit dar. Organische Substanzen wie Dioxin oder Furan dürften - zumindest bei modernen Anlagen - eine eher untergeordnete Rolle spielen [11, 12].

Abfallmengen

Die neueste vorliegende Erhebung zum Abfallaufkommen bei der öffentlichen Abfallbeseitigung, der Abfallbeseitigung im produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern stammt aus dem Jahr 1984 [13; vgl. auch 14]. Nicht wenige der Mengenangaben zu den einzelnen Abfall-Untergruppen der Erhebung von 1984 haben derzeit kaum noch einen aktuellen Wert und müssen aus diesem Grunde überarbeitet werden.

Das bundesweite Abfallaufkommen an Aschen und Stäuben sowie Rauchgasreinigungsrückständen aus der Hausmüll- und Sonderabfallverbrennung und Salzen - die für eine Untertage-Deponie vorgesehen sind bzw. diskutiert werden - ist derzeit mit mehr als 500.000 Megagramm/Jahr zu veranschlagen (Abb. 1).

Hohlraumart und -erstellung

Zielsetzung der untertägigen Ablagerung ist es, die Abfälle von der Biosphäre dauerhaft fernzuhalten (Prinzip des vollständigen Einschlusses im Salzgestein) bzw. die Abfälle so abzulagern, daß keine schädliche Verunreinigung oder nachteilige Veränderung des Grundwassers gegenüber der geogenen Beschaffenheit zu besorgen ist (Prinzip der immissionsneutralen Ablagerung, insbesondere in nichtsalinaren Formationen).

Für die Ablagerung von umweltgefährdenden Abfällen in untertägigen Hohlräumen bieten sich mehrere Möglichkeiten an:

- Ablagerung von Abfällen in bereits bestehende, begehbare Bergwerke in Strecken, Kammern, Lagerbohrlöchern und Kavernen.
- Ablagerung von Abfällen in neu geschaffene, begehbare Bergwerke in Strecken, Kammern, Lagerbohrlöchern und Kavernen.
- Einbringen von sich verfestigenden Abfällen in Kavernen durch eine Förderrohrleitung.

Voraussetzung für die Anlage von Deponiekavernen ist ein ausreichend standfestes und dichtes Gebirge. Als Kavernen sind hier alle technisch erstellten (bergmännisch oder solotechnisch) untertägigen Hohlräume - unabhängig von ihrer Form und Größe - zu verstehen, die keinen Zugang zu einem bestehenden Bergwerk haben.

Der Bau großer Speicherkavernen in Solution-mining-Verfahren im Salz ist heute Stand der Technik und auch für die Anlage von Deponiekavernen geeignet. Jedoch liegen noch keine Erfahrungen für solotechnisch er-

stellte Kavernen mit großen Volumina ohne Innenstützdruck vor. Für die oben erwähnten Abfallarten ist zu fordern, daß sie für eine Deponierung in Kavernen entweder trocken abgelagert werden müssen oder - falls Abfall-Fluid-Gemische gefördert werden sollen - eine "in-situ-Verfestigung" in der Kaverne durch Bindemittelzugabe erfolgen muß [15].

Fördertechnik

Die Förderung von Reststoffen hängt, wie Abbildung 2 zeigt, entscheidend von der Art der Hohlräume und von der Infrastruktur ab.

Für zu verfüllende Hohlräume mit Schachtzugang kann eine Schachtförderung in Behältnissen erfolgen. Wenn die Schachtkapazität zu gering oder der Hohlraum über eine Bohrung nach übertage angeschlossen ist, muß eine behälterlose Förderung in Rohrleitungen erfolgen [35].

Die hier betrachteten Abfallarten Flugstäube (HMV/SAV), salzhaltige Rückstände aus der Verbrennung und Salze liegen in staubförmiger, stückiger oder pastöser Form vor. Nach einer eventuellen obertägigen Vorbehandlung und Aufbereitung können sie als

- Schüttgut, durch die Rohrleitung mit sich anschließender Eigenverdichtung oder
- Abfall-Bindemittel-Suspension mit Verfestigung im Hohlraum zu einem monolithischen Block

gefördert werden (Abb. 3).

Bei der Schüttgutförderung muß unterschieden werden zwischen der pneumatischen Förderung und der Schwerkraftförderung in Falleitungen.

Die pneumatische Förderung kann bei feinkörnigen Abfallstoffen wie z. B. Filterstäuben angewendet werden. Dabei wird der Stoff erst vertikal nach untertage und danach sählig über lange Strecken zum Endlagerhohlraum gefördert. Diese Technik kann eingesetzt werden, wenn Strecken und Kammern eines begehbaren Bergwerkes befüllt werden sollen. Am Austritt der Förderleitung kann es zu starker Staubeentwicklung kommen, die entweder durch geeignete Entstaubungsanlagen und/oder durch Flüssigkeitszugabe am Austritt vermindert werden kann. Will man die Staubeentwicklung vollständig verhindern, muß das Schüttgut am Austritt hydromechanisch weiterverarbeitet werden, d. h. man gibt dem Schüttgut so viel Flüssigkeit

zu, welche wiederum aus flüssigen Abfallstoffen bestehen kann, daß es pastös in den Endlagerhohlraum gefördert werden kann. Durch Bindemittelzugabe muß sich die Schüttgut-FlüssigkeitsSuspension im Hohlraum verfestigen. Im Bergbau liegen umfangreiche Erfahrungen zum pneumatischen Transport von Baustoffen und Versatzbergen vor, die adaptiert werden können [16, 17].

Die Schwerkraftförderung von Schüttgütern in Falleitungen kann vorzugsweise in Kavernen, die durch eine Bohrung nach über Tage angeschlossen sind, erfolgen. Aufgrund der nach unten zunehmend höheren Feststoffgeschwindigkeit ruft das Fördergut einen relativ starken, ebenfalls nach unten wachsenden Verschleiß hervor. Durch die von der Erdrotation herrührende Coriolis-Kraft beschreibt das Gut eine spiralförmige Bahn innerhalb des Fallrohres, so daß auch ein spiralförmiger Verschleiß der Rohrleitung auftritt. Zur Verschleißreduzierung und -vergleichmäßigung können entweder drehbare Einlaufkonstruktionen oder Falleitungen mit Einbauten (Leitspiralen, Rippenrohrquerschnitt) eingesetzt werden [18, 19].

Hydraulische Förderung von Abfall-Bindemittel-Suspensionen

Hier kann je nach Antriebsart in

- pumpengestützte Förderung oder
- Schwerkraftförderung

unterschieden werden.

Bei der pumpengestützten Förderung wird eine pastöse Masse aus Abfallgut, Bindemittel und Flüssigkeit gemischt, die nur unter Pumpenunterstützung in der vertikalen Rohrleitung förderbar ist. Sie eignet sich auch zum weiteren söhligen Fördern in Endlagerhöhlräume eines begehbaren Bergwerkes. Sowohl die Preussag AG Metall mit ihrer Pumpversatztechnik [20] als auch die Ruhrkohle AG mit ihrem Nachversetzen des Bruchhohlraumes [21] wenden diese Förderung an.

Die Schwerkraftförderung von Suspensionen ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Durch Wahl des Rohrdurchmessers und Rheologie der Suspension muß eine Strömungsgeschwindigkeit eingestellt werden, die weit unter der Fallgeschwindigkeit der Suspension liegt. Dadurch werden Entmischungen, die zu Verstopfern führen können, verhindert und der Verschleiß an der Rohrleitung gemindert. Dieses Verfahren eignet sich be-

sonders für staubförmige und feinkörnige Reststoffe, die in Kavernen gefördert werden sollen.

Die Schwerkraftförderung von Suspension wurde in einem Projekt zur Lagerung und Verfestigung von radioaktiven Abfällen in untertägigen Hohlräumen [22] im großtechnischen Maßstab auf der Schachanlage ASSE der GSF erprobt und die Anwendbarkeit auch für toxische Abfälle durch Förderung von 1000 t Produkt aus Abfallsimulat, Zement und Flüssigkeit gezeigt [23].

Verschlusstechnik

Im Anschluß an die Betriebsphase einer Untertagedeponie ist diese dauerhaft zu verschließen und eine Isolierung des Abfallgutes von der Biosphäre sicherzustellen. Die wesentliche Anforderung an die Abschlußmaßnahme ist eine langzeitstabile und dichte Verfüllung aller Zugänge.

Verschlusstechnik für begehbare Bergwerke

Die offenen Zugänge zu einem begehbaren untertägigen Deponieraum wie Schächte, Zugangsstrecken, Bohrlöcher sind nach der Betriebsphase zu verfüllen bzw. zu verschließen. Hierzu sind technische Verschlusssysteme wie Dämme, Schacht- und Bohrlochverschlüsse einzubeziehen. Eine Prinzipskizze der verschiedenen möglichen Verschlusssysteme, welche für Untertage-Deponien zu betrachten sind, gibt Abbildung 5 wieder. Ziel ist es, einen wartungsfreien Verschuß über sämtliche Zugangsstrecken zu erhalten. Hierbei muß das jeweilige Nebengestein mit berücksichtigt werden.

Verschlusstechnik einer im Solverfahren erstellten Kaverne

Der Abschluß einer im Solverfahren erstellten Kaverne beschränkt sich auf die nicht begehbare Zugangsbohrung sowie den gebirgsmechanisch besonders zu berücksichtigenden Bereich des Kavernendaches bzw. Kavernenhalses. Über die gesamte Länge der Zugangsbohrung kommt den folgenden Versiegelungsbereichen besondere Bedeutung zu:

- Kavernendach und Kavernenhals
- Übergang Deckgebirge / Wirtsgestein
- Aquiferbereiche im Deckgebirge

Die Zugangsbohrung kann im oberen Bereich mit den gängigen Methoden der Tiefbohrtechnik verschlossen werden. Die Verschlusstechnologie am Kaver-

nendach ist allerdings noch nicht erprobt. Zum Erreichen eines gebirgsverbundenen, druckfesten, laugen- und gasdichten sowie langzeitstabilen Verschlusses in diesem Bereich der Zugangsbohrung sind ggf. Abschnitte der Rohrtour zu entfernen, so daß eine Korrosion und damit spätere potentielle Durchlässigkeit verhindert wird.

