

Studien und Tagungsberichte  
Band 1

# Geotechnik im Deponiebau



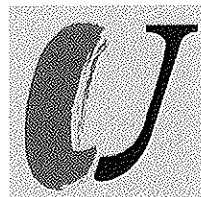
LANDESUMWELTAMT  
BRANDENBURG



Studien und Tagungsberichte  
Band 1

# Geotechnik im Deponiebau

Ausgewählte Beiträge aus  
den Geotechnischen Seminaren des  
Landesumweltamtes Brandenburg  
1992/93



LANDESUMWELTAMT  
BRANDENBURG



## Impressum

Studien und Tagungsberichte  
Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg

Herausgeber:  
Landesumweltamt Brandenburg  
Referat Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Berliner Straße 21 - 25  
14467 Potsdam

Gesamtherstellung:  
Märker · Wildpark-West

Gedruckt auf 100% Recyclingpapier

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Landesregierung Brandenburg herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

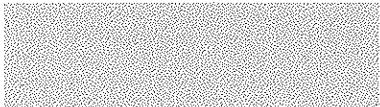
# Studien und Tagungsberichte Band 1

© 2008 Deutscher Fachschriften-Verlag

## Inhalt

<b>Vorwort</b> Walter Haase, Präsident des Landesumweltamtes Brandenburg	5
<b>Probleme der Planung und Errichtung von Abfalldeponien in Brandenburg vor dem Hintergrund der TA Siedlungsabfall</b> Ulrich Stock, Landesumweltamt Brandenburg	7
<b>Setzungen und Sackungen unter Deponien auf Kippen</b> Wolfgang Förster, Technische Universität Bergakademie Freiberg	11
<b>Möglichkeiten des Einsatzes geophysikalischer Voruntersuchungen für Deponiestandorte</b> Hellfried Petzold u.a., Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, Senftenberg	19
<b>Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Intensivverdichtung</b> Volker Böhme, Ingenieurbüro Böhme & Partner, Spremberg	26
<b>Dynamische Stabilisierung des setzungsfließgefährdeten Randbereiches der Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen durch Sprengen</b> Walther Kuntze, Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, Senftenberg	31
<b>Bewertung biologischer Bodenmechanik</b> Ernst Scheid, Ingenieurbüro für Boden- und Gewässerschutz Außenstelle Berlin-Brandenburg	40
<b>Geotechnische Eignungsprüfungen von Deponiematerialien</b> Hans-Volker Huth, Ingenieurbüro für Boden- und Gewässerschutz Außenstelle Berlin-Brandenburg	52
<b>Einsatz eines Tonminerals als mineralische Basisabdichtung im Deponiebau</b> Hans-Gerd Franke, ORA Handels GmbH & Co., Berlin	56
<b>Geokunststoffe im Deponiebau</b> Lutz Wichter, Technische Universität Cottbus	59
<b>Die Sicherung einer geschlossenen Deponie am Beispiel Golm, Landkreis Potsdam – Mittelmark</b> Ulrich Turczynski, Boden- und Deponie-Sanierungs GmbH, Potsdam	65
<b>Verallgemeinerte Erfahrungen bei der Sanierung eines Sonderabfall-Zwischenlagers einer Lackfabrik</b> Jürgen Keßler, BIUG – Gesellschaft, Freiberg	72





# Vorwort

Walter Haase

Präsident des Landesumweltamtes Brandenburg

Das Landesumweltamt Brandenburg hat sich innerhalb nur eines Jahres dreimal auf Vortragsveranstaltungen mit Problemen der Abfallablagerung befaßt. Diese Veranstaltungen unter dem Thema 'Geotechnische Seminare' fanden am 1. Oktober 1992, 1. Februar 1993 sowie am 30. September des gleichen Jahres statt.

Während die ersten Seminare überwiegend auf spezielle Fragen der Nutzung von Kippenflächen des Braunkohlenbergbaus als Deponiestandorte eingingen, war das dritte Seminar umfassender angelegt und bezog sich auf den Gesamtkomplex der Erkundung, Errichtung und Sicherung von Abfalldeponien im Land Brandenburg.

Die Resonanz auf diese Veranstaltungen spiegelte sich sowohl in der großen Teilnehmerzahl als auch der regen Fachdiskussion wider. Aus diesem Anlaß ist die Fortführung entsprechender Vortragsveranstaltungen im Rahmen dieser Geotechnischen Seminare vorgesehen und der nächste Termin wird bereits jetzt für das IV. Quartal 1994 vorbereitet.

Für alle, die in unserem Land Verantwortung in den Umweltbereichen tragen, gilt nach wie vor der Grundsatz:

Abfälle sind zu vermeiden.

Gelingt dies mit den derzeit verfügbaren technischen und wirtschaftlichen Mitteln in vertretbarem Maße nicht, so müssen wir sie verwerten.

Der Vermeidung kommt dabei die höchste Priorität zu. Wir wollen damit den im Land Brandenburg festgeschriebenen Weg fortsetzen. Wir wissen natürlich, daß dieses Ziel wie auch jedes der anderen Ziele, die wir uns sowohl in der Technik als auch in der gesellschaftlichen Entwicklung stecken, niemals ganz oder ideal erreichbar sein wird.

Wir wollen die verbleibenden Abfälle so behandeln, daß sie möglichst emissionsarm abgelagert werden können.

Als Behandlungsverfahren favorisiert Brandenburg die Verfahren der biologisch-mechanischen Abfallbehandlung, obwohl bekanntlich die TA Siedlungsabfall auf die Abfallverbrennung orientiert.

Die Abfallverbrennung wird durch Brandenburg nicht generell, aber als ausschließliches Prinzip der Abfallbehandlung abgelehnt. Insbesondere für bestimmte Sonderabfälle wie Klärschlämme, Shredderleichtfraktionen sowie Teilfraktionen von Siedlungs-

abfällen, wird die thermische Behandlung befürwortet.

Die ausschließliche Verbrennung von Siedlungsabfällen ist jedoch solange abzulehnen, wie nicht widerlegt ist, daß durch Anwendung der biologisch-mechanischen Behandlungsmethoden Abfälle ausreichend emissions- und nachsorgearm abgelagert werden können.

Wir sehen die Gefahr, daß die einseitige Orientierung auf die Abfallverbrennung den Bemühungen um Abfallvermeidung und die vorrangig stoffliche Verwertung zuwiderläuft. Darüber hinaus wirft die Verbrennung weitere Probleme auf. Es ist zum einen auf die fehlende Akzeptanz in der Bevölkerung zu verweisen. Aber auch die Kosten der Verbrennungsanlagen – Brandenburg muß nach heutigen Schätzungen mit einem Aufwand von bis zu 2 Mrd DM rechnen – fallen schwer ins Gewicht und drücken sich in höheren Abfallgebühren aus.

Aber auch nach Ausschöpfung aller verfügbaren bzw. effizienten Mittel der Abfallvermeidung, -behandlung und -verwertung verbleiben doch Restabfälle, die auf Deponien zu entsorgen sind. Die Bereitstellung der erforderlichen Deponiekapazität bleibt deshalb eine zentrale Aufgabe der entsorgungspflichtigen Körperschaften. Sie muß ohne zeitlichen Verzug vorangebracht werden.

Nach der Schließung von etwa 2.000 Ablagerungsplätzen, die vor der Wende genutzt wurden, stützt sich die Abfallentsorgung Brandenburgs auf derzeit 57 Deponien, die der „Vorläufige Abfallentsorgungsplan des Landes Brandenburg, Teilplan Siedlungsabfälle“ aufführt.

Der Betrieb dieser Anlagen wurde schon zu DDR-Zeiten aufgenommen, wobei die Standortauswahl und die Errichtung dieser Anlagen nicht dem Stand der Technik entsprachen. Diesem Mangel kann auch durch nachträgliche Auflagen nur bedingt abgeholfen werden. Wir müssen uns vor Augen halten, daß die Ertüchtigungsmaßnahmen, wie sie für die noch bestehenden Anlagen laufen, die notwendige Entsorgungssicherheit auf Dauer nicht gewährleisten können.

Es ist deshalb dringend erforderlich, diese veralteten Anlagen zu sichern und sie durch moderne Deponien abzulösen. In Brandenburg gehen wir davon aus, daß zukünftig etwa 15 moderne Zentraldeponien

benötigt werden, die Abfälle aus Brandenburg und Berlin aufnehmen müssen.

Den bei der Errichtung dieser Deponien einzuhalten- den Stand der Technik schreibt die TA Siedlungsab- fall vor. Der Stand der Technik ist etwas Lebendiges. Er entwickelt sich mit neuen Erkenntnissen und Er- fahrungen. Neue Technologien, wie z.B. die fort- schreitende Entwicklung kontrollierbarer Abdich- tungssysteme oder alternativer Dichtungen können dazu beitragen, daß Abfaldeponien sicherer und zu- gleich kostengünstiger gebaut werden.

Das Landesumweltamt Brandenburg als fachtechni- sche und fachwissenschaftliche Behörde des Um- weltministeriums hat es sich zum Ziel gestellt, ge- meinsam mit Fachexperten einschlägiger Institutio- nen, Ingenieurbüros und Praxisbetrieben zur Weiter- entwicklung des technischen Standes auf dem Ge- biet der Abfallablagerung beizutragen.

Wir sehen unsere Aufgabe aber auch darin, durch die Verbreitung neuer wissenschaftlich – technischer Erkenntnisse sowie durch entsprechende Information die entsorgungspflichtigen Körperschaften in ihrer Arbeit zu unterstützen. Die Durchführung der Geo- technischen Seminare und die Veröffentlichung ihrer wichtigsten Ergebnisse ist ein Beitrag hierzu.

Wolke Haase

Dr.-Ing. Walter Haase  
Präsident des Landesumweltamtes Brandenburg  
Potsdam, März 1994

# Probleme der Planung und Errichtung von Abfalldeponien in Brandenburg vor dem Hintergrund der TA Siedlungsabfall

Ulrich Stock, Landesumweltamt Brandenburg

## Einleitung

Das Landesabfallvorsichtgesetz des Landes Brandenburg fordert von den entsorgungspflichtigen Körperschaften, daß die Abfallwirtschaftsplanung von der Gewährleistung einer mindestens 10jährigen Entsorgungssicherheit auszugehen hat. Es gehört zu den wichtigsten Aufgaben einer entsorgungspflichtigen Körperschaft, die dazu erforderliche Anlagenkapazität bereitzustellen.

Trotz wachsender Erfolge bei den Bemühungen um die Vermeidung und Verwertung von Abfällen, trotz der Entwicklung neuer Technologien der Abfallentsorgung wie Thermoselect ist davon auszugehen, daß die Ablagerung von Reststoffen auf Deponien auch in der nächsten Zukunft eine wichtige Säule der Abfallwirtschaft bleibt. Es ist zwar zu erwarten, daß Initiativen der Gesetzgeber, Fortschritte der Abfallwirtschaft, wachsendes Umweltbewußtsein und steigender Kostendruck zu einer Verringerung des zu deponierenden Abfallvolumens führen, in Anbetracht langwieriger Genehmigungsverfahren und hoher Investitionskosten ist jedoch einem ausreichenden Planungsvorlauf bei der Errichtung von Abfalldeponien höchste Priorität beizumessen.

Da sich die Regierung des Landes Brandenburg dazu bekennt, Siedlungsabfälle des Landes Berlin weiterhin in Brandenburg abzulagern, sind in Summe in einem kurz- bis mittelfristigen Zeitraum ca. 2,5 Mio t Siedlungsabfälle auf Hausmülldeponien im Land Brandenburg jährlich zu deponieren, was einem Volumenbedarf von etwa 3 Mio m<sup>3</sup> entspricht.

## Nutzung und Ertüchtigung bestehender Deponien

Für die Deponierung dieser Abfälle stehen dem Land Brandenburg in den nächsten Jahren nur solche Deponien zur Verfügung, mit deren Errichtung und Betrieb schon zu DDR-Zeiten begonnen wurde. Diese Anlagen entsprechen nicht dem Stand der Technik. Ihre Ertüchtigung ist in begrenztem Maße möglich. Im Rahmen der Altgenehmigung können vorhandene Erweiterungsflächen durch Einbau einer Basisabdichtung und weiterer Einrichtungen zur Emissionsminderung immerhin so ausgebaut werden, daß ihr technischer Standard dem einer Neuanlage nahe-

kommt. Keinesfalls jedoch können vorhandene Standortnachteile ausgeglichen werden.

Das Landesumweltamt erläßt nachträgliche Anordnungen nach § 9a des Vorsichtgesetzes über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen - Abfallgesetz (AbfG) mit folgenden Inhalten:

1. Vorgabe der Abfälle, die für die weitere Ablagerung zugelassen sind
2. Vorgaben zum Aufbau der Deponie, Optimierung der Betriebsführung und Einbautechnologie
3. Komplettierung der baulichen und technischen Einrichtungen
4. Maßnahmen des Arbeits- und Brandschutzes
5. Maßnahmen zur Verminderung der Deponieemissionen (Basisabdichtungen auf Erweiterungsflächen)
6. Kontrolle und Dokumentation
7. Einrichtung der Fremd- und Eigenüberwachung
8. Rekultivierung und Sicherung (Oberflächenabdichtung) abgeschlossener Deponieabschnitte.

Bei der Formulierung der Anforderungen an die deponietechnischen Einrichtungen sind grundsätzlich die Festlegungen der Technischen Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall) zu Altanlagen (Punkt 11) zu beachten. In Einzelfällen wird es jedoch notwendig sein, von der TA Siedlungsabfall abweichende pragmatische Lösungen zu finden.

Beispielsweise erhebt das Landesumweltamt Brandenburg derzeit noch nicht die Forderung, auf Altanlagen eine Oberflächenabdichtung in der Ausführung als Kombinationsdichtung gemäß TA Siedlungsabfall aufzubringen. Die Begründung dafür ist in dem schwer vorherbestimmbaren Setzungsverhalten der Altanlagen und in der daraus resultierenden Gefahr der Zerstörung der Abdichtung zu finden. Unter 11.2.1.h) läßt die TA Siedlungsabfall den Einbau einer sickerwasserminimierenden Abdeckung zu.

Diese Anforderungen können mit einer Abdeckung, die aus einer mineralischen Schicht ausreichender Mächtigkeit (mindestens 50 cm,  $k_f = 1 \times 10^{-7}$  m/s) und einer Rekultivierungsschicht besteht, ausreichend erfüllt werden. Denkbar ist auch der Einsatz alternativer Technologien wie z.B. der Abdeckung mit Bentonitmatten.

Dem Punkt 11.2.1 der TA Siedlungsabfall ist keine Forderung nach einer Basisabdichtung bei dem weiteren Betrieb von Altanlagen zu entnehmen. Das Landesumweltamt ist jedoch der Ansicht, daß der Einbau einer Basisabdichtung Voraussetzung für die Nutzung von Flächen ist, die vom Genehmigungsbestand erfaßt, aber noch nicht mit Abfall belegt sind. Die Berechtigung für diese Forderung entnehmen wir § 2 Abs. 1 AbfG. Immerhin kann eine solche Erweiterung der Deponie im Rahmen bestehender Altgenehmigungen dem Umfang einer neuen Deponie nahekommen.

## Planung und Errichtung neuer Abfalldeponien

Nach vollzogener Kreisgebietsreform und der Bildung von Abfallzweckverbänden entstanden in Brandenburg 12 Entsorgungsgebiete, in denen eine Kreisverwaltung oder ein Abfallzweckverband als entsorgungspflichtige Körperschaft tätig ist.

In jedem dieser Entsorgungsgebiete wird zumindest eine neue Zentraldeponie zur Gewährleistung der Entsorgungssicherheit benötigt. Nach derzeitigem Planungsstand ist mit mindestens 13 und höchstens 15 neuen Deponien zu rechnen.

Grundlage der Planung neuer Abfalldeponien ist das von STIEF entwickelte Multibarrierenkonzept. Dieses besagt, daß in jeder Deponie mehrere unabhängig voneinander wirkende Sicherheiten, im übertragenen Sinne „Barrieren“, gegeben sein müssen, die Deponieemissionen verhindern. Diese Barrieren sind

- der Deponiestandort selbst, insbesondere durch seine geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften
- die Basisabdichtung
- der Deponiekörper selbst
- die Oberflächenabdichtung
- die Langzeitkontrolle der Deponieemissionen und des Deponieverhaltens und
- die Abfallvorbehandlung mit dem Ziel der Schadstoffentfrachtung, –einbindung oder –aufkonzentrierung (dieser Barriere wird wachsende Bedeutung beigemessen).

Die TA Siedlungsabfall definiert die Anforderungen an jede einzelne Barriere. In einigen Fällen wird durch die Anforderungen der TA Siedlungsabfall die Barrierewirkung über die eigentliche begriffliche Bestimmung von STIEF hinausgeführt.

Bei der Festlegung der Anforderungen an die Barrieren wird nach Deponieklassen unterschieden. Damit wird das schon aus anderen Regelwerken (z.B. aus Nordrhein–Westfalen) bekannte Deponieklassensystem weiterentwickelt. Nach Einführung der TA Siedlungsabfall lassen sich im wesentlichen drei Klassen oberirdischer Deponien unterscheiden:

- die Sonderabfalldeponie nach TA Abfall
- die Deponiekategorie II nach TA Siedlungsabfall (vergleichbar der alten Hausmülldeponie)
- die Deponiekategorie I nach TA Siedlungsabfall (vergleichbar der alten Bauschuttdeponie).

Dieser Systematik liegt der Gedanke zugrunde, daß sich die Qualität der Sicherheitseinrichtungen einer Deponie und das Gefährdungspotential der abzulagernden Abfälle gegenseitig bedingen.

Bei den Deponien, von denen in diesem Abschnitt die Rede ist, handelt es sich um solche der Deponiekategorie II nach TA Siedlungsabfall.

## Deponiestandortsuche

In Brandenburg werden im Rahmen eines dem eigentlichen Genehmigungsverfahren vorausgehenden Raumordnungsverfahren möglichst geeignete Deponiestandorte gesucht.

Der zuständigen Behörde des Umweltministeriums liegen derzeit Unterlagen über Suchverfahren in 10 Entsorgungsgebieten vor.

Die begriffliche Bestimmung der Barriere „Deponiestandort“ nach STIEF orientiert sich in erster Linie am Schutzgut Wasser. Die TA Siedlungsabfall geht aber davon aus, daß die Barrierewirkung eines Standortes nicht nur durch die Geologie/Hydrologie bestimmt wird.

Dementsprechend werden im Kapitel 10.3 (Standort) unter 10.3.1 allgemeine Anforderungen formuliert, die sich nach „Ausschluß–“ und „Einschränkungskriterien“ unterscheiden lassen. Des weiteren werden unter 10.3.2 und 10.3.3 Forderungen hinsichtlich der Eignung eines Standortes als geologische Barriere erhoben.

Bei der Deponiestandortsuche sind weiterhin die landesplanerischen Vorgaben des vorläufigen Abfallentsorgungsplanes des Landes Brandenburg (Teil Siedlungsabfälle) zu beachten. Zu nennen sind insbesondere die Forderung nach Berücksichtigung von Berliner Abfällen bei der Gesamtplanung und die Bevorzugung des Schienentransportes.

Die Methodik der Standortsuche wird in einem Merkblatt beschrieben. Danach sind folgende Schritte auszuführen:

1. Negativkartierung  
(Darstellung ungeeigneter Standorte auf der Basis von Ausschlußkriterien)
2. Positivkartierung  
(Darstellung potentiell geeigneter Standorte auf der Basis von Einschränkungskriterien unter maßgeblicher Beachtung des Kriteriums „Geologie“)
3. Standortauswahl für den Standortvergleich
4. Standortvergleich.

Die Definition der Ausschluß– und Einschränkungskriterien erfolgte unter Beachtung der Anforderungen der TA Siedlungsabfall und der landesplanerischen

schen Vorgaben des vorläufigen Abfallentsorgungsplanes.

## Geologische Barriere

Die TA Siedlungsabfall erhebt von einem als geologische Barriere dienenden Untergrund folgende Anforderungen:

- natürlich anstehendes schwach durchlässiges Locker- bzw. Festgestein nach DIN 18 130 (dies entspricht einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f = 10^{-8} \text{ m/s} - 10^{-6} \text{ m/s}$ )
- hohes Schadstoffrückhaltepotential
- flächige Verbreitung.

Kann bei der Standortsuche kein geologisch geeigneter Standort gefunden werden, gestattet die TA Siedlungsabfall, daß die geologische Barriere durch den Einbau einer 3 m mächtigen homogenen Ausgleichsschicht mit  $k_f \leq 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  ersetzt werden kann.

Die Anforderungen an die geologische Barriere können in Brandenburg nur von an der Oberfläche anstehenden glazialen Geschiebemergelhorizonten erfüllt werden. Solchen Standorten ist bei der Deponiestandortsuche deshalb der Vorzug zu geben.

Die Barrierewirkung dieses Geschiebemergels kann aber durch im Rahmen der Standortsuche schwer erkundbare Inhomogenitäten oder Lagerungsstörungen eingeschränkt werden. Es empfiehlt sich daher, von „geologisch geeigneteren“ anstatt von „geologisch geeigneten“ Standorten zu sprechen.

Die geologischen Verhältnisse in Brandenburg ließen von vornherein erwarten, daß in einigen Regionen nur Standorte mit sehr geringer geologischer Eignung zu finden sind bzw. daß geologisch geeignete Deponiestandorte in geschützten Gebieten liegen und deshalb nach der Negativkartierung aus der weiteren Betrachtung entfallen müssen.

Unter diesen Umständen wurde nach Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall vor dem Hintergrund bereits stattgefundener Standortsuchverfahren die Diskussion um die Frage geführt, welche Wertigkeit dem Vorhandensein einer geologischen Barriere bei der Deponiestandortsuche zukommen soll.

Das Ergebnis dieser Diskussion läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- In Übereinstimmung mit dem Text der TA Siedlungsabfall ist das Kriterium „Eignung als geologische“ Barriere nicht als Ausschluß-, sondern als Einschränkung- oder auch Rückstellungskriterium zu betrachten.
- Es ist bei der Standortsuche mit der ihm gebührenden Wichtung zu beachten. Nach der TA Siedlungsabfall muß eine wirksame geologische Barriere maßgebend für die Standortauswahl sein. Der geeignetste Standort ist unter Würdigung aller Kriterien auszuwählen.

- Die Einbeziehung geologisch wenig oder nicht geeigneter Standorte in den Standortvergleich ist statthaft, wenn im Suchgebiet nach der Negativkartierung kein geologisch geeigneter Standort vorhanden ist oder wenn zu vermuten ist, daß durch die Gesamtabwägung aller Kriterien geologisch ungeeignete Standorte mit geologisch geeigneteren konkurrieren können.

Eine Besonderheit der Standortsuche im Süden des Landes ergibt sich durch das Vorhandensein großer durch den Braunkohlenbergbau devastierter Flächen. Diese drängen sich den entsorgungspflichtigen Körperschaften als Standorte für Deponien förmlich auf, da Aspekte des Natur- und Immissions-schutzes (und z.Z. auch noch des Gewässerschutzes) hier kaum eine Rolle spielen.

Dem Landesumweltamt sind Planungen für die Erweiterung einer bestehenden Hausmülldeponie, die Errichtung von drei neuen Kreisdeponien und einer Sonderabfalldeponie auf Kippenstandorten bekannt.

Das Landesumweltamt als Genehmigungsbehörde hatte gewisse Bedenken gegen diese Vorhaben hinsichtlich der Eignung als Baugrund. Es ist zu erwarten, daß auf den regellos hergestellten Kippenböden Setzungen in Größenordnungen auftreten, die zur Zerstörung der Basisabdichtung und der Sickerwasserfassungen führen können. Des weiteren ist die Gefährdung durch Verflüssigungserscheinungen der Kippen zu beachten.

Der gegenwärtige Erkenntnisstand zu dieser Problematik ist der, daß die technische Machbarkeit solcher Deponievorhaben grundsätzlich bejaht wird, die geotechnischen Untersuchungen des Kippenstandortes und die erforderlichen Maßnahmen zur Baugrundverbesserung jedoch für den Vorhabensträger erhebliche Mehraufwendungen verursachen.

Diese Mehraufwendungen entstehen durch

- die Ermittlung der zu erwartenden Setzungen unter Berücksichtigung der durch den Depo-niekörper verursachten Auflast (die erheblich über den Setzungen eines gewachsenen Baugrundes liegen)
- baugrundverbessernde Maßnahmen (Verdichtung, Verfestigung), die im Ergebnis der Gegenüberstellung der zu erwartenden und der – für die Funktionsfähigkeit des Basisabdichtungs- und Sickerwasserfassungssystems – zulässigen Setzungen erforderlichenfalls zu ergreifen sind
- den durch das Fehlen der geologischen Barriere bedingten Einbau einer zusätzlichen technischen Barriere, die zugleich die Funktion eines stabilisierenden Auflagers übernimmt.

Die grundsätzliche Zustimmung des Landesumweltamtes zur Errichtung von Abfalldeponien auf Kippenstandorten basiert auf Gutachten, die von Planungsträgern in Auftrag gegeben wurden und auf den Ergebnissen von Untersuchungen in Sachsen.

Der Arbeitskreis „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ hat den Entwurf einer Empfehlung für die Erkundung von Kippenstandorten vorgelegt. Eine Arbeitsgruppe des Landesumweltamtes Brandenburg hat ein Merkblatt zu dieser Thematik erarbeitet, das ebenfalls im Entwurf vorliegt.

## **Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme**

Der Aufbau der Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme in Deponien ist im Punkt 10.4.1 der TA Siedlungsabfall genau vorgeschrieben. Es ist aber festzustellen, daß daneben zahlreiche andere Varianten bzw. Technologien für die Abdichtung entwickelt und vorgestellt wurden. Auch in Brandenburg wurden dem Landesumweltamt Planungen für Basisabdichtungssysteme vorgestellt, die von dem in der TA Siedlungsabfall vorgeschriebenen System abweichen. Diese Abweichungen betreffen sowohl den grundsätzlichen Aufbau als auch die verwendeten Materialien.

Für die Genehmigungsbehörde erhebt sich die Frage, inwiefern solche Planungslösungen genehmigungsfähig sind. Zwar werden „gleichwertige Systeme“ zugelassen, doch läßt die TA Siedlungsabfall offen, wie und nach welchen Kriterien die Gleichwertigkeit festzustellen ist. Mit diesem Problembereich beschäftigt sich ein Arbeitskreis „Grundsätze der Deponietechnik und Sicherung von Altlasten“ unter Federführung des Deutschen Instituts für Bautechnik.

Es ist nicht damit zu rechnen, daß von der TA Siedlungsabfall abweichende Basisabdichtungssysteme für neu zu errichtende Deponien zugelassen werden, bevor dieser Arbeitskreis Ergebnisse seiner Arbeit vorlegen kann bzw. die Gleichwertigkeit für Technologien im Einzelfall geprüft hat.

Für Brandenburg kann die Zulassung alternativer Basisabdichtungssysteme dadurch besonderes Interesse erlangen, da für die Herstellung der mineralischen Dichtungsschicht geeignete Materialien nur in geringem Umfang zur Verfügung stehen.

## **Sicherung und Rekultivierung geschlossener Deponien**

Eine Erfassung ergab, daß in Brandenburg etwa 5.000 Abfallablagerungen (die einer Fläche von ca. 3.060 ha entsprechen) vorhanden sind. Das Spektrum reicht dabei von der Dorf Müllkippe mit 0,1 ha und 1.000 m<sup>3</sup> Inhalt bis zu solchen Anlagen wie der Deponie Schöneiche mit 140 ha und zur Zeit 15 Mio m<sup>3</sup>. Die überwiegende Anzahl ist jedoch eher der Kategorie „Dorf Müllkippe“ zuzuordnen.

Alle diese Kippen müssen zu einem geordneten Abschluß geführt werden. Die Größenordnungen zeigen, daß Vorstellungen, jede Dorf Müllkippe mit

einer Kombinationsabdichtung nach TA Siedlungsabfall zu überziehen, unsinnig und unrealistisch sind. Die zu ergreifenden Sicherungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen sind vielmehr im Einzelfall festzulegen und haben sich am Gefährdungspotential zu orientieren.

Das Landesumweltamt Brandenburg hat dazu eine im Entwurf vorliegende Richtlinie erarbeitet, dessen Erläuterung Gegenstand eines Vortrages für sich sein könnte.

Es erweist sich als hilfreich, Abfallablagerungen bestimmten Gefährdungskategorien zuzuordnen und für jede Kategorie Anforderungen an die Sicherungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen zu formulieren.

Die Zuordnungskriterien sind

- Art der abgelagerten Abfälle
- Abfallvolumen
- hydrogeologische Verhältnisse am Standort
- Lage zu Schutz-, insbesondere Trinkwasserschutzgebieten.

Im einfachsten Falle (bei geringem Gefährdungspotential) wird das Aufbringen einer kulturfähigen Schicht und die Bepflanzung ausreichend sein. Bei nachgewiesenem hohem Gefährdungspotential ist der Einbau einer Kombinationsabdichtung nach TA Siedlungsabfall vorzunehmen, nachdem die Setzungen abgeklungen sind, und ggf. weitere Einrichtungen, wie Schlitzwände z.B., vorzusehen.

## **Literatur**

STIEF, K.: Das Multibarrierekonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien

*Dr.-Ing. Ulrich Stock  
Landesumweltamt Brandenburg  
Abteilung Abfallwirtschaft, Altlasten und  
Bodenschutz  
Leiter des Referates Abfallablagerung*

# Setzungen und Sackungen unter Deponien auf Kippen

Wolfgang Förster, Institut für Geotechnik  
der TU Bergakademie Freiberg

## 1. Problemstellung

Der Bau von Deponien auf Kippen bringt in erster Linie auf Grund der auf Deponien zu erwartenden großen Setzungen und der Unstetigkeiten in der Ableitung der Setzungsmulde bedenkenswerte Probleme mit sich. Trotz dieser Besonderheiten der Kippen als Baugrund müssen nach Vorschriften zu stellende Anforderungen erfüllt werden. Es ist ein ausreichender Abstand zwischen dem Deponiegut und dem späteren Grundwasserspiegel einzuhalten; das Mindestgefälle der Dränagen muß garantiert werden, es darf nicht zur Bildung von Wassersäcken in den Dränagen kommen und die zulässige Beanspruchung technischer Elemente, dazu gehören Dichtungen, Rohre, evtl. Tunnel, darf nicht überschritten werden. Diese Forderungen gelten sowohl für den Endzustand als auch für Zwischenzustände (Bild 1).