Durch den Einbau eines Verschlußsystems bestehend aus unterschiedlichen Materialkomponenten wie Salz, Salzbeton, Bitumen und ggf. Ton wird ein Gesamtverschlußsystem erreicht, welches folgenden angestrebten sicherheitstechnischen Anforderungen nahekommt:

- Langzeitstabilität und Wartungsfreiheit
- schneller Form- und Kraftschluß mit dem Wirtsgestein
- an das umgebende Gebirge angepaßte festigkeitsmechanische Eigenschaften
- an das umgebende Gebirge angepaßte mineralogische sowie chemisch-physikalische Eigenschaften
- an das umgebende Gebirge angepaßte hydraulische Durchlässigkeit
- geringer Volumenschwund nach Einbau.

Der Zement weist dabei einen sofortigen druckfesten Kraftschluß sowie eine niedrige Permeabilität bei gleichzeitiger guter Kenntnis über die Einbringtechnik auf. Das Salz besitzt nach Verdichtung durch das konvergierende Gebirge eine niedrige Permeabilität, bewirkt einen guten Form- und Kraftschluß und gewährleistet eine sichere Verheilung von Verschlußstopfen und Gebirge. Bitumen ist aufgrund seiner Elastizität in der Lage, Verformungen des Bohrloches durch Spannungsänderungen im umgebenden Salzgebirge bruchlos aufzunehmen und an Scherflächen plastisch zu folgen [24].

Geomechanisches Verhalten des Einlagerungsproduktes

Die geomechanischen Fragestellungen des geförderten Abfallproduktes in untertägigen Hohlräumen sollen exemplarisch an einer Deponiekaverne dargestellt werden.

Bei der Förderung als Schüttgut erfolgt die Verfestigung mechanisch durch eine zunehmende Kompaktierung infolge Konvergenz. Nach entsprechender Zeit- und sich aufbauendem Kraftschluß führt dies zu einem verfestigten Abfallkörper in der Kaverne. Durch die Konvergenz wird der Abfallkörper allseitig umschlossen und damit eine wichtige Voraussetzung für den sicheren Einschluß im Salzgebirge geschaffen.

Bei der Förderung einer Suspension muß durch Zugabe von hydraulischen Bindemitteln eine schnelle In-situ-Verfestigung in der Kaverne stattfinden.

Für beide Einbringverfahren gilt, daß an die Festigkeit und Verformbarkeit des eingebrachten Reststoffes besondere Anforderungen gestellt werden müssen, da dem Abfall aus geomechanischer Sicht eine vergleichbare Aufgabe wie dem Versatz im herkömmlichen Bergbau zukommt. Eine Stabilisierung der Hohlräume und die Bildung eines Stützdruckes auf das umgebende Gebirge durch sich verfestigenden Abfallstoff sind von wesentlicher Bedeutung. Aus der Forderung, die verfüllte Kaverne wie ein Bauwerk zu beschreiben, ergibt sich bei feststoffgefüllten Kavernen die Konsequenz, den Befüll- und Verfestigungsvorgang wie z. B. die Ausbildung des entstehenden Abfallkörpers, seine mechanischen Eigenschaften sowie die langfristigen geomechanischen Wechselwirkungen von Abfallprodukt und Wirtsgestein zu beschreiben. Untersuchungen zu diesen Fragestellungen sind bereits seitens der GSF im Rahmen des "in situ-Verfestigungsprojektes" für radioaktive Abfälle bearbeitet worden [24].

Die stark variierenden Körnungslinien von Rückständen aus der Müllverbrennung machen deutlich, daß für die Förderung und Ablagerung der Reststoffe gesonderte Verfahren entwickelt werden müssen. Insbesondere im Hinblick auf förder- und einlagerungstechnische Fragestellungen ist die genaue Kenntnis der Kornverteilung notwendig.

Eine weitere wesentliche bodenmechanische Eigenschaft im Hinblick auf die Lagerungs- und möglichen Trageigenschaften von Schüttgütern in untertägigen Hohlräumen stellt die Grenze der Lagerungsdichten (DIN 18126) dar.

Abbildung 6 zeigt die Bandbreite der Grenzen der Lagerungsdichten der bislang untersuchten Reststoffe. Die teilweise überaus geringen Dichten der Filter-/Flugstäube aus der Hausmüllverbrennung verdeutlichen, daß eine Einlagerung in dieser Form, d. h. ohne Zusatz von Bindemitteln nicht möglich ist. Zum Erreichen einer höheren Dichte und damit einer höheren Tragwirkung und eines geringeren Restporenraumes sind Zusatzstoffe unvermeidlich.

Langzeitverhalten

Obwohl die untertägige Ablagerung von ausgewählten Sonderabfällen in Salzformationen als prinzipiell sichere technische Entsorgungslösung angesehen wird, haben die zahlreichen Schwierigkeiten bei der übertägigen Ablagerung von Problemabfällen gezeigt, daß in der Vergangenheit - trotz z. T. umfassender Schutzkonzepte - der Wechselwirkung von Abfällen untereinander, mit dem umgebenden Medium sowie der Bewertung des Langzeitverhaltens der Deponiesysteme nicht genügend Bedeutung beigemessen worden ist.

Der Nachweis der Eignung des Gebirges für die Anlage einer Untertage-Deponie muß deshalb durch einen standortbezogenen Sicherheitsnachweis geführt werden, der das Gesamtsystem "Abfall - Untertagebauwerk - Wirtsgestein - Deckgebirge" berücksichtigt [25 - 32].

Die Langezeitsicherheitsanalyse bezieht sich dabei auf die Nachbetriebsphase und dient einer umfassenden Sicherheitsbewertung des gesamten Ablagerungskonzeptes. Mögliche Restrisiken nach einer Ablagerung von Problemabfällen in Salzkavernen sind deshalb u. a. unter dem Aspekt des Langzeitverhaltens der eingebrachten Abfälle und ihrer Wechselwirkungen bzw. möglicher Reaktionen unter Ablagerungsbedingungen zu bewerten.

Wird ein Transport der Abfallinhaltsstoffe aus der Untertagedeponie in die Umgebung (Deckgebirge, Biosphäre) im Rahmen einer solchen Sicherheitsbetrachtung unterstellt, so erfolgt der Transport der Schadstoffe bevorzugt in gelöster Form durch die in der Umgebung, möglicherweise auch in der Untertagedeponie selbst befindlichen Wässer oder Laugen. Im Zusammenhang mit der Bewertung eines solchen Szenariums sind die Lösungspotentiale der abgelagerten Schadstoffe, das Elutionsverhalten der Abfälle durch Wasser oder Lauge und das Wanderungsverhalten besonders toxischer Bestandteile von Bedeutung [33, 34].

Die zur Untertagedeponie ausgewiesenen Abfälle mit hohen Gehalten an leicht löslichen Salzen und/oder toxischen Substanzen wie Schwermetalle, Cyanide und Nitrite müssen deshalb durch geeignete Laborexperimente im Hinblick auf die oben genannten Fragestellungen hin untersucht werden. Neben den Auslaugtests nach dem Deutschen Einheitsverfahren (DEV S4), die aufgrund ihrer standardisierten Vorgehensweise allerdings nur einer

Orientierung dienen können, werden in der Bundesrepublik Deutschland mittlerweile weitere Testverfahren wie z. B. Schütteltechnik bzw. Rotation von Lösungs-Abfallgemischen sowie Umlauf- und Durchlaufssäulenversuche (Abb. 7) angewendet. Derartige Versuche erstrecken sich über einen Zeitraum von wenigen Stunden bis zu mehreren Monaten. Mit der Bestimmung der Schadstoffgehalte in der festen und flüssigen Phase vor und nach dem Versuch und mit der Ermittlung weiterer Daten, wie z. B. pH-Wert, Dichte, Temperatur, ist eine Beschreibung der Löse- bzw. Fällungsverläufe der Komponenten möglich. Grundsätzlich sind dabei die chemisch-physikalischen Bedingungen u. a. die der Löslichkeit, der Komplexbildung, der Kolloidbildung, der Fällung, der Adsorption, des Ionenaustausches und der Filtration mit zu betrachten.

Diese Veröffentlichung ist im Rahmen eines von der Stiftung Volkswagenwerk geförderten Projektes entstanden.

Quellenverzeichnis

- [1] Buch, D. v. (1989): Entsorgungs-Bergbau, Zukunftsperspektiven für den deutschen Bergbau. - Erzmetall, 42(2), 96-99.
- [2] Herrmann, A. G., Brumsack, H. J., Heinrichs, H. (1985): Notwendigkeit, Möglichkeiten und Grenzen der Untergrund-Deponie anthropogener Schadstoffe. - Naturwissenschaften, 72, 408-418.
- [3] Knorra, U. (1989): Sonderabfälle in Kavernen einlagern. - Umwelt, 19 (4), 166-167.
- [4] Niehörster, K. (1988): Zukunft unter Tage. - UmweltMagazin, Nov.88, 56-57.
- [5] Plate, M. (1988): Entsorgung unter Tage - Chance zur Lösung von Umweltproblemen. - Glückauf, 4/5, 224-229.
- [6] Schneider, H. J. (1985): Enddeponierung von Sonderabfällen in Salzkavernen - eine wesentliche Ergänzung zur Obertagedeponie. - Ber. 5. Nat.Tag.Ing.-Geol., 75-80; Kiel.
- [7] Wiedemann, H. U. (1988): Untertägige Ablagerung. - In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Behandlung von Sonderabfällen 2, 1053-1063; EF-Verlag, Berlin.
- [8] Bergbau AG (1988): Bergwerk Zollverein wird Untertagedeponie. - Bergbau, 8/88, 342-343.
- [9] Krejsa, P. (1987): Konzept für die Untertagedeponie bestimmter Sonderabfälle. - in: Die Deponie - Ein Bauwerk?, IWS-Schriftenreihe, 1/1987, 73-81.
- [10] Stork, W. (1987): Untertagedeponien in Nordrhein-Westfalen. - Wasser + Boden, 4, 175-177.
- [11] Greim, H., Link, B. (1989): Wie giftig ist die Müllverbrennung? - EntsorgungsPraxis, 4/89, 162-170.
- [12] FGU Berlin (Hrsg.) (1985): Dioxine, Entstehung-Wirkungen-Beseitigung. - Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 14, 247 S.; E. Schmidt Verlag, Berlin.