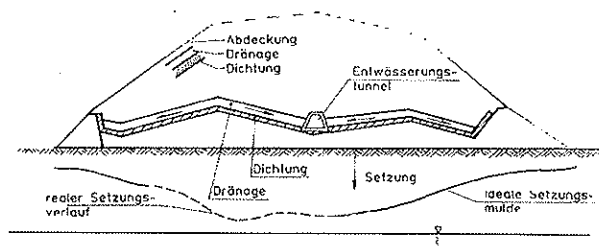


Bild 1 Prinzip des konstruktiven Aufbaues einer Deponie - stark vereinfacht

Um ihnen zu entsprechen, gibt es verschiedene Varianten.

Es könnten zum ersten Setzungen weitestgehend verhindert werden. Die Kippen als Baugrund müßten dann eine wesentliche Vergütung erfahren. Das Vorgehen ist sehr kostenintensiv, und die Konsequenz könnte sein, daß der Bau von Deponien auf Kippen fast ausgeschlossen ist.

Der zweite und bessere Weg ist der, sich ausreichend genaue Voraussagen über wahrscheinliche Verformungen zu verschaffen und diesen angepaßt konstruktive Vorkehrungen zu treffen, d.h., die Dränagen ausreichend zu überhöhen und solche Baustoffe für Dichtung, Dränagerohre u.a. auszuwählen, die den auftretenden Beanspruchungen gewachsen sind.

## 2. Besonderheiten des Kippenbaugrundes

Die erwähnten großen Setzungen und Abweichungen von einer Monotonie resultieren aus den spezifischen Eigenschaften der Kippen. Die Kippen sind inhomogen, d.h., ihre Eigenschaften verändern sich von Ort zu Ort. Die Ursachen dafür liegen in der Ortsveränderlichkeit geologischer Horizonte, in der Veränderung der Zusammensetzung des verstärzten Lockergesteinsgemisches und in daraus resultierenden Gefügeunterschieden (Einzelkornggefüge, Makrogefüge) sowie schließlich in der Technologie des Verkippens. Absetzer und Abraumförderbrücken werden gerückt. Es entstehen in der Kippe Rippen und Täler. Die Absetzer werden darüber hinaus geschwenkt. Bei Spülkippen erfolgt die Einspülung punktweise. Das Verspülen selbst bewirkt eine Klassierung. Hinzu kommt andererseits aber auch eine bewußte Steuerung der Materialverteilung. Der Bergmann bemüht sich um einen sicheren Drehpunktbereich, er bemüht sich um eine sichere Basis für Brückensützen und Arbeitsebenen.

Als Folge des Verkippens kommt es weiterhin zu einer lockeren Ablagerung. Dichteunterschiede durch unterschiedlichen Energieeintrag beim Verstoß sind gering. Zum Teil rollen Klumpen bindigeren Materials von der Kippe ab. Die lockere Lagerung wird durch Kapillarspannungen stabilisiert. Dieser Gleichgewichtszustand wird vor allem durch Schub wieder zerstört.

Der Nachweis der lockeren Lagerung und der Inhomogenität der Kippe kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Angewandt werden u.a. Drucksondierungen. Zur Zeit fehlt noch eine ausgefeilte geostatistische Aufbereitung der Ergebnisse, die die Sondierungen zueinander korreliert und einen genaueren quantitativen Einblick in den Aufbau der Kippe ermöglicht.

Das sicherste Verfahren sowohl zum Nachweis der lockeren Lagerung als auch der Inhomogenität sind Probebelastungen, die meßtechnisch umfangreich überwacht werden, aus denen dann auch Berechnungsparameter (Steifemodulen) abgeleitet werden können.

In geringem Maße werden geophysikalische Verfahren in verschiedener Art eingesetzt.



### 3. Setzen von Kippen

Wenn wir über die Setzungen von Kippen sprechen, haben wir in der Hauptsache drei Komponenten zu berücksichtigen. Das sind

- Eigensetzungen,
- Sackungen und
- Setzungen unter Last.

#### 3.1. Eigensetzungen

Die Ursachen der Eigensetzungen, einer Verdichtung unter Übergang lockerer Lagerung in eine dichtere, sind Störungen, die Scherspannungen erzeugen. Dazu könnte z.B. auch einsickerendes Niederschlagswasser gehören. Andere bisher noch weniger erkundete Ursachen sind denkbar. Die Größe dieser Eigensetzung ist von der Kippenhöhe und vom Abstand eines betrachteten Kippenpunktes zum Böschungsrand abhängig. Der Einflußbereich der Böschung kann bis zum 15fachen der Böschungshöhe reichen. Es gibt weitere Komponenten - nämlich Einfallen des Liegenden, Tagebaurestlöcher u.a. -, die den Ablauf der Setzungen beschleunigen.

Normalerweise darf man annehmen, daß die Eigensetzungen im mitteldeutschen Raum und in der Lausitz nach 6 Jahren abgeklungen sind. Im rheinischen Revier könnte das zwischen 9 bis 16 Jahren dauern.

Die Größe der Eigensetzungen liegt im Mittel bei 0,5% bis 1,5% der Kippenhöhe. In der Lausitz sind Endwerte zwischen 1,5% und 2% gemessen worden, in Mitteldeutschland zwischen 0,8% und 1,2% und im Rheinland zwischen 0,8% und 2,3% der Kippenhöhen. Danach verbleibt immer noch eine Auflockerung, die etwa 1% bis 3% der Kippenhöhe ausmacht.

#### 3.2. Sackungen

Wie bei den Eigensetzungen treten auch bei den, was wir als Sackungen bezeichnen, Setzungen der Geländeoberfläche ohne erkennbaren äußeren Anlaß ein. Auch die Sackung ist die Folge einer Störung des Gefügegenleichgewichts. Es kommt zu einer Umlagerung der Körner und zum Aufbau eines neuen Gefüges, das dichter ist. Anlaß ist der Anstieg des Grundwassers. Durch das Wasser werden Kapillarspannungen abgebaut, mögliche Verkittungen der Körner werden erweicht (Verminderung der Scherfestigkeit), und die deviatorische Komponente des Spannungszustandes wird vergrößert. Auftrieb und Strömungsvorgänge können weiterhin beteiligt sein. Im allgemeinen verläuft der Sackungsprozeß dem Grundwasseranstieg folgend großräumig kontinuierlich.

Es wurden aber auch besonders große, plötzliche, lokal begrenzte Geländeabsackungen beobachtet. Hierzu lassen sich nur Vermutungen äußern. Ist ein

Restloch in der Nähe, wäre es denkbar, daß im Gefolge einer Verflüssigung eine Materialverlagerung horizontal in Richtung des Restlochs eintritt. Denkbar wären auch sehr große Dichteinhomogenitäten. Sehr ungleichmäßige Sackungsvorgänge könnten dann zu Hohlraumbildung führen, die danach Hohlraumbrüche und Verflüssigungen mit schockartigen, lokalen Einsenkungen zur Folge hätten. So etwas muß für einen Baugrund ausreichend sicher ausgeschlossen werden können.

Von Interesse ist natürlich die Größe auftretender Sackungen, das Sackungsmaß. Leider gibt es nur wenige Messungen der Sackungen von Kippen. Man nimmt an, daß schwachbindige Kippen mit einem Wassergehalt von 0,15 nahezu keine Sackungen zeigen. Diese Hypothese bedarf aber weiterer Prüfung. Üblicherweise werden für Sackungen 1% bis 2% der überfluteten Kippenhöhe genannt. In Ausnahmefällen werden auch lokale Sackungen von 4% beobachtet. Darüber hinaus scheinen die Setzungen unter Last (siehe Abschnitt 3.3) und die Sackungen in ihrer Summe etwa zum gleichen Gesamtsetzungswert zu führen.

Die Größe der Sackungen hängt darüber hinaus erheblich vom Spannungszustand ab. Es sacken vor allem oberflächennahe Bereiche. Je tiefer der Grundwasserspiegel bleibt, um so geringere Bedeutung haben Sackungen. Wenn die Spannungen einen kri-

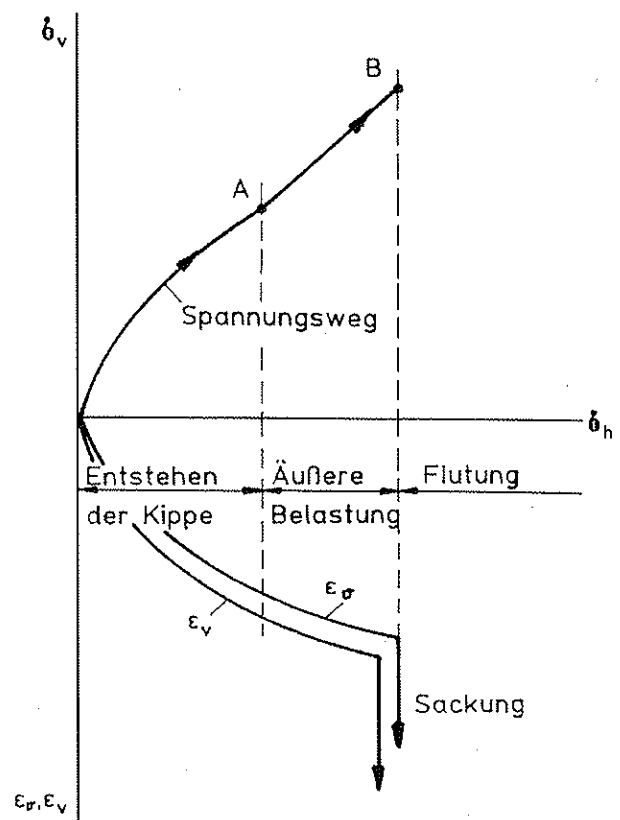


Bild 2

Simulation der Spannungsgeschichte im Triaxialgerät ( $\sigma_v$  - vertikale Spannung;  $\sigma_h$  - horizontale Spannung;  $\epsilon_v$  - Vertikalstauchung;  $\epsilon_v$  - Volumenänderung)

tischen Wert überschreiten, sind kaum noch Sackungen zu beobachten.

Zur Problematik der Sackungen gibt es eine Reihe von Arbeiten, die bisher vor allem auf Ergebnissen von Laborversuchen aufbauen. Laborativ wird das Sackungsmaß normalerweise im Ödometerversuch bestimmt. Das Material ist einzubauen, zu belasten, danach zu fluten und der Setzungsbetrag zu messen.

Im Triaxialgerät ist darüber hinaus auch eine Simulation der Spannungsvorgeschichte möglich (Bild 2).

Solange man sich allein auf die Verschiebungen der Oberfläche beschränkt, müßten Untersuchungen im Feld vom Markscheider durchgeführt werden. Spezielle Meßeinrichtungen unter Verwendung nachgiebiger vertikaler Rohre lassen auch eine Deformationsmessung im Inneren der Kippe zu (Bild 3).

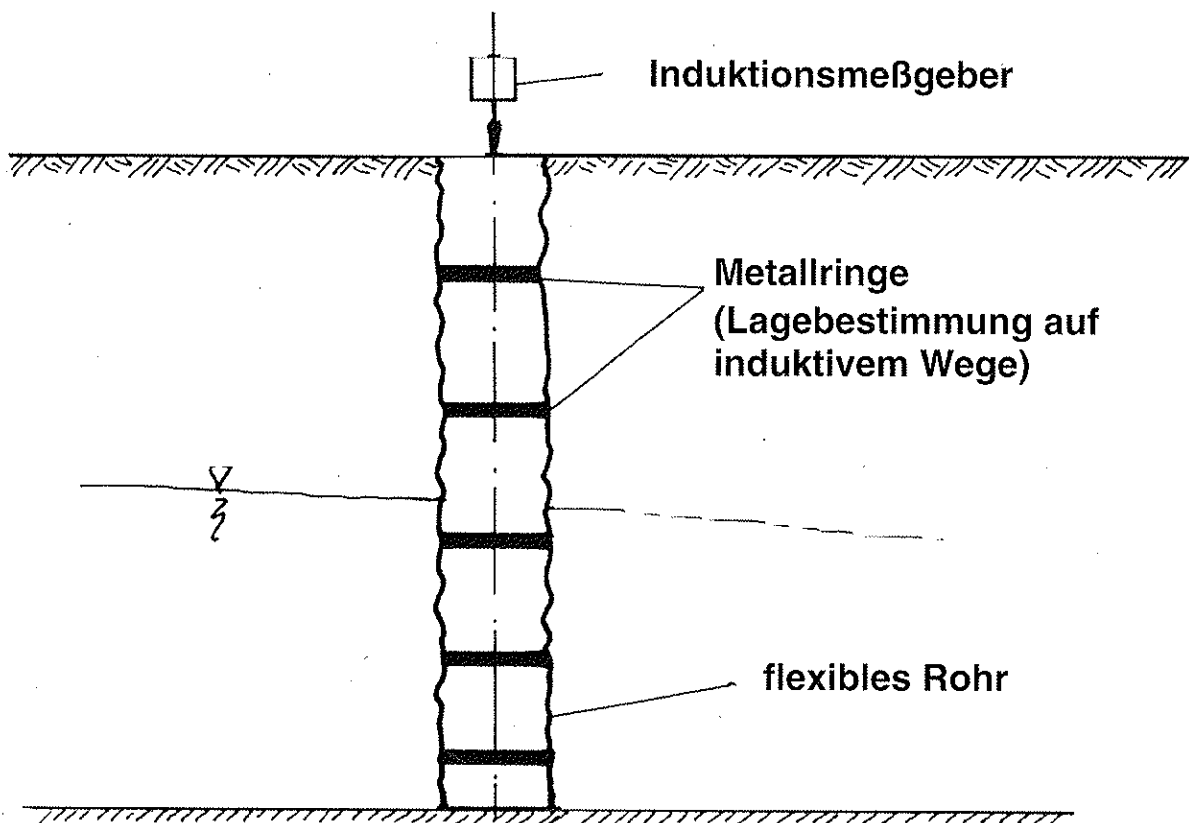


Bild 3 Deformationsmessungen im Kippeninneren

### 3.3. Setzungen unter Last der Deponie

Die Berechnung der Setzungen kann prinzipiell nach bekannten Verfahren durchgeführt werden. Die spezielle Belastungsfigur durch die Deponie wirft das Problem des korrekten Beachtens der Lastverteilung auf. Das ist unter Nutzung geeigneter Programme und ausreichend schnellen Rechnern möglich. Bisher liegen kaum Bemühungen vor, die Steifigkeit des Deponiekörpers, die zu einer Umlagerung der Sohlspannungen führen könnte, zu berücksichtigen. Sie dürfte einen setzungsausgleichenden Einfluß haben. Die größere Schwierigkeit besteht in der Wahl eines zutreffenden Steifemoduls, eventuell als Funktion des Ortes.

Diesbezüglich verlässliches ist eigentlich nur -wie bereits erwähnt- durch Rückrechnung aus Probeschüttungen zu gewinnen. Eine solche Probeschüttung wurde bisher neben einer zweiten in Espenhain auf

der Kippe des Tagebaues Jänschwalde durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen (Bild 4) lassen erkennen, daß der Setzungsverlauf nicht monoton ist und daß eine Idealsetzungsmulde (theoretische Setzungsmulde) durch ein „Rauschen“ (Störungen) überlagert ist. Bedeutsam für die konstruktiven Elemente sind die Krümmungen der Setzungsmulde, die zu Rissen in Dichtungen, Rohren usw. führen könnten (Bild 5). Für den Krümmungsradius gilt die Gleichung

$$R \approx 1/s''.$$

$s''$  ist numerisch aus (Bild 6)

$$s'' = \frac{1}{(\Delta x)^2} (s(x + \Delta x) - 2 \cdot s(x) + s(x - \Delta x))$$

zu errechnen. Das Ergebnis ist offensichtlich von der Wahl der Stützweite  $\Delta x$  abhängig. Sie muß nach der

# Längsprofil I<sub>3</sub>

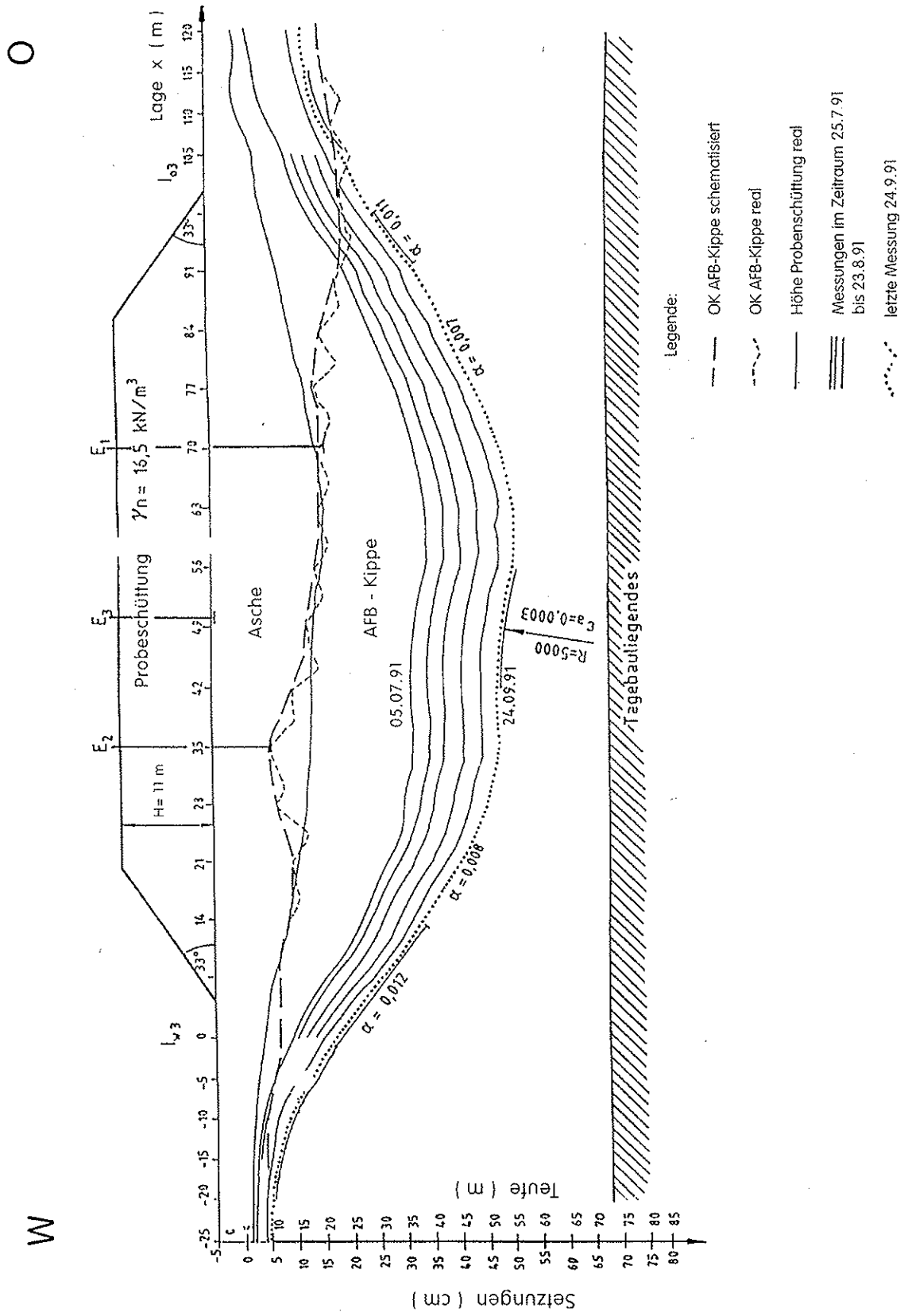


Bild 4 Probelastung auf der Kippe des Tagebaues Jänschwalde im Längsprofil I<sub>3</sub>

# Versuchsschüttung Jänschwalde - QMS - 1

## Gemessene Krümmungsradien (km)

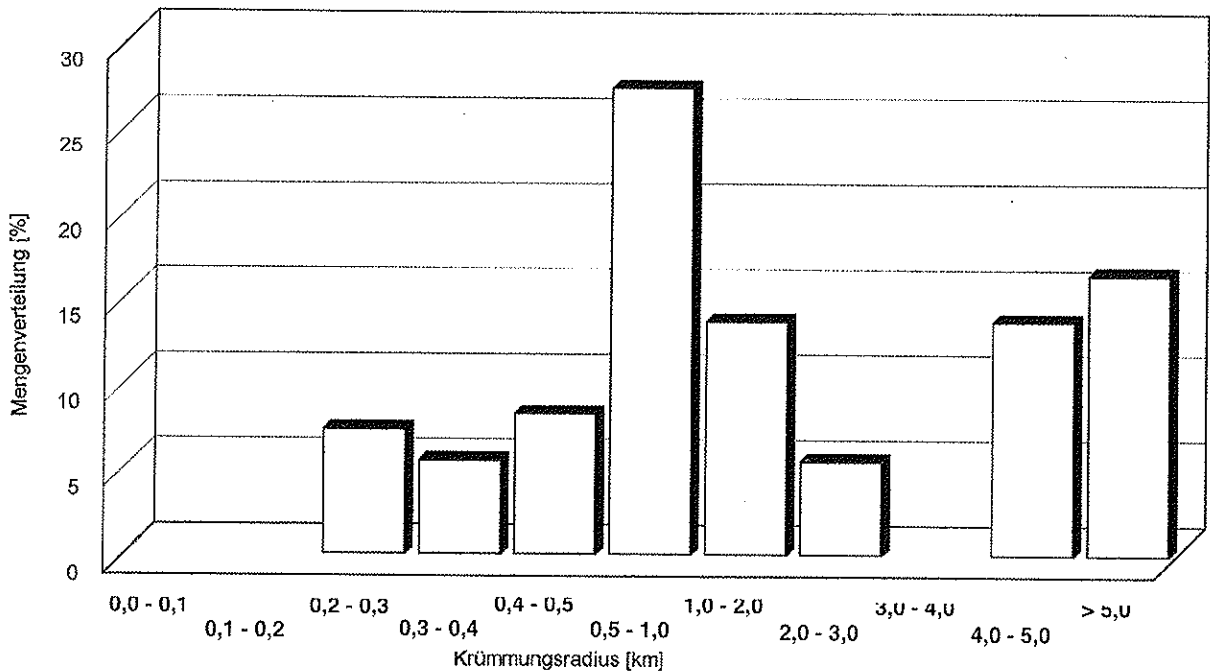


Bild 5 Verteilung der Krümmungsradien unter der Versuchsschüttung des Tagebaues Jänschwalde - Querprofil 1

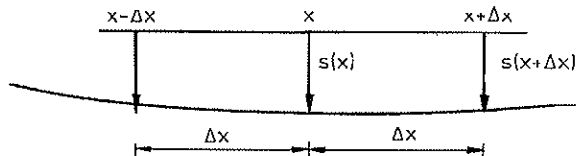


Bild 6 Numerische Ermittlung von s''

Steifigkeit des betrachteten Elements festgelegt werden. Die Ergebnisse der Probebelastung sind als Modellversuch für die Deponie als Prototyp zu werten. Dabei ist zu bedenken, daß der errechnete Steifemodul als konstante Größe für die Deponie sicher etwas höher ist als der aus der Probebelastung bestimmte. Das liegt daran, daß die Spannung unter der Deponie größer ist unter der Probebelastung ist. Es wird die mit einem konstanten Steifemodul berechnete Setzung zu groß. Deshalb ist es zweckmäßig, den Steifemodul als spannungsabhängige Größe gemäß

$$E_s = E_s(\sigma_v) = \nu \left( \frac{\sigma_v}{p_a} \right)$$

anzusetzen. Eine Extrapolation über den Spannungsbereich hinaus, für den  $E_s$  berechnet wurde, erscheint zumindest gerechtfertigt. Bezüglich der Krümmungen ist als sicher anzunehmen, daß die höhere Deponiebelastung vergleichbar wirkt. Die Setzungsmulde nähert sich in stärkerem Maße der Ideallinie an, und die daraus rechnerisch ermittelten Krümmungen können maßgebend werden.

### 3.4. Setzungsprognosen

Normalerweise gehen wir mit unserer Deponie so spät auf die Kippe, daß die Eigensetzungen bei Baubeginn abgeklungen sein dürften. Eine genaue Voraussage der Setzungen, nämlich der Summe aus Sackung und Lastsetzung, als Funktion des Ortes und der Zeit in der Form

$$s = s(x, y, t)$$

ist nur bei sorgfältiger Arbeit möglich und gelingt absolut zutreffend gar nicht. Die Ursache liegt in der Komplexität des Problems:

- der Grundwasseranstieg als Funktion der Zeit ist unsicher
- der Deponiefortschritt als Funktion der Zeit ist ebenso wenig sicher vorhersagbar
- der Sackungsverlauf aber ist abhängig von den eben genannten Faktoren
- und auch der Setzungsverlauf ist abhängig vom Grundwasseranstieg, noch stärker natürlich vom Deponiefortschritt.

Es ist unter diesen Umständen eigentlich nur möglich, auf der sicheren Seite liegende Abschätzungen vorzunehmen und gegebenenfalls -falls keine genaueren Angaben existieren- Kombinationen aus Varianten für Grundwasserbestand und Deponiefortschritt zu wählen (siehe folgende Grafik).

Deponiefortschritt	Grundwasserstand
leer	in Höhe des Liegenden
halb voll	halbe Endhöhe
voll	Endhöhe

Darüber hinaus sollte mit dem Aufbau der Deponie ein ständiges Meßprogramm anlaufen, das die Grundwasserstandsentwicklung verfolgt, das aber auch die Setzungen erfaßt. Diese gemessenen Setzungen sind Voraussetzung für eine ständige Verbesserung der Eingangsparameter und damit für die sichere Voraussage von Deformationen nachfolgender Deponieabschnitte.

Für Hausmülldeponien erscheint dieses Vorgehen durchaus vertretbar; für Sondermülldeponien ist das Risiko zu hoch. Hier wird man sicherlich Maßnahmen zur Setzungsminderung ergreifen.

#### 4. Wege zur Vergütung des Baugrundes

Wenn eine Baugrundverbesserung gewählt werden muß, sind die Größe der zu vergütenden Fläche und wohl auch die Größe der erforderlichen Vergütungstiefe zu bedenken. Man muß nach einem angepaßten, wirtschaftlichen Verfahren suchen. Bei der Wahl von Deponiestandorten sind solche zu bevorzugen, bei denen nur eine Abraumförderbrückenkippe vorliegt. Eine Vergütung über die Gesamtkippenhöhe ist kaum möglich.

Bei Vorliegen einer besonders lockeren, inhomogenen oberen Schicht (Absetzerkippe) könnte man an **Aus- und Wiedereinbau unter Verdichtung** (einmal vorgeschlagen) denken. Das Verfahren ist sehr aufwendig. Alles andere dürfte wirtschaftlicher sein.

Ein weiteres Verfahren wäre der Einsatz eines **Tiefenrüttlers** (Bild 7). Bei ihm läuft während des Absenkens in den Untergrund eine Unwucht um eine vertikale Achse. Die Wirkung wird durch Spülung und eine statische Zusatzlast erhöht. Es kommt dadurch zu einer Störung des Gefüges, einer Verflüssigung und einer Umlagerung der Körner. Die Volumenminderung wird durch die Zugabe grobkörniger Materialien ausgeglichen. Das Verfahren ist in reinem Sand anwendbar. Die bisher erreichte Tiefe ist 25,0 m, wobei die oberen 2,0 m nicht verdichtbar sind. Der erzielte Verdichtungserfolg ist durch einen Dichteindex  $D = 0,8$  charakterisiert.

Beim **Rüttelstopfverfahren** (Bild 8) wird der Rüttler wie bei der Tiefenrüttlung nach unten gebracht. Beim Ziehen werden Füllstoffe durch Rohre mit Druck von unten nach oben zugegeben. Mit diesem Verfahren wurde bisher eine wirtschaftliche Tiefe von 10 m erreicht.

Beide Verfahren (besonders die Tiefenrüttlung) könnten mit der **dynamischen Intensivverdichtung** (Bild 9) gekoppelt werden. Die Verdichtung wird hier durch ein aus größerer Höhe (bis 40,0 m) fallendes Gewicht erreicht. Die Verdichtungswirkung beschränkt sich aber auf oberflächennahe Bereiche.