- [13] Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (1987): Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1984. - Umweltschutz Fachserie 19, Reihe 1.2, 177 S.; W. Kohlhammer Verlag, Stuttgart, Mainz.
- [14] Umweltbundesamt (Hrsg.) (1989): Daten zur Umwelt 1988/89, Kap. Abfall, 418-469; E. Schmidt Verlag, Berlin.
- [15] Lux, K. H., Rokahr, R. B. (1985): Gebirgsmechanische Anforderungen an die untertägige Deponierung von Sonderabfällen im Salzgebirge. - STUVA-Tagung November 1985.
- [16] Ruhrkohle AG (1986): Empfehlungen für die Errichtung und Betrieb von pneumatischen Baustoff-Versorgungsanlagen. - Firmenschrift, 68 S.; Essen.
- [17] Zillessen, Chr. (1987): Baustoffe und maschinelle Einrichtungen für deren Einbringen unter Tage. - Glückauf, 114 (7), 297-301.
- [18] Voss, K. H. (1986): Betriebsbeispiele zum Optimieren der Blasversatztechnik. - Glückauf, 122 (16), 1049-1056.
- [19] Voss, K. H., Gutsche, H. D. (1985): Untersuchungen und neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Blindschachtwendlutschen und Bergefalleitungen. - Glückauf, 121 (1), 37 - 42.
- [20] Lerche, R., Renetzeder, H. (1984): Die Entwicklung des Pumpversatzverfahrens für das Erzbergwerk Grund. - Erzmetall 37 (10), 494-501.
- [21] Maurer, H., Sill, F. (1986): Möglichkeiten zur Unterbringung von Rückständen der Steinkohlenverwendung im Bergbau. - Kolloquium: Versatz im Bergbau, TU Clausthal, Okt. 1986.
- [22] Kroebel, R., Kraemer, R. (1989): In-situ-Solidification Technique for Waste Disposal in Underground Caverns. In: Proc. Waste Management 89, Tucson, Arizona/USA, 26.02. - 02.03.1989, Vol. 2 (Eds.: R. E. Post, M. E. Wacks). Arizona Board of Regents/USA.
- [23] Ganser, B., Lägél, N., Schulter, E., Dedegil, Y. (1989): Industrial Scale Demonstration of In-situ-Solidification Technique for Waste Disposal in Underground Caverns. In: Proc. Waste Management 89, Tucson, Arizona/USA, 26.02. - 02.03.1989, Vol. 2 (Eds.: R. E. Post, M. E. Wacks). Arizona Board of Regents/USA.
- [24] Quast, P., Hawickenbrauck, E., Schmidt, M. W. (1986): Engineering, Geological and Safety Technological Aspects for the Final Disposal of In Situ-Consolidated Radioactive Waste in Hard Rock and Salt Formations. - Bulletin of the Int. Association of Engineering Geology, N°34, 73-85; Paris.
- [25] Appel, D., Kreuzsch, J. (1986): Qualitative Bewertung von Deponierungsstrategien unter Berücksichtigung des Langzeitaspekts. - Müll und Abfall, 9/86, 348-357.
- [26] Illi, H., Storck, R., Wurtinger, W. (1987): Sicherheitsanalysen für die Betriebs- und Nachbetriebsphase. - Jahrestagung Kerntechnik 1987, 2.-4.6.1987, 62-84; Karlsruhe.
- [27] Storck, R. (1987): Langzeitsicherheitsanalysen zur Endlagerung. Energiesysteme und Strahlentechnik. - Kerntechnik, 50, 50-52.
- [28] Brasser, Th., Bode, W., Faber, P., Klarr, K., Kull, H., Mühlenweg, U., Stempel, Chr. v. (1989): Geologische Fragestellungen bei der untertägigen Ablagerung von Reststoffen. Nachrichten Deutsche Geologische Gesellschaft, 41, 16 - 17.

- [29] Brasser, Th., Jakob, G., Meyer, Th., Mühlenweg, U., Starke, Chr. (1989): Ablagerung ausgewählter Abfallarten in einer Untertage-Deponie. Entsorgungs Praxis 11, 573 - 581.
- [30] Brasser, Th., Meyer, Th., Starke, Chr. (1989): Entsorgung von Sonderabfällen - Die Untertage-Deponie. Entsorgungs-Technik 3 Oktober/November 1989, 32 - 37.
- [31] Brasser, Th., Meyer, Th., Starke, Chr. (1989): Die Untertage-Deponie - ein Konzept zur Ablagerung chemisch-toxischer Abfälle. In: Envirotech Vienna 1989, Chemicals • Technologies • Hazardous Waste, 2.3 Sonderabfall und Altlasten (Hrsg.: Umweltbundesamt (Wien) und Internationale Gesellschaft für Umweltschutz (IGU), Westarp Wissenschaften, 242 - 255, Essen.
- [32] Brewitz, W., Brasser, Th. (1989): Endlagerung von Reststoffen in tiefen geologischen Formationen. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung, Heft 4: Abfallreduzierung und Restmüllentsorgung (Hrsg.: Collins, H.-J., Spillmann, P.), 415 - 418, Braunschweig.
- [33] Jakob, G. (1989): Gefährdungspotentiale der relevanten Abfallarten und Bedeutung der UTD als Entsorgungseinrichtung. In: Envirotech Vienna 1989; Chemicals • Technologies • Hazardous Waste, 2.3 Sonderabfall und Altlasten (Hrsg.: Umweltbundesamt (Wien) und Internationale Gesellschaft für Umweltschutz (IGU)), Westarp Wissenschaften, 119 - 216, Essen.
- [34] Mühlenweg, U. (1989): Untersuchung der Wechselwirkungen Abfall-Wirtsgestein bei der untertägigen Ablagerung von Sonderabfällen in Salzgesteinen. In: Envirotech Vienna 1989, Chemicals • Technologies • Hazardous Waste, 2.3 Sonderabfall und Altlasten (Hrsg.: Umweltbundesamt (Wien) und Internationale Gesellschaft für Umweltschutz (IGU)), Westarp Wissenschaften, 290 - 298, Essen.
- [35] Meyer, Th., Starke, Chr., Schmidt, M. W. (1989): Containerless disposal and in situ consolidation on waste in underground cavities - Aspects of mining technology and engineering. In: Proc. Waste Management 89, Tucson, Arizona/USA, 26.02. - 02.03.1989, Vol. 2 (Eds.: R. E. Post, M. E. Wacks). Arizona Board of Regents/USA, 327 - 333.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Thomas Brasser, Dipl.-Ing. Th. Meyer, Dr. Uwe Mühlenweg
GSF - Institut für Tief Lagerung
Theodor-Heuss-Str. 4
D-3300 Braunschweig

Chemische Parameter	Schlacke (SAV)	Filterstaub (SAV)	RGR-Rückstand (SAV)	E-Filterstaub (HMV)	Salzhaltiger Filterstaub (HMV)
Al ₂ O ₃	20,27 %	3,09 %	1,20 %	11,85 %	4,85 %
CaO	7,41 %	6,07 %	3,32 %	16,51 %	23,33 %
Na ₂ O	1,16 %	7,49 %	39,48 %	3,89 %	17,63 %
K ₂ O	0,34 %	4,40 %	1,44 %	5,34 %	4,42 %
FeO	18,81 %	5,56 %	1,36 %	4,36 %	1,20 %
MnO	0,29 %	0,13 %	0,02 %	0,15 %	0,04 %
MgO	1,46 %	1,45 %	0,41 %	2,40 %	0,82 %
Cl ⁻	0,3 %	7,6 %	34,2 %	6,15 %	26,45 %
SO ₄ ²⁻	0,4 %	16,9 %	13,9 %	10,90 %	15,40 %
Zn	1454 mg/kg	88279 mg/kg	9336 mg/kg	23107 mg/kg	18417 mg/kg
Pb	344 mg/kg	15280 mg/kg	3411 mg/kg	6133 mg/kg	6979 mg/kg
Ni	188 mg/kg	459 mg/kg	134 mg/kg	101 mg/kg	59 mg/kg
Cu	2667 mg/kg	3722 mg/kg	2989 mg/kg	1191 mg/kg	868 mg/kg
Cd	25 mg/kg	163 mg/kg	297 mg/kg	208 mg/kg	205 mg/kg
Cr	24686 mg/kg	5258 mg/kg	532 mg/kg	767 mg/kg	314 mg/kg

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von Schlacke, Filterstaub und RGR-Rückstand aus Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAV) und Hausmüllverbrennungsanlagen (HMV) (Exemplarische Beispiele)