### TIEFENRÜTTLUNG

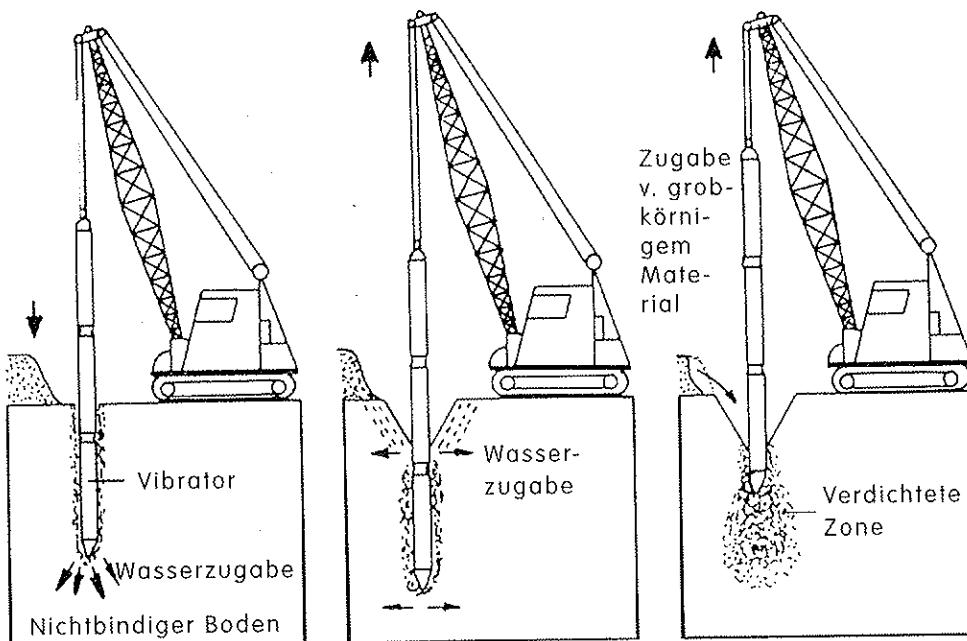
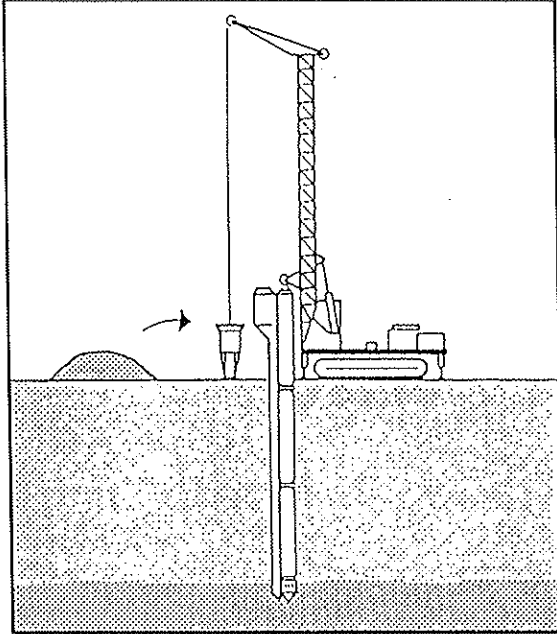


Bild 7 Tiefenrüttlung  
(Quelle: Merkblatt für Untergrundverbesserung durch Tiefenrüttler)

## Phase 1

Eindringen des Rüttlers,  
Verdichten und Verdrängen  
des Bodens



## Phase 2

Ziehen des Rüttlers,  
Zugabe von nichtbindigem Erdstoff  
und Verdichten

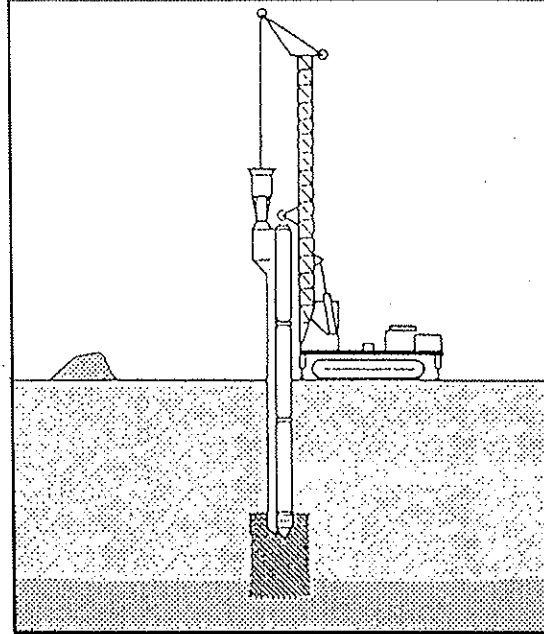
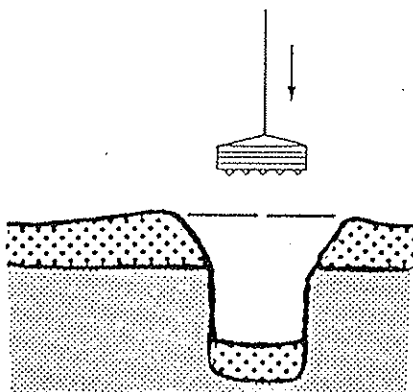


Bild 8 Rüttelstopfverdichtung (VIBRO)  
nach dem Verfahren der Fa. Keller Grundbau GmbH  
(Quelle: Placzek und Nendza, Baugrundtagung Dresden 1992)

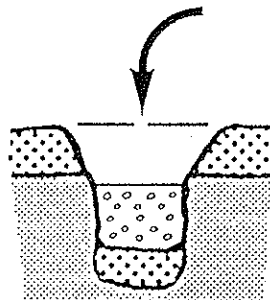
## Phase 1

Herstellen des Arbeits-  
planums und wieder-  
holtes Abwerfen der  
Fallmasse auf einen  
Verdichtungspunkt,  
Verdichten und Verdrängen  
des Bodens



## Phase 2

Auffüllen des  
Schlagtrichters  
mit nichtbindigem  
Erdstoff



## Phase 3

Wiederholung des  
Verdichtungs Vorganges  
bei weiterer Zugabe  
von nichtbindigem  
Erdstoff bis zum  
tragfähigen Untergrund  
und abschließender  
Oberflächenverdichtung

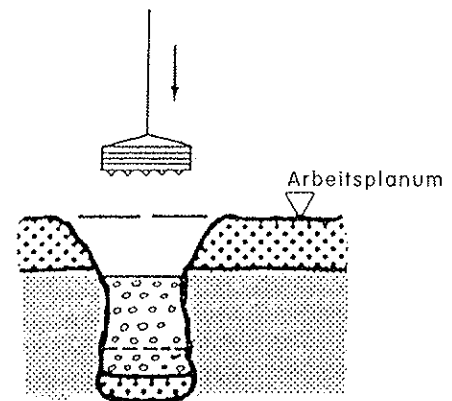


Bild 9 Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) nach dem Verfahren der Fa. DYNIV GmbH  
(Quelle: Placzek und Nendza, Baugrundtagung Dresden 1992)

In der Lausitzer Braunkohle AG liegen große Erfahrungen mit der **Verdichtung durch Sprengen** vor. Durch ein Initial kommt es zu einer Verflüssigung und danach zu einer Neuordnung des Gefüges und einer Auflast. Das Verfahren ist sehr wirtschaftlich, aber nur im wassergesättigten Bereich anwendbar.

Schließlich wären noch die **hydraulische Verdichtung** und die **Vorbelastung** zu nennen. Bei der hydraulischen Verdichtung läßt man größere Mengen Wasser versickern. Man nimmt dadurch quasi Sackungen vorweg. Die besten Erfolge bringt sicherlich eine Vorbelastung. Dabei wird auf den Baugrund eine Schüttung aufgebracht, die eine Belastung möglichst in Größe der späteren Baugrundbelastung erzeugt und nach ausreichender Einwirkungszeit wieder abgeräumt wird. Der Aufwand ist selten und höchstens bei geringen Flächen vertretbar.

Zwischen Rüttelstopfverdichtung und dynamischer Intensivverdichtung liegt ein Vergleich vor. Die Rüttelstopfverdichtung erreicht größere Gleichmäßigkeit; die dynamische Intensivverdichtung ist wirtschaftlicher.

Alle Verfahren sind bisher nur auf begrenzte Tiefe anwendbar.

## 5. Zusammenfassung

In dem Vortrag wird der Versuch unternommen, die Besonderheit der Kippen als Standort von Deponien zu verdeutlichen. Es werden quantitative Angaben zu auftretenden Verformungen gemacht und Verfahren zu ihrer genaueren Ermittlung angegeben. Es gibt Fälle, bei denen der Bau von Deponien auf Kippen ohne weitere Vergütung des Untergrundes zu risikobehaftet erscheint (Sondermülldeponien). Mögliche Vergütungsverfahren werden diskutiert.

### Literatur

Literaturrecherche zum Forschungsthema Tagebaukippen als Baugrund; TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Abteilung Bodenmechanik, 1992 (unveröffentlicht)

BIUG GmbH Freiberg: Geotechnisches Gutachten zur REA-Deponie Jänschwalde; Freiberg, 1992 (unveröffentlicht)

BENKEN, D.: Bauen auf Kippen; Diplomarbeit, Bergakademie Freiberg, 1992 (unveröffentlicht)

BENSCH, P.: Zur Bestimmung von Deformations- und Scherfestigkeitsparametern von Kippenböden unter Berücksichtigung ihrer Belastungsgeschichte und des eingetretenen Grades der Wassersättigung; Diplomarbeit, Bergakademie Freiberg, 1992 (unveröffentlicht)

HALLBAUER, T.: Geotechnische Grundlagen für die Errichtung von Eisenbahnstrecken auf Kippen des Braunkohlenbergbaus unter besonderer Berücksichtigung des Eigensetzungsverhaltens; Dissertation, HfV Dresden, 1981 (unveröffentlicht)

ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G.: Interpretation of cone penetration tests, Part I: Sand, Part II: Clay; Canadian Geotechnical Journal, 20(1983), p. 718 - 733

CHARLES, J.A.; BURFORD, D.: Settlement and Groundwater in opencast mining backfills; Proceedings of the IX ECSMFE in Dublin, p. 289 - 292, A.A. Balkema, Rotterdam, 1987

FORMAZIN, J.: Bebauung von Kippen des Braunkohlentagebaus; Bauplanung-Bautechnik, 42(1988)11, p. 483 - 486

SACHSE, H.: Zum zeitlichen Verlauf von Sackungen nichtbindiger Kippen des Braunkohlenbergbaus; Bauplanung-Bautechnik, 42(1988)11, p. 483 - 486

SPARMANN, H.: Bauwerke auf Kippen des Braunkohlentagebaus; Bauplanung-Bautechnik, 42(1988)11, p. 491 - 493

SPERLING, G.; VOGEL, W.: Zur Bebauung von Tagebaukippen; Bauplanung-Bautechnik, 39(1985)10, p. 437 - 441

LÖSCHNER, J.: Dynamische Intensivverdichtung als Baugrundverbesserung auf Tagebaukippen; Bauplanung-Bautechnik, 41(1987)4, p. 147 - 150

SCHEFFLER, H.: Nutzung von Restlöchern auf Kippenflächen des Braunkohlenbergbaus für Deponiestandorte; Vortrag zum Seminar Neuzeitliche Deponietechnik, Bochum, 1990

DORSCHNER, E.: Setzungsverlauf der Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaus; Freiburger Forschungshefte, A 334, 1965, p. 121 - 142

GÖBEL, C.; HÄHNEL, K.: Setzungsverhalten einer Eisenbahnversuchsstrecke auf einer Tagebaukippe; Bauplanung-Bautechnik, 42(1988)11, 498 - 499

KEBLER, J.; FÖRSTER, W.: Sprengverdichtung zur Verbesserung von setzungsfließgefährdeten Kippen; Freiburger Forschungshefte A 819, Freiberg, 1992

PLACZEK, D.; NENDZA, H.: Rüttelstopfverdichtung und Dynamische Intensivverdichtung - Vergleichende Bewertung bei der Deponie Schlibeck; Vorträge der Baugrundtagung, Dresden, 1992

THOMPSON, J.; HOLDEN, J.M.W.; YILMAZ, M.: Compaction of opencast backfill beneath highways and associated developments; Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Rainbow (ed.), p. 293 - 312, A.A. Balkema, Rotterdam, 1990

KUNTSCHE, K.: Bodenmechanische Setzungsprognosen für Tagebaukippen; Braunkohle Tagebau-technik, 44(1992)1/2, p. 17 - 24

*Prof. Dr. habil. Wolfgang Förster  
Institut für Geotechnik  
der TU Bergakademie Freiberg*

# Möglichkeiten geophysikalischer Voruntersuchungen für Deponiestandorte (Geelektrik, Georadar)

Hellfried Petzold u.a., Lausitzer Braunkohle AG, Senftenberg

## 1. Zielstellung

Bei der Vorbereitung und Errichtung von Deponien müssen eine Vielzahl von Anforderungen und Bedingungen erfüllt werden. Eine sehr wichtige Grundlage ist dabei die Baugrunderkundung. Der geologische Aufbau und die hydrologischen Verhältnisse haben wesentlichen Einfluß auf die Auswahl des Deponiestandortes und die geotechnische Dimensionierung. Für derartige Langzeitbauwerke sollte eine geologisch-geophysikalische Detailerkundung durchgeführt werden. Durch die Kombination der

- flächendeckenden geophysikalischen Aussagen mit den
- punkthaften Ergebnissen aus Bohrungen und Sondierungen

wird insgesamt eine sehr hohe Aussagequalität und Repräsentanz der Erkundungsergebnisse erreicht.

## 2. Geophysikalische Meßverfahren

Die Auswahl des geeignetsten oberflächenphysikalischen Meßverfahrens hängt vom zu erkundenden Teufenbereich und den abzugrenzenden Bodenarten ab. Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz eines Meßverfahrens sind

- Unterschiede im bodenphysikalischen Parameter, wie z.B. Dichte, spezifischer Widerstand, Ausbreitungsgeschwindigkeit u.a. sowie
- günstige Verhältnisse zwischen Schichtmächtigkeiten und Teufenlagen (methodenspezifisch).

Nachfolgende Meßmethoden können für eine Deponievorerkundung eingesetzt werden. Von den *Potentialverfahren* eignen sich die Mikrogravimetrie (Hohlräume, Festgesteine), die Widerstandsgeoelektrik (Verbreitung bindiger Böden) sowie Eigenpotentialmessungen. Mit diesen Untersuchungen können schnell flächendeckende Aussagen zu Anomaliestrukturen gewonnen werden.

Mit den *Wellenverfahren* sind Verlauf und Teufenlage von Schichtgrenzen bestimmbar. Das betrifft vor allem die seismischen Varianten Refraktions- und oberflächennahe Reflexionsseismik für Festgestein und Grundwassererkundung. Von den effektiven elektromagnetischen Methoden bietet sich das Georadar zur Strukturerkundung an.

In den Flachbohrungen ist auch die *Bohrlochmessung* mit ihrem radiometrischen und elektrischen Meßkomplexen einzusetzen.

Sehr gute Ergebnisse erhält man bei der Kombination der Bohrlochmeßprinzipien mit der *Drucksondierung*. Nach entsprechender Eichung vor Ort können quantitative Aussagen zu den bodenphysikalischen Parametern (z.B. Dichte, Wassersättigung) ermittelt werden.

Ausführliche Informationen zu diesen und weiteren im Einzelfall einsetzbaren Verfahren sind der einschlägigen Fachliteratur zu entnehmen (z.B. MILITZER und WEBER, 1987; JACOBS u.a. 1987; VOGEL-SANG 1991, FORKMANN und PETZOLD, 1989).

## 3. Widerstandsgeoelektrik

Für die Erkundung der Verbreitung rolliger und bindiger Lockergesteine, wie in der Lausitz häufig der Fall, eignet sich besonders die Geoelektrik. Das Prinzip besteht in der Messung des scheinbaren spezifischen Widerstandes mit einer 4-Elektroden-Meßanordnung. Im Bild 1 ist das Meßprinzip schematisch dargestellt. Die erreichbare Wirkungstiefe hängt vom Elektrodenabstand ab und muß entsprechend der Aufgabenstellung festgelegt werden (z.B. 3, 5, 10 oder 20 m). Neben dieser horizontalen Widerstandsverteilung kann durch Widerstandssondierungen (schrittweise Erhöhung der Eindringtiefe an einen Punkt) der vertikale Schichtaufbau ermittelt werden. Der Teufenfehler beträgt hier ca. 10%. Vorteile dieser Verfahren sind vor allem geringe Kosten und schnelle Durchführbarkeit.