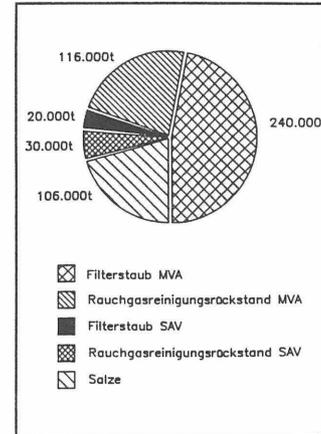


Abb. 1: In der Bundesrepublik Deutschland anfallende Reststoffmengen

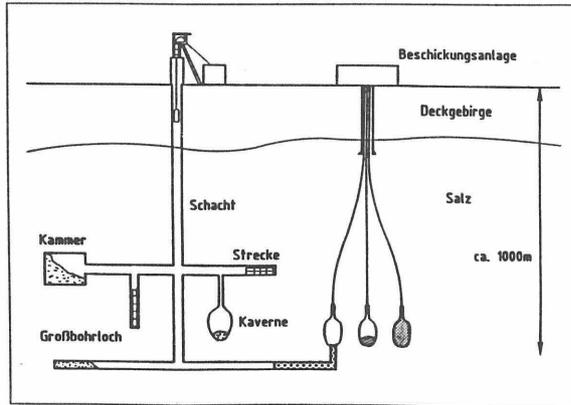


Abb. 2: Mögliche Ablagerungsräume und Infrastruktur

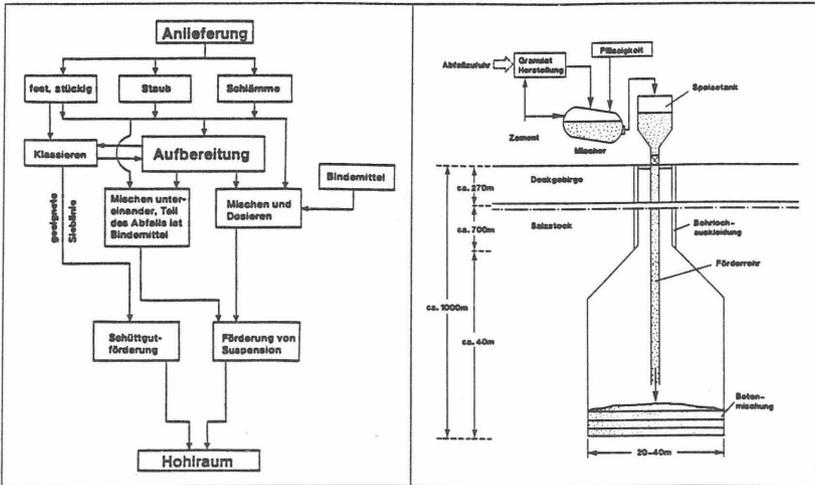


Abb. 3 : Zusammenhang zwischen Anlieferungszustand und Ablage-
 rung des Abfalls

Abb. 4: Prinzip der Schwerkraftförderung von Reststoffbindemittel-
 Suspensionen

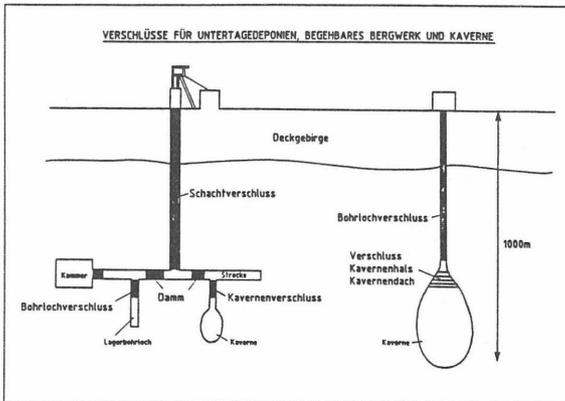


Abb. 5: Verschlusssysteme für Untertagedeponien

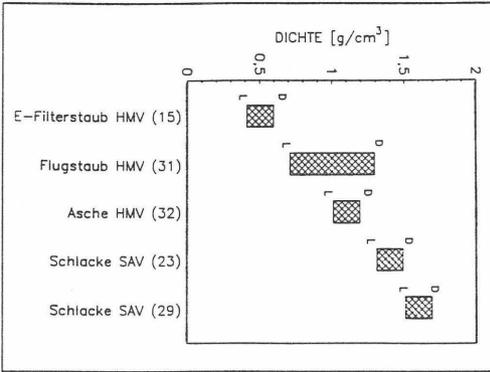


Abb. 6: Lagerungsdichten ausgewählter Verbrennungsrückstände (L = Lockerste-, D = Dichteste Lagerung nach DIN 18126)

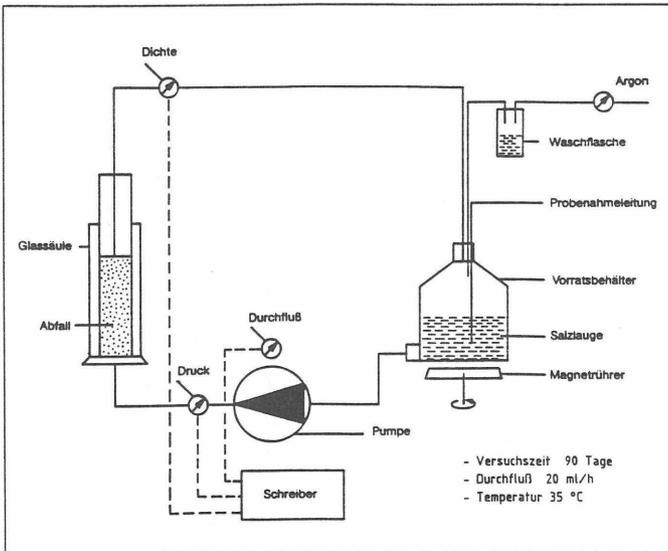


Abb. 7: Schema Umlaufsäulenversuch

MODELLMÄßIGE UNTERSUCHUNGEN
ZUR FIXIERUNG BZW. MOBILISIERUNG VON SCHADSTOFFEN
BEI DER VERFESTIGUNG VON ABFÄLLEN

M. BAHADIR

1. EINFÜHRUNG

Bei der Ablagerung von partikulären Abfällen, die bei umwelttechnischen aber auch industriellen Prozessen z.B. als (Klär-)Schlämme, (Flug-)Aschen und verbrauchte Adsorbentien entstehen, besteht die Gefahr einer Auslaugung ökotoxischer Inhaltsstoffe auf Grund der ungünstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnisse. Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die Ablagerung von Sonderabfällen so zu optimieren, daß Umweltschäden ausgeschlossen werden können. Nicht zuletzt aus Gründen der Deponiefestigkeit und der Vermeidung von (Wind-)Erosion hat es sich als zweckmäßig erwiesen, diese vor Ablagerung durch Zuschlagstoffe wie Zement und Kalk zu konditionieren. Bei einer geeigneten Durchführung der Konditionierung gelangt man zu Verfestigungsprodukten, deren Eigenschaften in Labor-modellen untersucht wurden. Über einige Ergebnisse wird im folgenden berichtet.

2. METHODEN DER ABFALLVERFESTIGUNG

In der Vergangenheit wurden verschiedene Verfahren zur Verfestigung kontaminierter Abfälle entwickelt. Ein Überblick über die gegenwärtig verfügbaren Methoden ist in Abb. 1 wiedergegeben.

Die Natur der Fixierungsvorgänge (physikalisch, chemisch und biochemisch) einerseits, und das langfristige makroskopische Verhalten der verfestigten Monolithe (z.B. Härte, Rißbildung

Poröse Systeme

Kalk
Zement
Gips
Puzzolan

Monolithische Systeme

Wasserglas
Thermoplaste
andere Polymere

Abb. 1: Verfestigungsverfahren für partikuläre Abfälle

Erosion, Permeabilität für Wasser) andererseits sind die bestimmenden Größen für das Langzeitverhalten der zunächst fixierten Schadstoffe. Allerdings sind die Kenntnisse über diese Faktoren noch vielfach unvollständig. Auch die chemische Zusammensetzung der Abfälle ist aufgrund fehlender Untersuchungsverfahren oft unbekannt. Unter bestimmten Bedingungen wird eine Re-mobilisierung von Abfallinhaltsstoffen beobachtet, die auf chemische Wechselwirkungen in der Matrix zurückzuführen sind.

3. DISKUSSION VON UNTERSUCHUNGSERGEBNISSEN

Im Rahmen eines Praxisversuches wurde ein mit 10 ppm Kepone kontaminiertes Flußsediment im Auftrage des US-EPA nach verschiedenen Verfahren verfestigt. Dabei führten alle diejenigen Verfestigungsverfahren, die mit einer pH-Werterhöhung einhergehen, wie z.B. silicatische Produkte und Kalk, zu einer deutlichen Mobilisierung des Schadstoffes /1/. Dies resultiert aus der pH-abhängigen Wasserlöslichkeit von Kepone. Als ein Keton hydratisiert Kepone in Wasser. Der pH-Anstieg führt zur Dissoziation der Hydroxylgruppen, wodurch eine höhere Wasserlöslichkeit dieser Substanz erhalten wird, welche bei Wasserdiffusion durch die Matrix ausgewaschen wird (Abb. 2).

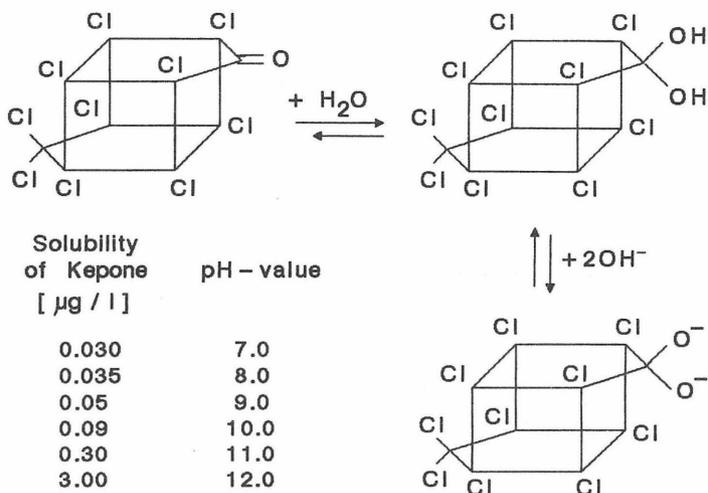


Abb. 2: pH-abhängige Löslichkeit von Kepone

Die pH-Erhöhung kann auch einen indirekten Einfluß auf Mobilisierungsvorgänge ausüben. Bei Stabilisierung von Klärschlamm mit Kalk, Zement und Flugasche aus Müllverbrennungsanlagen mit puzzolanischen Eigenschaften wird die Biomasse partiell zu α -Aminosäuren hydrolysiert, die als chelatbildende Komplexliganden bekannt sind.

Wir untersuchten den Einfluß dieser Prozesse auf die Elution von toxischen Elementen aus Steinkohleflugasche in 24 h nach einem Standardtest (DEV S4) /2/. 100 g Flugasche wurden in einer 1 L-Weithalsflasche aus Polyethylen mit verschiedenen Eluenten aufgefüllt und über Kopf gerührt. Die Eluatanalyse erfolgte nach Filtration durch Atomemissionsspektrometrie (ICP-AES). Die Ergebnisse sind in Tab. 1 wiedergegeben. Mit Ausnahme von Chrom sind die gelösten Metallkonzentrationen

niedrig im Fall von Wasser und Natronlauge, dagegen hoch beim Ammoniak sowie am höchsten beim Glycin, der einfachsten Verbindung aus der homologen Reihe der α -Aminosäuren.

Tab. 1: Elution von toxischen Schwermetallen aus Steinkohle-Flugasche (24 h Test nach DEV S4)

Element ($\mu\text{g/L}$)	aqua dest.	Ammoniak (0.02 N)	NaOH (0.005 N)	Glycin (0.1 M)
Cu	>5	28	>5	1 470
Zn	8	36	>5	1 171
Ni	>5	10	>5	331
Pb	0.5	0.5	0.7	15
Cd	0.2	2.2	>0.1	18
Cr	356	415	428	409
pH	11.5	11.6	11.6	9.5

Flugasche besteht aus sphärischen Partikeln glasartiger Struktur. Röntgendiffraktometrische Untersuchungen weisen neben einem erheblichen Anteil an amorphem Glas die Metalle überwiegend als Oxide aus, angereichert in oberflächennahen Schichten /3/. Es ist somit nicht überraschend, daß Elutionsversuche mit einer ungepufferten und daher basischen Glycinlösung durch Komplexbildung zu einer erheblichen Mobilisierung der Schwermetalle aus der Flugasche führt. Anders verhält es sich bei einer basischen Elution ohne Komplexbildner, weil die Teilchenoberflächen durch Bildung schwerlöslicher Metallhydroxide passiviert werden.