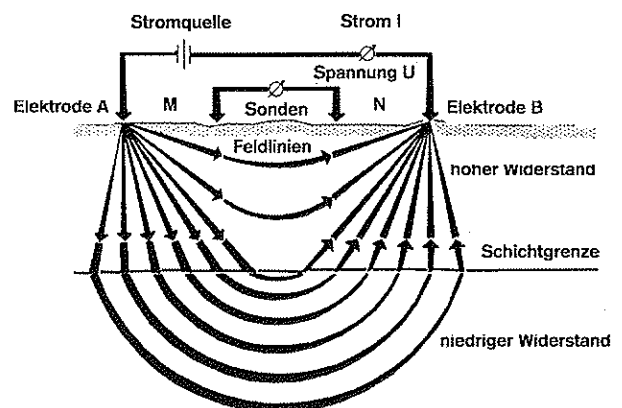


Bild 1: Meßprinzip der Widerstandsgeoelektrik



## 4. Georadar

Mittels einer Sende-Empfangs-Antenne werden die Laufzeiten hochfrequenter elektromagnetischer Wellen (Radarimpulse) bis zu den jeweiligen Suchobjekten gemessen. Bei der Ausbreitung der Radarwellen im Gestein erfolgt eine Intensitätsabnahme in Abhängigkeit von der Meßfrequenz und vom Laufweg (Begrenzung der Eindringtiefe). Entscheidend für das Reflexionsvermögen der Suchobjekte ist der Unterschied in den Dielektrizitätskonstanten. Diese hängt vom spezifischen Widerstand, Wassergehalt u.a. ab. Reflektierende Schichtgrenzen und lokale Einlagerungen bilden sich durch zwei- bis mehrphasige Signale in den Radargrammen ab, welche durch kontinuierliche Bewegung der Antenne im Profil entstehen (Bild 2). Das Meßsystem kann mobil oder

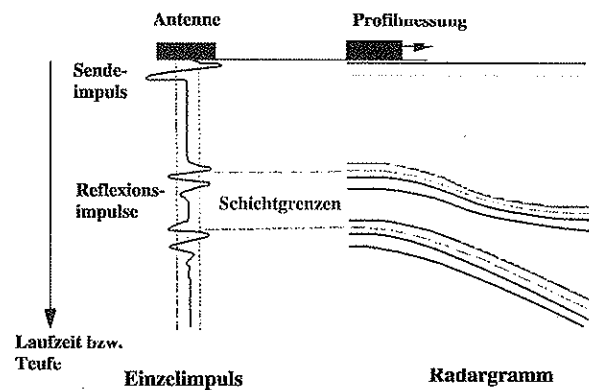


Bild 2: Meßprinzip des Georadar

manuell eingesetzt werden. Die unmittelbar während der Messung aufgezeichneten Radargramme sind vor Ort interpretierbar. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen geophysikalischen Verfahren. Mit dem Georadar können in Dezimetergenauigkeit Bodenartenwechsel, lokale Einlagerungen (Steine, Rohre u.a.) und Strukturen (Schichtgrenzen, Flanken, Mulden u.a.) erkundet werden. Ein Vergleich eines in 2 m Abstand aufgenommenen Profils mit dem gemessenen Radargramm ist in Bild 3 dargestellt.

Der Verlauf der Lehmschicht bildet sich deutlich im Radargramm ab. Im rolligen Lockergestein können Eindringtiefen bis 10 m erreicht werden. Mit zunehmendem bindigem Anteil verringert sich diese auf 1 - 2 m. Deshalb ist das Georadar in bindigen und feuchten Böden nicht oder nur zur lateralen Abgrenzung der bindigen Verbreitung einsetzbar.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der schnellen Durchführbarkeit, der Sofortaussagemöglichkeit und im hohen Auflösungsvermögen.

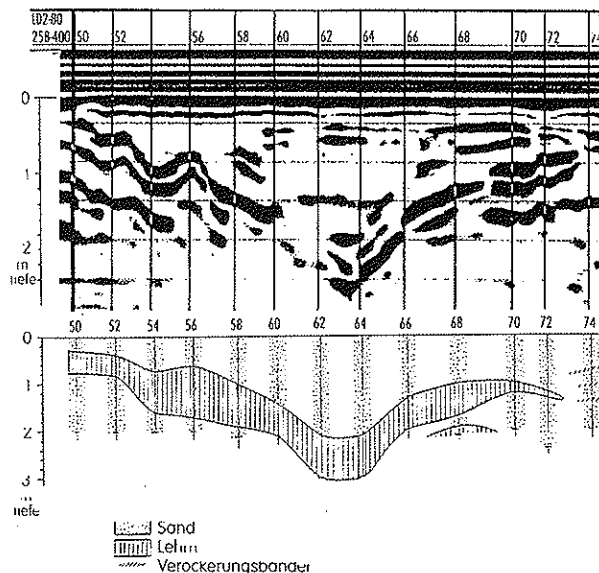


Bild 3: Vergleich eines Radargramms und eines Bodenprofils

## 5. Erkundungsbeispiele

Zur Erkundung oberflächennaher bindiger Schichten eignen sich geoelektrische Kartierungen und Sondierungen gut. Im Bild 4 ist ein solches Ergebnis dargestellt. Zwischen den beiden Bohrungen wurde eine geoelektrische Anomalie (Maximum des spez. Widerstandes) festgestellt. Die daraufhin durchgeführten geoelektrischen Tiefensondierungen ergaben den bei WS1 - WS3 eingetragenen Schichtaufbau. Bei WS2 steht nur Sand an. Damit ist die Ursache dieser lokalen Anomalie (fehlender Stauer) eindeutig geklärt.

### 5.1 Rollige Kippe

Zur Untersuchung der Homogenität eines Kippenbereiches wurden geoelektrische Kartierungen mit einer Wirkungstiefe bis ca. 3 m und Radarmessungen durchgeführt (Bild 5). Während aus der Geoelektrik nur Widerstandsanomalien erkennbar sind, bildet sich im Radargramm die konkrete Struktursituation ab.

Im Anfangsteil ist noch die Flanke der gewachsenen Böschung erkennbar. Das ab 35 m anschließende starke Reflexionsband wird durch den Grundwasserspiegel hervorgerufen. Dies ist nur im grobkörnigen Material möglich, da hier kein großer Kapillarraum ausgebildet ist. Durch einen geringen Geländeanstieg erhöht sich die Mächtigkeit der trockenen Kippen-scheibe (Zunahme des spezifischen Widerstandes, relatives Absinken des Wasserspiegels). Die bei 160 m einsetzende Veränderung im Reflexionsbild und das einsetzende geoelektrische Minimum werden durch eine nicht bekannte Hausmülldeponie mit bindigen Einlagerungen hervorgerufen, was nachträglich mit gezielten Schachtungen belegt wurde.

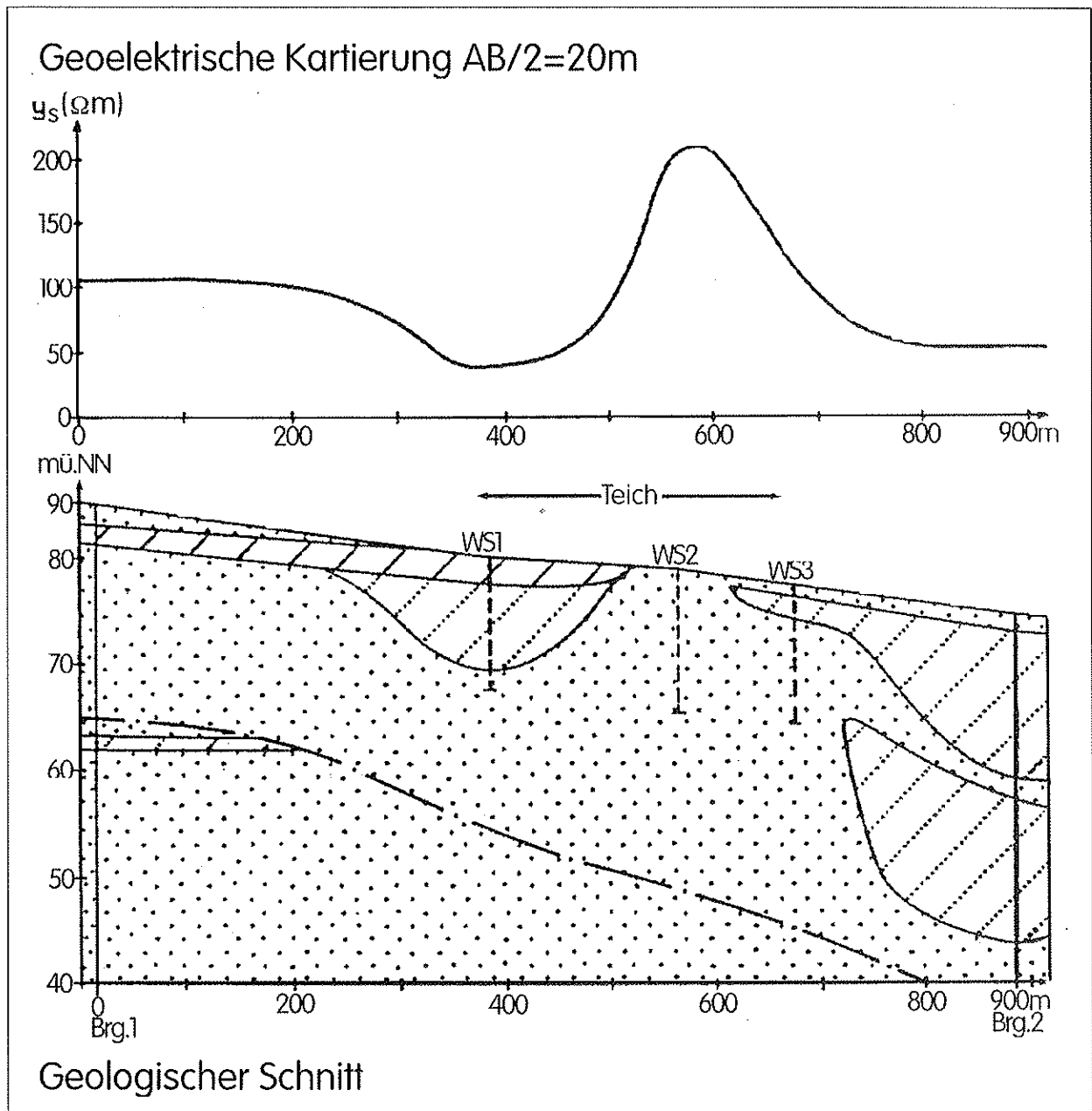


Bild 4: Geoelektrisches Profil und geologischer Schnitt

## 5.2 Erweiterung einer Deponie

Zur Vergrößerung einer Deponiefläche erfolgten Baugrunduntersuchungen. Mit Georadarmessungen im Profilabstand von 5 m konnten in einem homogen abgelagerten sandig-kiesigen Untergrund Unregelmäßigkeiten im Radargrammbild festgestellt werden. Durch eine gezielte Schachtung ist als Ursache ein verdeckter Graben mit Müllablagerungen ermittelt worden. Insgesamt wurden drei Gräben (5 x 15 m) nachgewiesen, was zunächst zum Baustopp führte. Gleichzeitig erkennt man im linken Teil des Bildes 6 die sehr geringe Eindringtiefe im Bereich der vorhandenen Hausmülldeponie. Mit dem Georadar sind dort oberflächennahe Schrotteinlagerungen erkennbar.

## 5.3 Komplexe Untersuchung eines neuen Deponiestandortes

Zur Auswahl eines optimalen Deponiestandortes in Südbrandenburg kamen 4 Bereiche in die engere Auswahl. Dazu ist schrittweise ein komplexes Untersuchungsprogramm realisiert worden. Zunächst wurden flächendeckend zwei geoelektrische Kartierungen mit den Wirkungstiefen von ca. 2 m ( $L/2 = 5$  m) und 10 m ( $L/2 = 30$  m) durchgeführt. Das Ergebnis in Bild 7 zeigt sehr unterschiedliche Widerstandsverteilungen. Während in den Flächen 1 und 2 hoch- und niederohmige Bereiche vorliegen, ist die Fläche 3 niederohmig und die Fläche 4 sehr hochohmig ausgebildet.

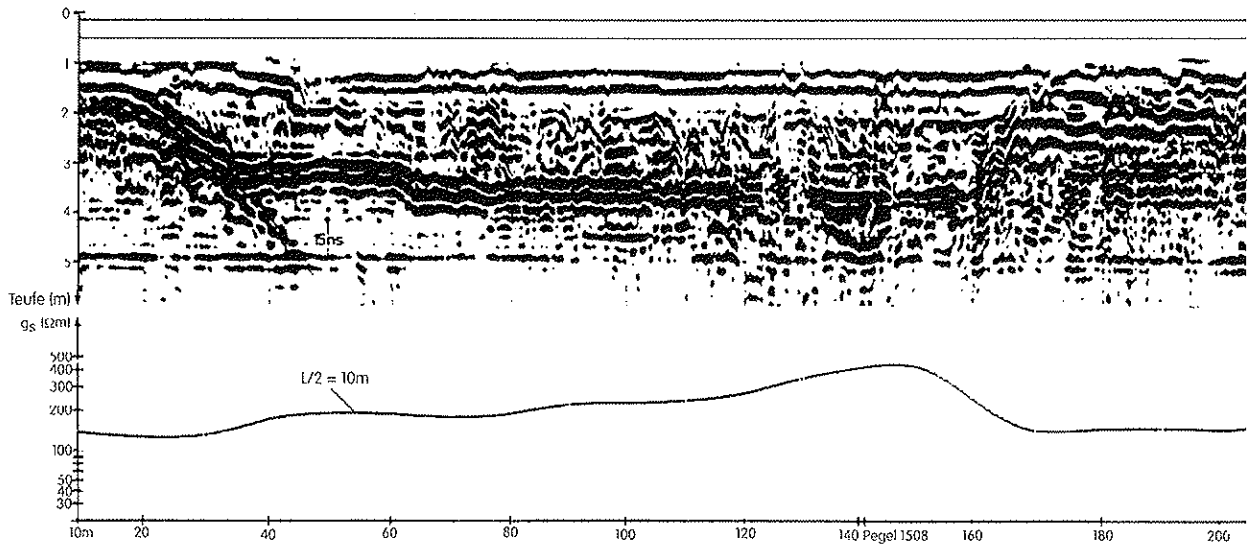


Bild 5: Geoelektrisches Profil und Radargramm einer rolligen Kippe

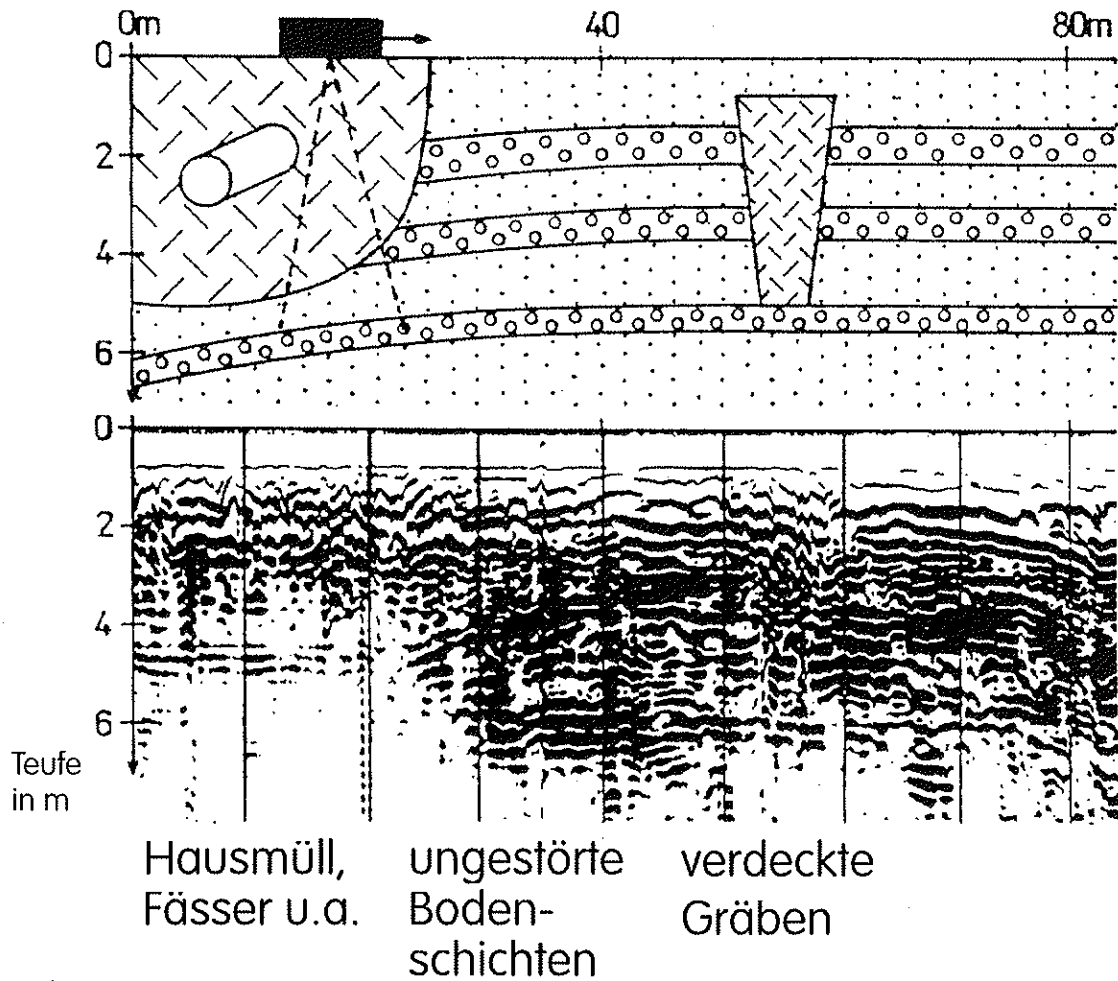
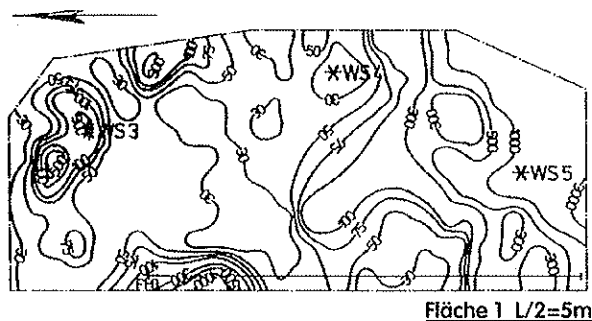
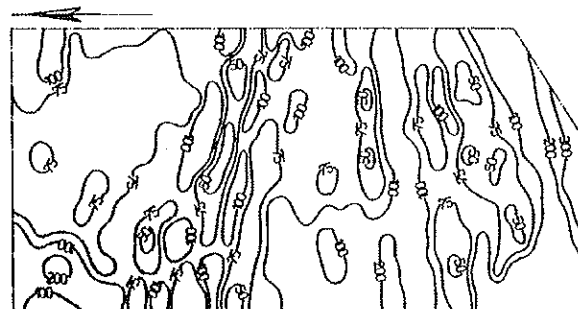


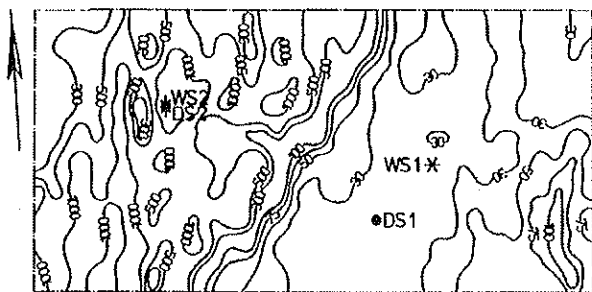
Bild 6: Radargramm einer Baugrund- und Deponieuntersuchung



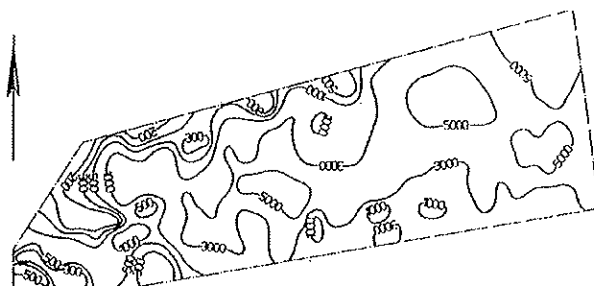
Fläche 1 L/2=5m



Fläche 3 L/2=5m



Fläche 2 L/2=5m



Fläche 4 L/2=5m



Bild 7: Geoelektrische Kartierung L/2 = 5 m von 4 Teilflächen

Die ausgeprägten Streichrichtungen in Fläche 3 bilden die Kipptechnologie dieser Tagebaukippe ab. Die geeignete Fläche 4 mußte aus anderen Gründen verworfen werden, so daß sich die weiteren Untersuchungen zum vertikalen Schichtaufbau und Kennwertbestimmung auf die Fläche 1 und 2 konzentrieren.

Die in Fläche 2 durchgeführten Tiefensondierungen (Bild 8) ergaben zwei unterschiedliche Schichtenprofile. In der WS 1 (niederohmige Zone) folgt nach 0,5 m Feinsand ein mächtiges bindig-toniges Schichtpaket. Die WS 2 dagegen weist bis 10,1 m Sand und Kies aus.

Zur weiteren bodenphysikalischen Kennzeichnung dieser unterschiedlichen Baugrundverhältnisse sind Drucksondierungen mit der radiometrischen Kombinationsdrucksonde (neben Spitzen- und Porenwasserdruck, Messung der natürlichen und künstlichen Gammastrahlung sowie Neutronenstrahlung) realisiert worden. Die nach entsprechender Eichung durchgeführte quantitative Auswertung dieser beiden Drucksondierungen sind in Bild 9 dargestellt.

Die teufengerechte Auswertung des Spitzendruckes, des Feinkornanteiles, der Rohdichte, der Porosität und des Wassergehaltes zeigen deutliche Unterschiede zwischen beiden Sondierungspunkten sowie auch Veränderungen mit der Teufe. Auf dieser Grundlage einschließlich einiger Laboruntersuchungen konnte eine Ansprache verschiedener Mischbodenarten und des Sandes erfolgen. Die dazugehörigen

Parameter und das vereinfachte Baugrundmodell sind im Bild 10 dargestellt.

Auf dieser Grundlage wurde schließlich im Vergleich mit der Fläche 1 die endgültige Auswahl des Deponiestandortes vorgenommen. Dieses Beispiel zeigt, daß durch eine komplexe Bearbeitung mit relativ geringem Aufwand eine optimale Auswahl erreicht und ein repräsentatives Ergebnis für den Deponiestandort erhalten wurde.

## 6. Empfehlungen zur geophysikalischen Voruntersuchung für Deponiestandorte

Durch die Kombination von flächen- und profildeckenden Aussagen mit Punktaufschlüssen (Bohrungen und Sondierungen) wird eine hohe Aussagekraft und Qualität der Erkundungsergebnisse erreicht. Deshalb sind in Abhängigkeit von den örtlichen geologischen und geotechnischen Bedingungen nachfolgende Methoden einzeln oder in Ergänzung einsetzbar:

- Mikrogravimetrie (Festgesteinsmassiv, Hohlräume),
- geoelektrische Kartierung (Anomaliezonen, Verteilung, rollig-bindig)
- geoelektrische Tiefensondierung
- elektromagnetische Messungen (Streichrichtungen, Anomaliezonen)
- Georadar (Detailerkundung von Schichtgrenzen und Störeinschlüssen bis 10 m)
- Kleineseismik (Festgesteinsoberkante, GW, Schichtgrenze ab 10 m)

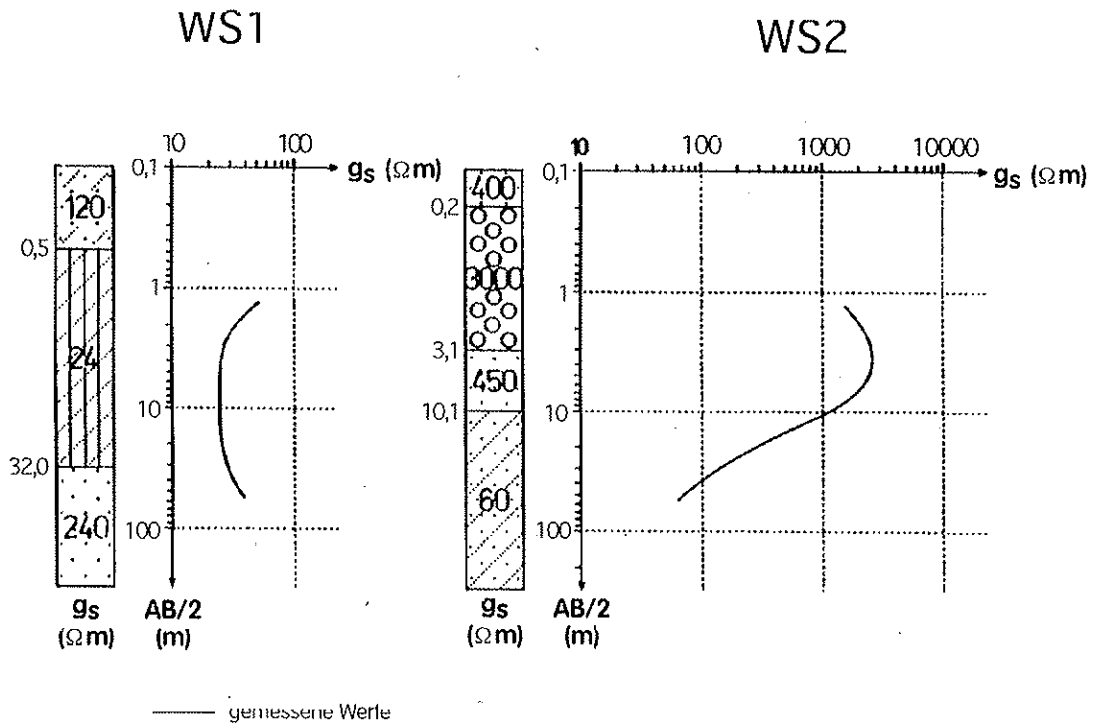


Bild 8: Widerstandstiefensondierungen WS 1 und WS 2 in der Teilfläche 2

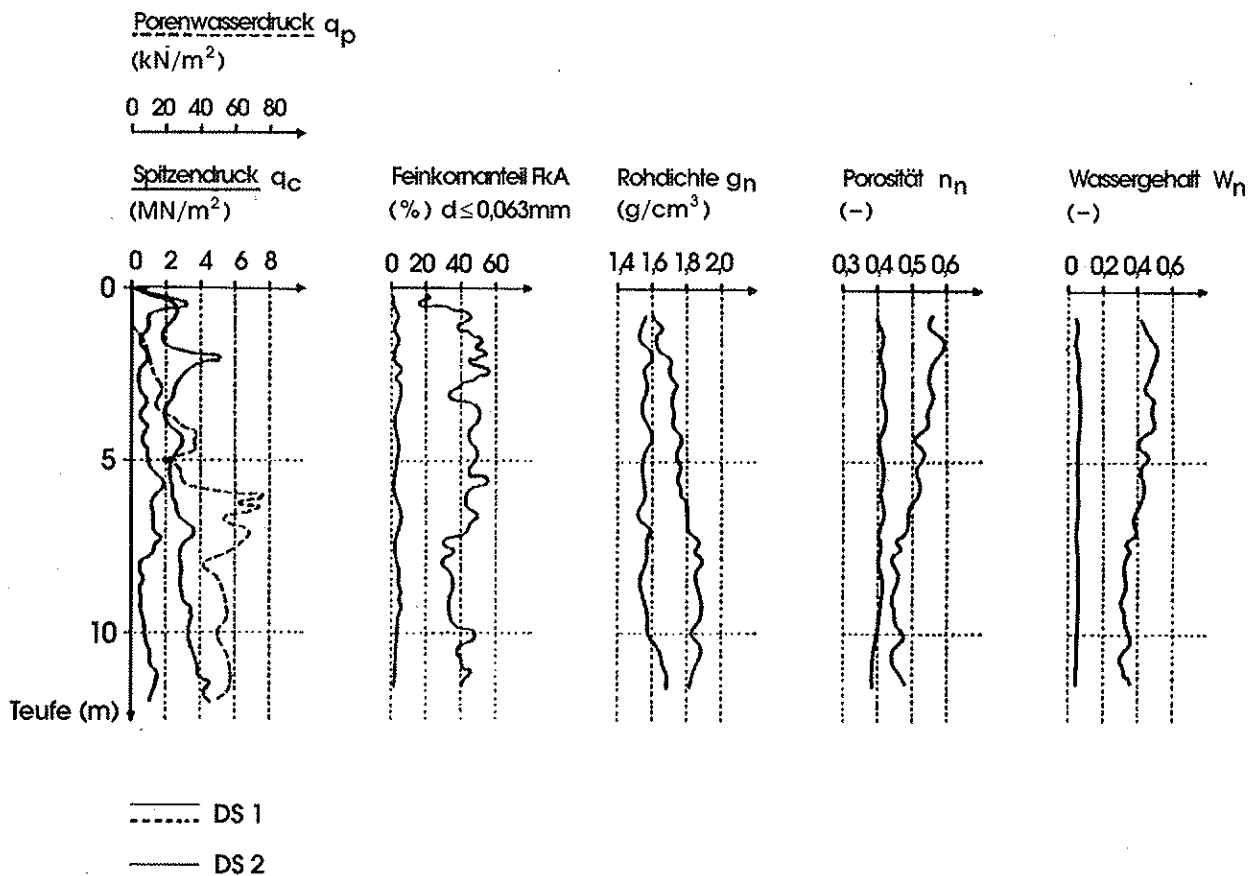


Bild 9: Quantitative Auswertung der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung in Fläche 2 DS1 (linke Kurve) und DS2 (rechte Kurve)

$$E_s = V \cdot 100 \left( \frac{6 + 0,5 \Delta 6}{100} \right)^w \quad [\text{kN/m}^2]$$

Nr.	Ansprache	V	w	$\phi$ [°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	$\rho_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]
1	Misch- boden A	80 ... 110	0,7	28	15	17,0
2	Sand	320 ... 600	0,5	34	10	17,5
3	Misch- boden B	70 ... 90	0,5	27	10	17,5
4	Misch- boden C	50 ... 70	0,6	25	20	18,0

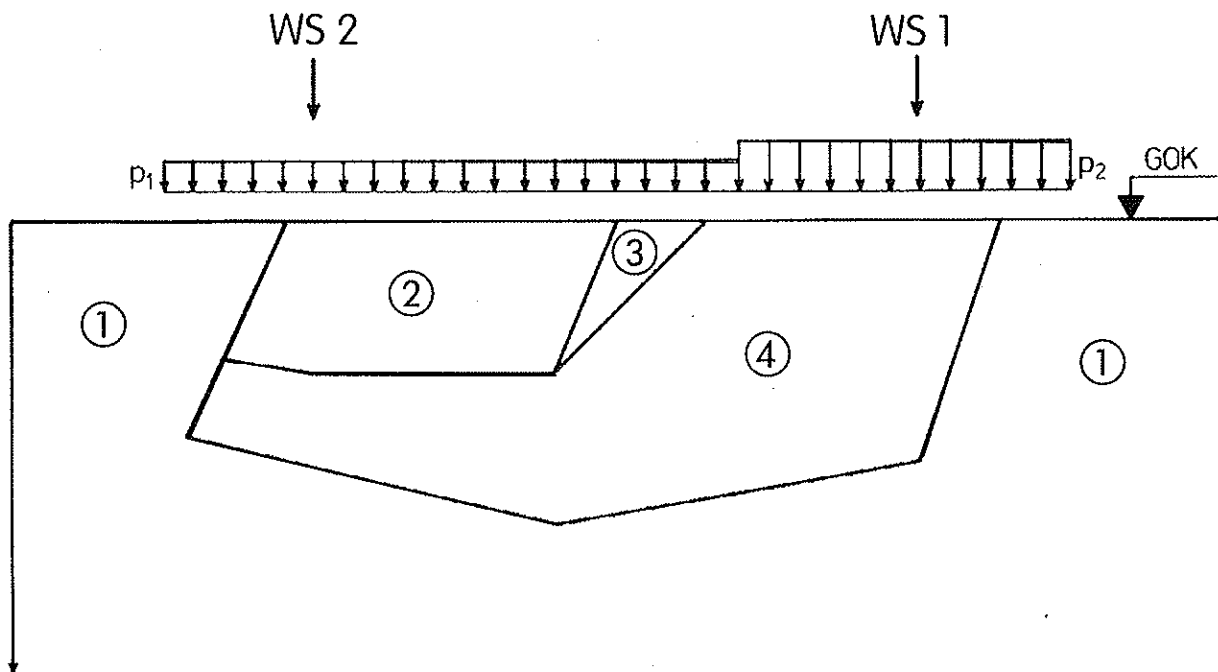


Bild 10: Vereinfachtes Baugrundmodell (überhöhte Darstellung) Fläche 2: Teilprofil WS1 - WS2

– Radimetrische Kombinationsdrucksondierungen und gezielte Probennahme.