Wenn Flugasche und Klärschlamm nach Stabilisierung in derselben Deponie abgelagert werden, wie in Deutschland gebräuchlich, so können dieselben Phänomene erwartet werden. In der Abb. 3 wurden die Elutionsergebnisse für Kupfer aus einer Untersuchungsreihe aufgetragen, wobei in der Grundrezeptur von 60% Klärschlamm und 40% Zuschlägen die Zusammensetzung der Zuschlagstoffe in vier Stufen verändert wurde. Beginnend mit reiner Flugasche endete diese Reihe mit reinem Bindemittel (Zement, zwei unterschiedliche hydraulische Binder, Kalk und Gips). Beginnend bei ca. 600 ppb findet bei allen verfestigten Produkten mit Ausnahme von Gips eine Mobilisierung des Kupfers statt, besonders stark bei Zement (ausgezogene Linien 1-5). Gips erhöht den pH-Wert nicht und setzt damit keine Komplexliganden aus dem Klärschlamm frei. Bei Zugabe von starken Adsorbentien zum Abfangen der Liganden (3% Aktivkohle) konnte die Elution von Kupfer signifikant reduziert werden (gestrichelte Linien 1a-4a) /4/.

In Abwesenheit von hydrolysierbarer Biomasse werden grundsätzlich andere Ergebnisse erhalten. In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Verfestigung eines Schlacke-Kesselasche-Gemisches mit Zement (gestrichelte Linien) und dem puzzolanischen Binder Typ N (ausgezogene Linien) dargestellt. 25% Binder reduzierte die Metallelution aus den verfestigten Produkten signifikant. Das puzzolanische Material zeigte partiell bessere Resultate für Zink (und Blei). Eine Erhöhung des Zuschlagstoffes auf 50% brachte keine Verbesserung der Ergebnisse. Dem puzzolanischen Binder, wie er hier eingesetzt wurde, ist gegenüber dem Zement als Zuschlagstoff grundsätzlich der Vorrang einzuräumen, da der erstere ein Abfallprodukt aus der fossilen Energiegewinnung ist. Hierdurch können verschiedene Abfallströme in zweckmäßiger Weise zusammengeführt werden. Dagegen würde im Fall des Zements ein Wertstoff dem Abfall hinzugefügt, mit der weiteren Konsequenz einer Volumenvermehrung um diesen Anteil.

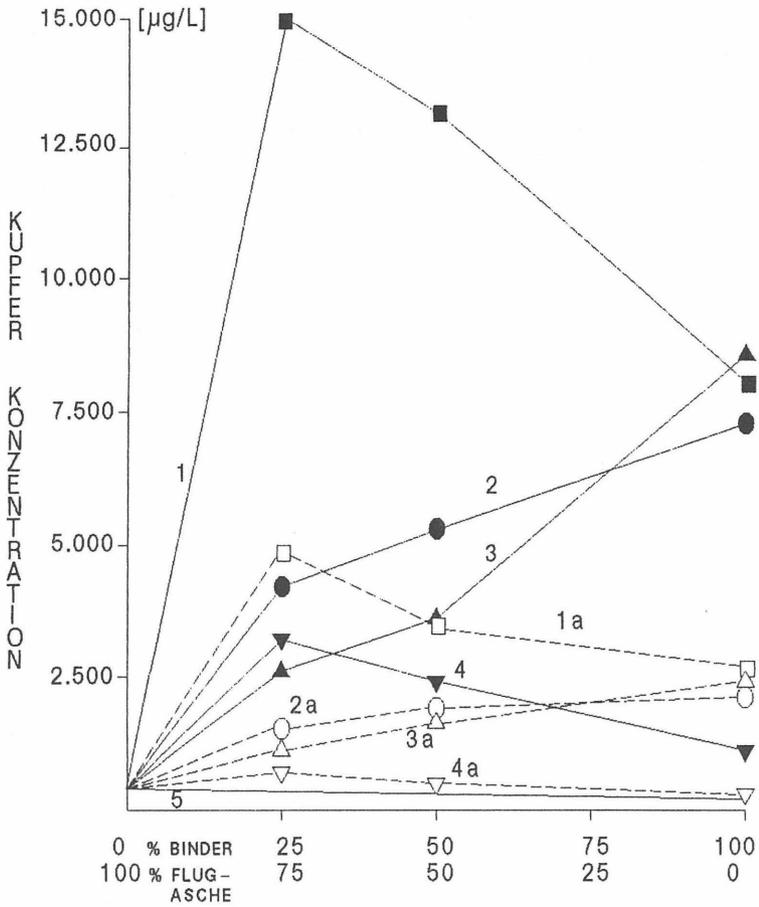


Abb. 3: Elution von Kupfer aus verfestigtem Klärschlamm (60% Schlamm + 40% Zuschlagstoffe)
(1) Zement, (2) Puzzolanischer Binder Typ N, und
(3) Typ T, (4) Kalk, (5) Gips
(1a-4a) = (1-4) + 3% Aktivkohle

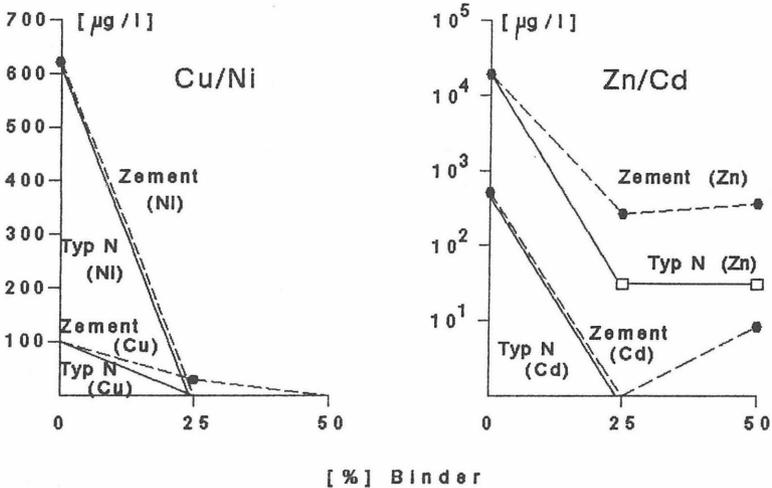


Abb. 4: Metallfreisetzung aus einem Schlacke-Kesselasche-Gemisch (15 + 1) vor und nach Verfestigung

Wir untersuchten auch den Einfluß von Chloridionen in Flugasche auf die Verfestigungs- und Leachingprozesse /5/. Dies ist wegen des zunehmenden Einsatzes basischer Rauchgaswäscher in (Müll-)Verbrennungsanlagen von besonderem Interesse. Die bei dieser Modelluntersuchung verwendete Steinkohleflugasche wurde mit Blei (Pb), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Nickel (Ni) und Zink (Zn), sowie mit steigenden Mengen an Calciumchlorid (CaCl_2) angereichert (Abb. 5). Geringe Chloridkonzentrationen bis zu 1% hatten eine deutliche Verbesserung der Cr-Fixierung zur Folge. Bis zu 10% Chlorid beeinflusste die Immobilisierung der Schadstoffe nicht. 15% und mehr Chlorid führte zu einem erheblichen Festigkeitsverlust der Formkörper, die in der rotierenden Testapparatur innerhalb weniger Stunden zerfielen. Dies führte zu einem Anstieg der Elutionsraten (Abb. 5a).

Bemerkenswerterweise hat der Zusatz von 5% Aktivkohle auch hier eine dauerhafte Fixierung der Metallionen zur Folge, selbst bei einem Zerfall der Formkörper während des Elutionstests zu einer Schlamm suspension (Abb. 5b). Da Cd- und Ni-Konzentrationen im Eluat unterhalb der Nachweisgrenze lagen, wurden sie in dieser Zeichnung nicht berücksichtigt.

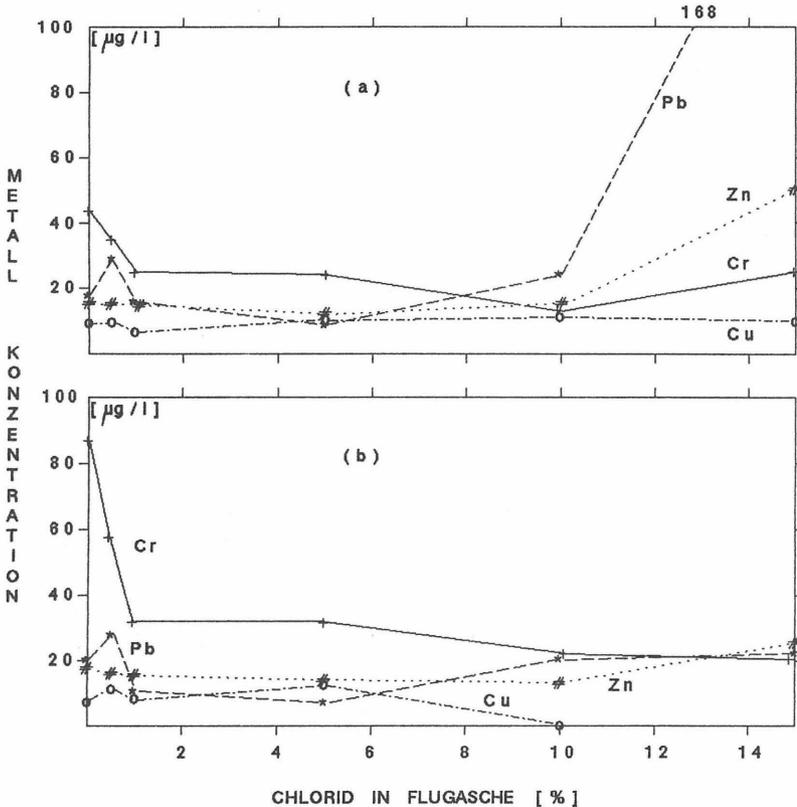


Abb. 5: Metallfreisetzung aus verfestigter Flugasche, angereichert mit löslichen Metallionen Cd (10 ppm), Pb, Cu und Ni (je 250 ppm) und Zn (1000 ppm); (a) Flugasche + Typ N = 3 + 1; (b) a + 5% A-Kohle

4. SCHLUßFOLGERUNGEN

Diese Ergebnisse zeigen, daß neben einem physikalischen Einschluß der Abfallinhaltsstoffe durch Verminderung der Wasserdiffusion durch die verfestigten Monolithe auch chemische Vorgänge zu einer Schadstoffixierung beitragen, die jedoch gegenwärtig noch nicht vollständig aufgeklärt sind.

Darüberhinaus wird erkennbar, daß ein geringer Anteil an CaCl_2 (bis zu 5% Cl^-) einen deutlich positiven Effekt der Schadstoffimmobilisierung bei der Verfestigung von Flugasche mit sich bringt. Dies sollte die Betreiber von Müllverbrennungsanlagen ermuntern, verstärkt die basischen Rauchgaswäscher einzuführen, zumal damit auch die Probleme der sauren Emissionen gelöst werden können. Die mobilisierenden Effekte höherer Chloridgehalte auf die Metalle können durch Verwendung geeigneter Adsorbentien ebenso kompensiert werden, wie dies für Chelatkomplexe der Metallionen bei Klärschlammkonditionierung auch gezeigt werden konnte.

Es sollte jedoch auch unterstrichen werden, daß vergleichbare Untersuchungen für organische Abfallinhaltsstoffe als Folge einer unvollständigen Abfallcharakterisierung hinsichtlich organischer Rückstände weitgehend fehlen. Die Gründe hierfür sind

- a. die zu stark an Summenparametern, wie z.B. CSB, BSB₅, TOC, AOX u.a., orientierte, und
- b. zu spät und erst nach Zusammenführung von unterschiedlichen Abfallströmen und damit Vergrößerung der Stoffvielfalt durchgeführte Abfallanalytik.

Gegenwärtig werden 50-100.000 vorwiegend organische Chemikalien industriell hergestellt bzw. verarbeitet /6/. Eine ungleich größere Anzahl an Neben- und Abfallprodukten werden dabei ebenfalls gebildet. Die Aufgabe der Abfallanalytik

kann es zwar nicht sein, all diese Substanzen ständig quantitativ zu verfolgen. Sie muß jedoch jene Daten erfassen, die als Grundlage für die umwelttechnischen Verfahren und Behandlungsschritte benötigt werden. Neben den auch heute üblichen Summenparametern werden verstärkt analytische Verfahren zur Erfassung von Einzelsubstanzen bzw. ganzen Substanzklassen in Screening-Verfahren genauso entwickelt und eingesetzt werden müssen, wie auch zur Beschreibung und Optimierung von chemischen Wechselwirkungen bei Abfallverfestigung für eine Endlagerung in übertägigen Sonderabfalldeponien bzw. in tiefen geologischen Formationen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Verfestigung partikulärer Abfälle führt manchmal zu einer Mobilisierung toxischer Abfallinhaltsstoffe. Die dafür verantwortlichen chemischen Wechselwirkungen sind z.T. noch wenig bekannt. Vermutlich spielen die durch Hydrolyse aus Proteinen der mikrobiellen Biomasse freigesetzten Komplexbildner eine entscheidende Rolle. Eine neue Methode zur Verbesserung der Schadstoffrückhaltung durch Vermeidung hydrolyseempfindlicher Biomasse und durch Verwendung starker Adsorbentien für Komplexliganden wird beschrieben. Der mögliche Einfluß von Calciumchlorid in Flugasche, welches aus basischen Rauchgaswäschern in Verbrennungsanlagen stammt, auf das Verfestigungsverhalten wird gleichfalls diskutiert.

6. LITERATUR

- /1/ M.E.Titlebaum, R.K.Seals, F.K.Cartledge, S.Engels;
CRC Critical Rev. Environ. Contr. 15, 179-211 (1985)
- /2/ M.Bahadir; in: Umweltbundesamt (ed.), Materialien 1/87,
S. 119-141, Erich Schmidt Verl., Berlin (1987)
- /3/ A.L.Page, A.A.Elseewi, I.R.Straughan; Res. Rev. 71,
83-120 (1979)

- /4/ E.Lahaniatis, D.Bieniek, M.Bahadir, F.Korte; Verfahren zur Immobilisierung von toxischen Schadstoffen, Offenlegungsschrift DE 37 17 085 A1 (21.5.1987)
- /5/ M.Bahadir, E.S.Lahaniatis, D.Bieniek, F.Korte; TIZ-Fachberichte 111, 683-686 (1987)
- /6/ F.Korte (ed.); Lehrbuch der Ökologischen Chemie, 2.Aufl, S. 117-140, Georg Thieme Verl., Stuttgart (1987)

Univ.-Prof. Dr.Dr. Müfit Bahadir

Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik
Technische Universität Braunschweig
Hagenring 30, 3300 Braunschweig
Tel.: 0531-391 5795



VERFESTIGUNG SCHWERMETALLHALTIGER ABFALLSTOFFE MIT HYDRAU-
LISCHEN BINDEMITELEN - MECHANISMEN DER IMMOBILISIERUNG

K.P.Großkurth, W.Malorny

1. EINLEITUNG

Schwermetallhaltige Abfälle gehören aufgrund der toxischen Wirkung vieler Metalle auf lebende Organismen zu den Problemstoffen in der Umwelt. Im Gegensatz zu schädlichen organischen Abfallstoffen sind sie nicht durch thermische Behandlung zerstörbar. Vielmehr findet bei den üblichen Abfallbehandlungsverfahren eine Anreicherung statt.

Trotz vermehrter Bemühungen um Wiederverwertung von Abfallinhaltsstoffen fallen nach wie vor beträchtliche Mengen unverwertbarer metallhaltiger Abfälle an, beispielsweise die schwermetallbelasteten Salze aus der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen oder Rückstände aus galvanotechnischen Prozessen, welche in geeigneter Form in Deponien endgültig abgelagert werden müssen. Voraussetzung für die Deponierung solcher Abfälle ist, daß von ihnen auch langfristig keine schädigende Beeinträchtigung der Umwelt ausgeht. Hierzu müssen sie vielfach erst durch Verfestigung mit einem geeigneten Bindemittel zwecks Erreichen vorgegebener mechanischer Festigkeitskennwerte (Zug- und Druckfestigkeit, Flügelscherfestigkeit) in eine deponiefähige Form gebracht werden. Des weiteren ist nachzuweisen, daß die Eluatqualität oberirdisch zu deponieren-der Abfälle - festgestellt in entsprechenden Auslaugtests (DEV S4, Triaxialzellentest) - den bestehenden Grenzwerten Genüge leistet. Zu den eluatcharakterisierenden Parametern gehören typischerweise im ppm-Bereich liegende Grenzkonzentrationen einer Vielzahl umweltschädlicher Schwermetalle.

2. VERFESTIGUNG MIT HYDRAULISCHEN BINDEMITTELN

Kennzeichnend für hydraulische Bindemittel ist, daß sie mineralischer Natur sind und unter Hydratwasseraufnahme sowohl an Luft als auch im Wasser erhärten. Zu diesen Stoffen gehören insbesondere die technischen Zemente, aber auch die sogenannten Puzzolane natürlicher oder industrieller Herkunft (z.B. Traß oder metallurgische Schlacke). Letztere werden aufgrund eines zur Erhärtung notwendigen, erforderlichenfalls zuzusetzenden Anregers (z.B. Kalk oder Gips) als latent hydraulisch bezeichnet.

Neben dem Zweck der Erhöhung der mechanischen Kennwerte eines Abfalls durch Zugabe eines geeigneten Bindemittels dienen die verschiedenen Verfestigungsverfahren vielfach zusätzlich auch dem durch die Begriffe "Einkapselung", "Stabilisierung" und "Fixierung" schlagwortartig umrissenen Ziel, die Mobilität gefährlicher Abfallinhaltsstoffe zu minimieren.

2.1 Einkapselung

Ebenso wie auch andere Verfestiger organischer oder anorganischer Herkunft vermögen zementhaltige Bindemittel Abfallpartikel in ihre Matrix aufzunehmen und durch Umhüllung so einzuschließen, daß die Abfallsubstanz gegen äußere Einwirkung chemischer oder physikalischer Art abgeschottet wird. Hierdurch bildet das Verfestigungsprodukt selbst ein Behältnis, in dem die Schadstoffe dauerhaft festgelegt sind.

Das Porensystem hydratisierter Zemente umfaßt ein weites Spektrum von Porenradien, das bis in den Bereich atomarer Dimensionen reicht. Es bewirkt, daß nicht nur Abfallpartikel anschaulicher Größe sondern auch Partikel molekularer Abmessungen im Gelporenraum der Calciumsilikathydrate (CSH) immobilisiert werden können, wofür der Begriff

"Mikroenkapselung" geprägt wurde. Das außerordentlich große Oberflächen-Volumenverhältnis des Zementgels bewirkt trotz des prinzipiell offenen Porensystems hydraulischer Bindemittel aufgrund starker Wechselwirkungskräfte die geringe Beweglichkeit des Porenelektrolyten in den Gelporen.

Der den Porenradienbereich von 10^{-8} bis 10^{-5} m umfassende Kapillarporenraum stellt - sieht man von makroskopischen Defekten wie Rissen, Lunkern, Verdichtungs-poren etc. ab - den eigentlichen Raum ionaler sowie hydrischer Transportvorgänge dar. Ziel verfahrenstechnischer Methoden bei der Verfestigung mit zementhaltigen Bindemitteln muß es sein, diesen mit Hilfe bekannter betontechnologischer Maßnahmen (u.a. Kontrolle des Feuchtigkeitsgehaltes, Verdichtung, Nachbehandlung) zu minimieren, um ein dichtes, wenig durchlässiges Gefüge niedriger Auslaugbarkeit und hoher mechanischer Festigkeit zu gewährleisten.

2.2 Stabilisierung

Im Zusammenhang mit der Deponierung schwermetallhaltiger Abfälle versteht man unter dem Begriff "Stabilisierung" insbesondere die Überführung löslicher Schwermetallverbindungen in chemisch stabile, d.h. wenig lösliche Phasen bzw. Maßnahmen zur Konservierung der Stabilität solcher Phasen.

Eine kennzeichnende Eigenschaft zementhaltiger hydraulischer Bindemittel im Gegensatz zu anderen Verfestigungsmitteln ist ihre stark alkalische Reaktion. Je nach Zementart wird in Abhängigkeit vom Gehalt an den Klinkermineralen Tricalcium- und Dicalciumsilikat (C_3S , C_2S) eine entsprechende Menge des nur mäßig schwer löslichen Calciumhydroxids ("Portlandit", Löslichkeit 1,26 g/l bei $20^\circ C$) im Verlauf der Zementhydratation gebildet. Bei Port-

landzementen nach DIN 1164 beträgt die im Hydratationsverlauf gebildete Calciumhydroxidmenge größenordnungsmäßig $20 + 25$ Masse-% des Zementsteins. Sie stellt unberücksichtigt seines Alkaliionengehaltes eine Alkalitätsreserve dar, welche den pH-Wert der Porenflüssigkeit auf einen Wert um $\text{pH}=12,6$ puffert. Aufgrund dieser Eigenart zementbasierender Bindemittel werden gelöste Schwermetallsalze analog den Vorgängen bei der Abwasserbehandlung durch Basezugabe als Metallhydroxide ausgefällt.

Eine Reihe von Schwermetallen, zu denen u.a. Zink und Chrom gehören, bilden bei Überschreiten des Fällungs-pH-Bereichs allerdings lösliche Hydroxokomplexe, woraus eine mit steigendem pH-Wert wieder zunehmende Schwermetallkonzentration im Eluat resultieren kann. In Gegenwart von Kalk, also im Falle der Abwasserreinigung mittels Fällung durch Kalkmilch- statt durch Natronlaugezugabe, aber auch in zementhaltigen Verfestigungsprodukten, reagieren diese zu schwerlöslichen Calciumverbindungen.

In schwächer alkalischen Medien bilden sich vielfach basische Schwermetallsalze, z.B. in Gegenwart von Kohlensäure Carbonate, welche sich ebenfalls durch ihre geringe Löslichkeit auszeichnen.

2.3 Fixierung

Im Bereich der Verfestigungstechnologie unter Anwendung hydraulischer Bindemittel wird mit dem Begriff der Fixierung von Schadstoffen der Übergang löslicher Schwermetalle in schwer bzw. praktisch unlösliche durch chemische Reaktion mit Bestandteilen des Bindemittels unter Phasenneu- bzw. -umbildung angesprochen. In diesem Sinne beinhaltet Fixierung stets auch die zuvor genannte Stabilisierung von Abfällen.

3. MODELLVERSUCHE

Zur Untersuchung der den Immobilisierungsprozessen zugrundeliegenden chemisch-physikalischen Abläufe werden im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes u.a. Untersuchungen an überschaubaren Schwermetall-Bindemittel-Systemen durchgeführt. Im nachfolgenden seien einige Versuchsergebnisse beispielhaft am System C_3S - ZnO - H_2O dargestellt, welche die zuvor dargelegten Mechanismen unterstreichen.

Zwecks Verfolgung des Hydratationsablaufs der Zementklinkerphase C_3S , welche maßgeblich die Entwicklung der Zementsteinfestigkeit bestimmt, in Gegenwart von Zink wurden Mischungen aus reinem, synthetisch hergestelltem C_3S und ZnO mit einem Wasser-Feststoffverhältnis von 20 : 1 und einem ZnO -Anteil von 10 Masse-% bezogen auf die Gesamtfeststoffmenge angesetzt und der Reaktionsfortschritt über einen Zeitraum von mehreren Monaten durch röntgendiffraktometrische Phasenanalyse und rasterelektronenmikroskopische Untersuchung verfolgt.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, zeigt das Diffraktogramm nach 7 Tagen Hydratationsdauer noch deutlich die Reflexe des zugemischten Zinkoxids. Daneben sind die Linien des noch nicht hydratisierten Klinkerminerals zu erkennen. Das Vorhandensein von Portlanditreflexen weist auf die Bildung von Calciumsilikathydrat hin. Letzteres ist röntgendiffraktometrisch wegen seiner amorphen Struktur in praxi meist nicht unmittelbar nachweisbar. Im Vergleich zu Bild 2, welches die gleichen Verhältnisse für ein reines C_3S -Wasser-Gemisch wiedergibt, wird an Hand der Intensität der C_3S -Peakgruppe bei 32° (2 Theta) deutlich, daß die Hydratationsentwicklung durch die Gegenwart des Schwermetalls merklich verzögert wird. Dieser Effekt ergibt sich auch für eine Reihe weiterer Schwermetalle.

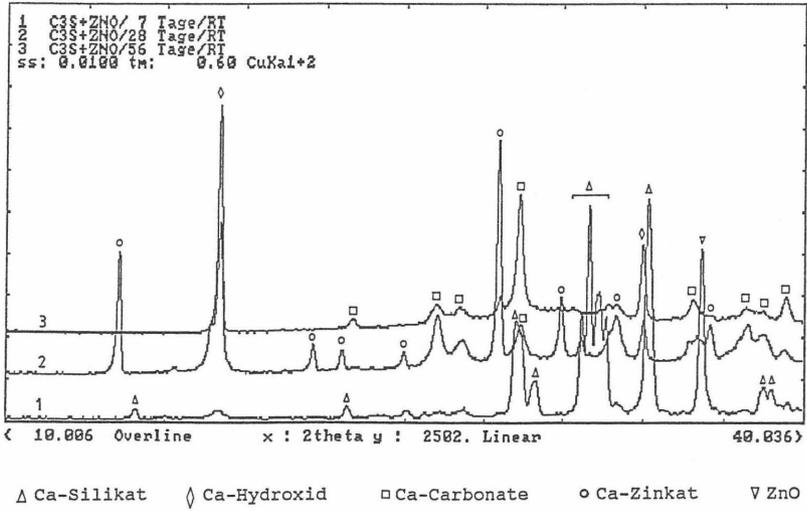


Bild 1: Röntgendiffraktogramme eines C₃S-ZnO-H₂O-Gemisches zu unterschiedlichen Hydratationszeitpunkten

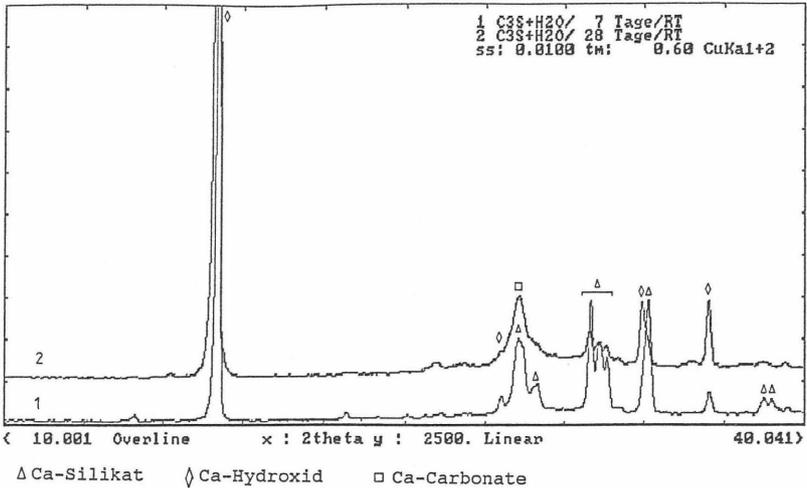


Bild 2: Röntgendiffraktogramme eines C₃S-H₂O-Gemisches zu unterschiedlichen Hydratationszeitpunkten

Nach insgesamt 28 Tagen Hydratationszeit ist allerdings den Röntgendiagrammen praktisch kein signifikanter Unterschied mehr hinsichtlich des Hydratationsgrades zwischen dem zinkhaltigen und dem zinkfreien Ansatz zu entnehmen. Erkennbar wird allerdings, daß die Reflexe des ZnO völlig verschwunden sind. An die Stelle des Zinkoxids ist die neugebildete Phase Calciumzinkhydroxidhydrat (Calciumzinkat) getreten, welche - wie beschrieben - auf der Reaktion zwischen dem im stark Alkalischen gebildeten löslichen Zink-Hydroxokomplex und dem verfügbaren Kalk beruht. Das Fehlen dieser neugebildeten Phase nach insgesamt 56 Tagen deutet darauf hin, daß in diesem System eine offensichtlich noch stabilere Phase existieren muß, welche allerdings röntgenographisch nicht eindeutig nachgewiesen wird. Es ist anzunehmen, daß die beobachtete Instabilität des Calciumzinkats auf der Bildung einer nahezu röntgenamorphen zinkbindenden Silikathydratphase beruht, welche chemisch-mineralogisch ebenso wie das unter Zinkausschluß gebildete CSH dem natürlichen Mineral Tobermorit ähnlich ist.

In Gegenüberstellung zum Röntgendiffraktogramm der 28-Tage-Probe dokumentiert die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der gleichen Probe anschaulich das Auftreten des besagten Calcium-Zinkats in Form rhombisch tafeliger Kristalle (Bild 3). Unabhängig von der röntgenographischen Phasenanalyse gelingt die Phasenidentifizierung am rasterelektronenmikroskopischen Objekt durch energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX), welche mittels (halb-)quantitativer Elementaranalyse in Verbindung mit dem Kristallhabitus die benötigte Aussage erbringt. Das zu diesem Foto gehörige Elementverteilungsbild (Bild 4) belegt die deutliche Zinkanreicherung in solchen Kristallen im Vergleich zu den Calciumsilikathydrat-Partikeln.

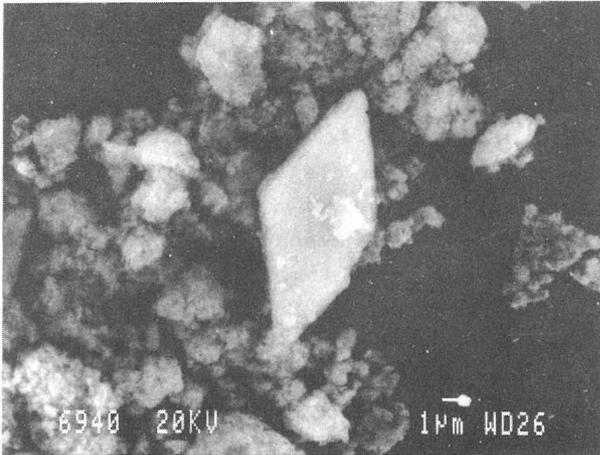


Bild 3: REM-Aufnahme eines Calciumzinkatkristalls neben CSH-Partikeln ($C_3S-ZnO-H_2O$; 28 d Hydratation)

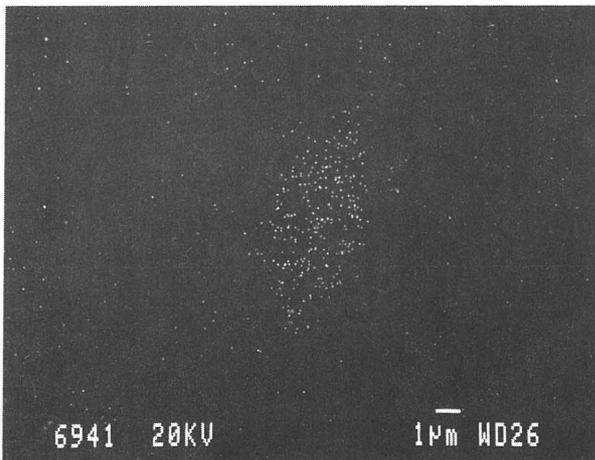


Bild 4: EDX-Verteilungsaufnahme des Elements Zn zu Bild 3

Adsorptionsprozesse an der großen Oberfläche des Calciumsilikathydratgels führen darüber hinaus ebenfalls zur Immobilisierung von Schwermetallionen.

Neben den bisher ausschließlich betrachteten Calciumsilikaten können auch die Zementklinkerphasen Calciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrit (C_4AF) eine wichtige Rolle bei der chemischen Bindung von Fremdstoffen spielen. Wie aus der Zementchemie bekannt, sind sie in der Lage, Sulfat- und Chloridionen in Form der Zementminerale Ettringit bzw. Friedel'sches Salz zu binden. Untersuchungen an anderer Stelle zufolge sollen sie jedoch auch Schwermetallionen in nennenswertem Umfang in ihre Kristallstruktur einbauen können (USCHIKAWA, 1978).

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Sinne des anerkannten Multibarrierenkonzepts für umweltgefährdende Abfälle muß der Abfall selbst eine wirksame Barriere gegen den Austrag toxischer Stoffe sein. Die Verfestigung schwermetallhaltiger Abfälle mit hydraulischen Bindemitteln bietet aufgrund des Zusammenwirkens verschiedener Immobilisierungsmechanismen mehr als nur die bloße Verbesserung mechanischer Kennwerte zur Beseitigung ansonsten in oberirdischen Deponien nicht ablagerungsfähiger Abfälle. Sie trägt - der Terminologie des Entwurfs der TA Sonderabfall folgend - vielmehr Züge einer chemisch-physikalischen Behandlungsmethode.

Durch gezielte Anpassung an spezielle Erfordernisse bestehen breite Möglichkeiten zur Optimierung, etwa durch entsprechende Bindemittelwahl sowie durch Zusatz geeigneter Additive und Zuschlagstoffe, wie beispielsweise Natriumsulfid (MAURER et al., 1983) oder Bentonit. Der gebotenen Wirtschaftlichkeit kann insbesondere dann Rechnung getragen werden, wenn es gelingt, durch Kombination verschie-

dener Abfallarten (beispielsweise REA-Gips und Kraftwerk-
aschen) sozusagen Abfall mit Abfall hydraulisch zu ver-
festigten.

5. Literatur

MAURER, P. et al.

Konditionierung wasserlöslicher Sonderabfälle zur sicheren
übertägigen Deponierung. Abschlußbericht der NUKEM-GmbH,
FuE-85052, Hanau, 1985.

USCHIKAWA, H., TSUKIYAMA; K., IHAIA, Y.

Über die Bindung schädlicher Elemente durch einen hochwer-
Über die Bindung schädlicher Elemente durch einen hochwer-
tigen Spezialzement. Zement-Kalk-Gips 31, H. 4, 1978.

Autorenverzeichnis

Prof. Dr. Dr. M. Bahadir
Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik
Technische Universität Braunschweig
Hagenring 30
3300 Braunschweig

Dipl.-Ing. P. Beckefeld
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig
Gaußstraße 2
3300 Braunschweig

Dr. Thomas Brasser
GSF - Institut für Tieflagerung
Theodor-Heuss-Str. 4
3300 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. J. Drescher
Niedersächsisches Landesamt
für Bodenforschung
Alfred-Bentz-Haus
3000 Hannover 51

Dr. J. Frigge
DMT - Deutsche Montan Technologie
Institut für Chemische Umwelttechnologie
Franz-Fischer-Weg 61
4300 Essen 13 (Kray)

Dipl.-Ing. Gay
Forschungs- und Materialprüfungsanstalt
Baden-Württemberg
Pfaffenwaldring 4
7000 Stuttgart 80

Dr. rer.nat. L.J. Gerschler
Niedersächsisches Landesamt
für Wasser und Abfall
Langelinienwall 26
3200 Hildesheim

Prof. Dr.-Ing. K. P. Großkurth
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstr. 52
3300 Braunschweig

Dr. F.W. Hug
Geoconsult GmbH
Niederhochstädter Straße 25
6242 Kronberg

Dr.-Ing. W. Krings
Heitkamp Umwelttechnik GmbH
Heinrichstr. 67
4630 Bochum

Dr.-Ing. Th. Kruse
Erdbaulaboratorium Ahlenberg
Am Ossenbrink 40
5804 Herdecke/Ruhr

Dipl.-Phys. W. Malorny
Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstr. 52
3300 Braunschweig

Dipl.-Ing. Th. Meyer
GSF - Institut für Tieflagerung
Theodor-Heuss-Str. 4
3300 Braunschweig

Dipl.-Ing. H. Möller
Bilfinger + Berger
Bauaktiengesellschaft
Marienstraße 45/47
3000 Hannover 1

Dr. Uwe Mühlenweg
GSF - Institut für Tieflagerung
Theodor-Heuss-Str. 4
3300 Braunschweig

Dipl.-Ing. Ney
Geoconsult GmbH
Niederhochstädter Straße 25
6242 Kronberg

Dr. R. Oberste-Padtberg
Rheinische Kalksteinwerke GmbH
Abt. Forschung und Entwicklung
Wilhelmstraße 77
5603 Wülfrath

Dipl.-Ing. Prein
Wersche GmbH
Schierholzstraße 18
3000 Hannover

Dr.-Ing. Reuter
Wersche GmbH
Schierholzstraße 18
3000 Hannover

Dr. A. Roeder
Rheinische Kalksteinwerke GmbH
Abt. Forschung und Entwicklung
Wilhelmstr. 77
5603 Wülfrath

Dipl.-Ing. U. Sehrbrock
Institut für Grundbau
und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig
Gaußstraße 2
3300 Braunschweig

Dr.-Ing. P. Spillmann
Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abt. Landw. Wasserbau und
Abfallwirtschaft
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstr. 51 a
3300 Braunschweig

Dipl.-Ing. Th. Voigt
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig
Gaußstr. 2
3300 Braunschweig



Inserentenverzeichnis

Erdbaulaboratorium Ahlenberg
Am Ossenbrink 40

5804 Herdecke

Frank Deponie-Technik GmbH
Bellersheimer Sztr. 39

6303 Hungen 7

Harreß Geotechnik GmbH
Marktplatz 1

8856 Harburg/Schw.

iwb
Ingenieurgesellschaft mbH
Beratende Ingenieure für das Bauwesen
Pockelsstraße 9

3300 Braunschweig

Menzel GmbH
Postfach 14 09

7798 Pfullendorf

Technische Universität Braunschweig
Leichtweißinstitut für Wasserbau
Abt. Hydrologie und Wasserwirtschaft
Beethovenstr. 51 a

3300 Braunschweig



IGB TUBS

**Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik**

- | | | |
|----------|--------------------------|--|
| Nr. 76-1 | Scheffler, E. | : Die abgesteifte Baugrube berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976 |
| Nr. 78-2 | Frank, H. | : Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978 * |
| Nr. 79-3 | Schnell, W. | : Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979 |
| Nr. 80-4 | Ruppert, F.-R. | : Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980 |
| Nr. 81-1 | Schuppener, B. | : Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastung auf Offshore-Bauwerken, 1981 * |
| Nr. 6 | Wolff, F. | : Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981 |
| Nr. 7 | Bätcke, W. | : Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982 |
| Nr. 8 | Meseck, H
Schnell, W. | : Dichtungswände und -sohlen, 1982 * |



IGB-TUBS

- Nr. 9 Simons, H. : Entwicklung geeigneter Verfahren zum
Ruppert, F.-R. Messen der physikalischen Eigenschaf-
 ten von Bentonitsuspensionen auf Bau-
 stellen, 1982 *
- Nr. 10 Beckmann, U. : Einflußgrößen für den Einsatz von
 Tunnelbohrmaschinen, 1982
- Nr. 11 Papakyriakopoulos, P. : Verhalten von Erd- und Steinschütt-
 dämmen unter Erdbeben, 1983
- Nr. 12 Sondermann, W. : Spannungen und Verformungen bei
 Bewehrter Erde, 1983
- Nr. 13 Meseck, H. : Sonderheft zum 10-jährigen Bestehen
 des Instituts, 1984
- Nr. 14 Raabe, W. : Spannungs-Verformungsverhalten über-
 konsolidierter Tone und dessen Abhän-
 gigkeit von ingenieurgeologischen
 Merkmalen, 1984
- Nr. 15 Früchtenicht, H. : Zum Verhalten nichtbindigen Bodens
 bei Baugruben mit Schlitzwänden, 1984
- Nr. 16 Knüpfer, J. : Schildvortrieb bei flüssigkeitsge-
Meseck, H. stützter Ortsbrust, 1984
- Nr. 17 N.N. : Ablagerung umweltbelastender Stoffe,
 Fachseminar 06. - 07. Februar 1985,
 Braunschweig *



IGB TUBS

- Nr. 28 Geil, M. : Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand, 1989
- Nr. 29 Kruse, Th. : Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen, 1989
- Nr. 30 Rodatz, W., u.a. : Sonderheft zum 15jährigen Bestehen des Instituts, 1989

* = vergriffen