Je früher die Geophysik eingesetzt wird, um so effektiver können die Ergebnisse das Gesamtprojekt beeinflussen. Bei zeitlich und methodisch richtiger Einordnung führt die Anwendung geophysikalischer Verfahren zu einer höheren Repräsentanz der Ergebnisse und zur Kostenreduzierung.

#### Literatur

FORKMANN, B.; PETZOLD, H.:  
Prinzip und Anwendung des Gesteinsradars zur Erkundung des Nahbereiches  
Freib. Forschungshefte C 432, Leipzig (1989)

JACOBS, F.; PETZOLD, H.; NITSCH, K.-H.:  
Goelektrische Erkundung von Lagerungsstörungen in Lockergesteinen Geologie und Geophysik, Band III, Heft 4, Berlin, 1987

MILITZER, H.; WEBER, F.:  
Angewandte Geophysik, Band 1-3  
Springer Verlag, Wien, 1987

VORGELANG, D.:  
Geophysik an Altlasten  
Springer Verlag, Berlin, 1991

*Dr. rer. nat. Hellfried Petzold*  
*Dipl. Geophysiker Karl-Heinz Nitsch*  
*Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft,*  
*Senftenberg*

*Dipl.-Ing. Volker Böhme*  
*Ingenieurbüro Böhme und Partner,*  
*Spremberg*

# Einsatzmöglichkeiten der dynamischen Intensivverdichtung

Volker Böhme, Ingenieurbüro Böhme & Partner GmbH,  
Spremberg

## 1. Einführung

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Verfahren zur Bodenstabilisierung entwickelt. Die in der Praxis am häufigsten angewendeten Verfahren beruhen auf folgenden Wirkprinzipien:

- Fixierung der Gesteinskörner durch Verkleben und/oder Verfüllen der Poren durch Injektionen
- Verringerung des Porenraumes durch Verdichten.

Die Wahl eines geeigneten Verfahrens richtet sich nach der zu lösenden Aufgabe, dem anstehenden Boden und ökonomischen Aspekten.

Die nach dem Wirkprinzip der Verdichtung angewendeten Verfahren unterscheiden sich durch die Art der Einwirkung und Übertragung der Verdichtungsenergie.

## 2. Dynamische Intensivverdichtung

### 2.1 Historie, Technologie

Die Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) wird seit Anfang der 70er Jahre (MENARD, Frankreich) angewendet.

Der technologische Ablauf ist folgender:

Ein Fallgewicht aus Stahlbeton mit meist quadratischer Grundfläche von mindestens 2 m mal 2 m und einem Gewicht  $G \geq 5$  t wird aus großer Höhe ( $h \geq 10$  m) auf die Oberfläche des zu verdichtenden Untergrundes fallengelassen (Bild 1). Die Stoßbelastung verursacht verschiedene Verformungsvorgänge, die an der Oberfläche zu beachtlichen Setzungen führen. Radial um den Aufschlagtrichter sind oft deutliche Risse und das Entweichen von Gasen und Wasser zu beobachten. Der Aufschlagtrichter ist nach einigen Aufschlägen jeweils mit Material aufzufüllen, um ein Verkanten des Fallgewichtes beim Aufschlag zu vermeiden.

Die Anzahl der Schläge je Aufschlagstelle und das Aufschlagstellenraster werden im allgemeinen auf der Grundlage von Feldversuchen ermittelt und vorgegeben (Bild 2).

Dynamische Intensivverdichtungen wurden mit Fallgewichten bis 200 t und Fallhöhen bis 40 m ausgeführt.

Mit Ausnahme von Ton lassen sich alle Bodenarten, auch Torfe, sowie Müll verdichten. Bindige Böden können Wassergehalte bis zur Fließgrenze enthalten.

Die Kontrolle des Verdichtungserfolges ergibt sich aus Messungen vor und nach der Verdichtung; vorzugsweise mittels Sondierungen nach DIN 4094.

### 2.2 Verdichtungs Vorgang

Wegen der im Verhältnis zu Konsolidierungsvorgängen im Boden kurzfristigen Eintragung von Verdichtungsenergie kommt der Entwicklung des Porenwasserdruckes (PWD) im Boden besondere Bedeutung zu.

Man unterscheidet daher zwei Fälle:

- Ansteigen des Porenwasserdruckes während der Verdichtung (dynamic consolidation)
- keine Zunahme des Porenwasserdruckes infolge Verdichtung, in der Literatur als „Schockbruchverdichtung“ bezeichnet.

Der erstgenannte Fall bezieht sich auf Böden mit hohem Feinkornanteil.

Der Porenwasserdruck steigt im Baugrund während der Bearbeitung bis auf einen Grenzwert an, der auch durch weitere Impulslasten nicht mehr erhöht werden kann. Erfahrungsgemäß tritt dieser Zustand nach 3 bis 8 Schlägen ein. Bei Erreichen des Grenzwertes erfolgt die Weiterfahrt des Gerätes zum nächsten Rasterpunkt. Während der folgenden Ruhepause, die je nach Bodenart bis zu mehreren Stunden, eventuell bis zu einigen Wochen dauern kann, klingt der Porenwasserdruck ab. Wichtig ist, daß der Abbau des Porenwasserdruckes schneller vonstatten geht, als von den bekannten Ödometerversuchen her geschätzt wird. Nach Bearbeitung aller Rasterpunkte können noch 2 bis 4 weitere Übergänge erforderlich sein.

Im zweiten Fall treten keine durch PWD erzwungenen Pausen auf. Die erforderliche Zahl von Schlägen wird hintereinander aufgebracht, ehe am nächsten Rasterpunkt die Verdichtung erfolgt.

Vergleichende Untersuchungen haben ergeben, daß die beim Einsatz der DYNIV aufgewendete Energie wesentlich geringer ist als die mit anderen Verfahren bei gleichem Erfolg. Dieser Umstand wird auf die

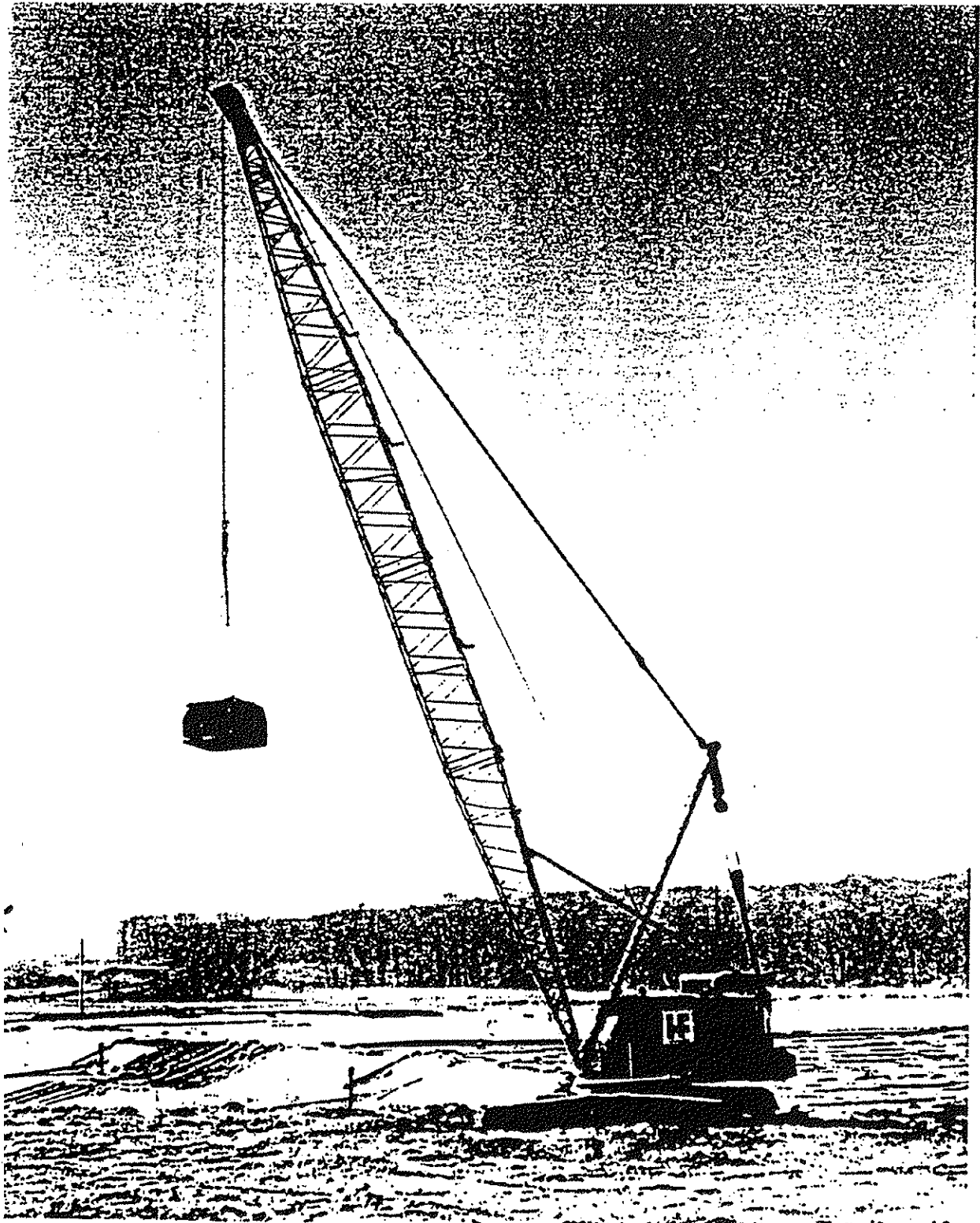


Bild 1      Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV)



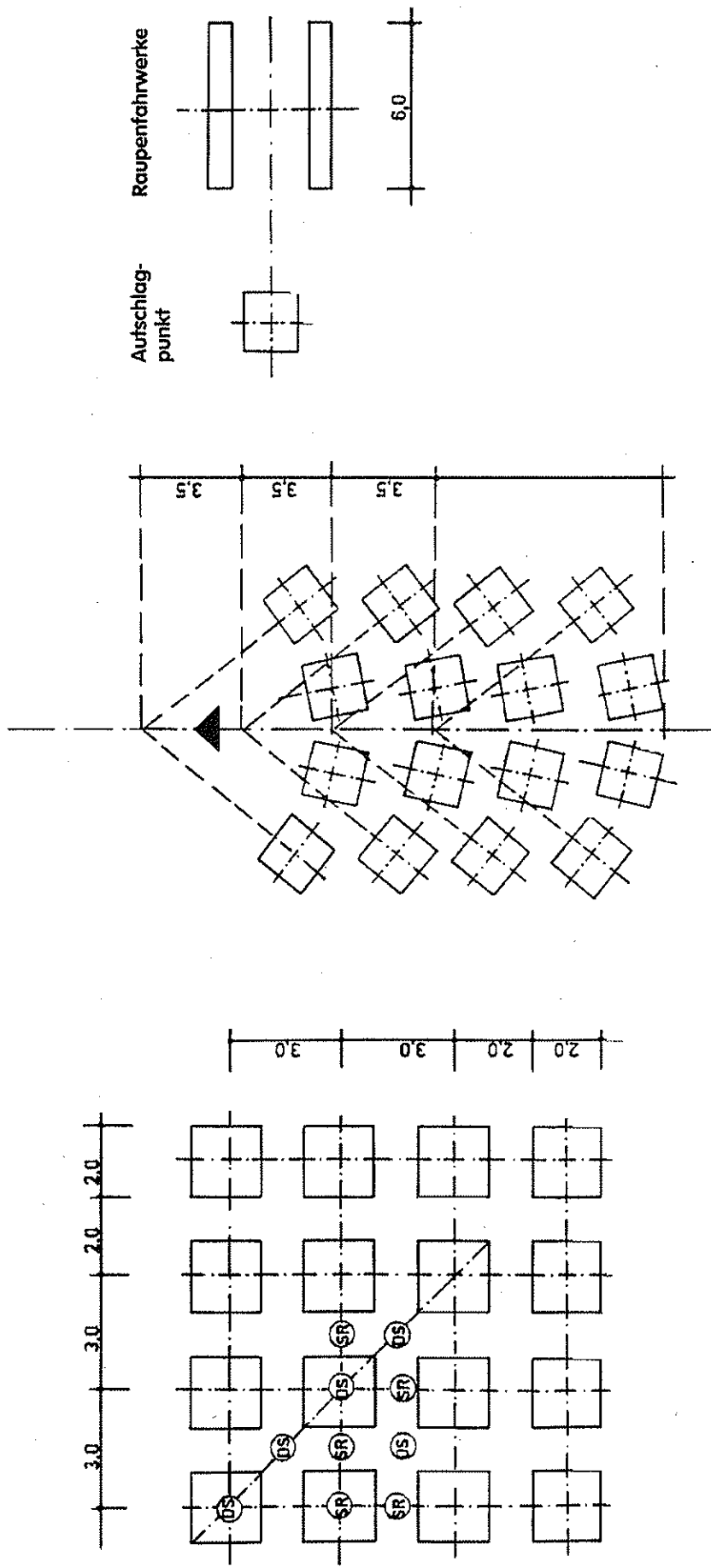


Bild 2 DYNIV - Anordnungen von Aufschlagstellen (Raster)

Fallenergie  $E_1$  je Schlag

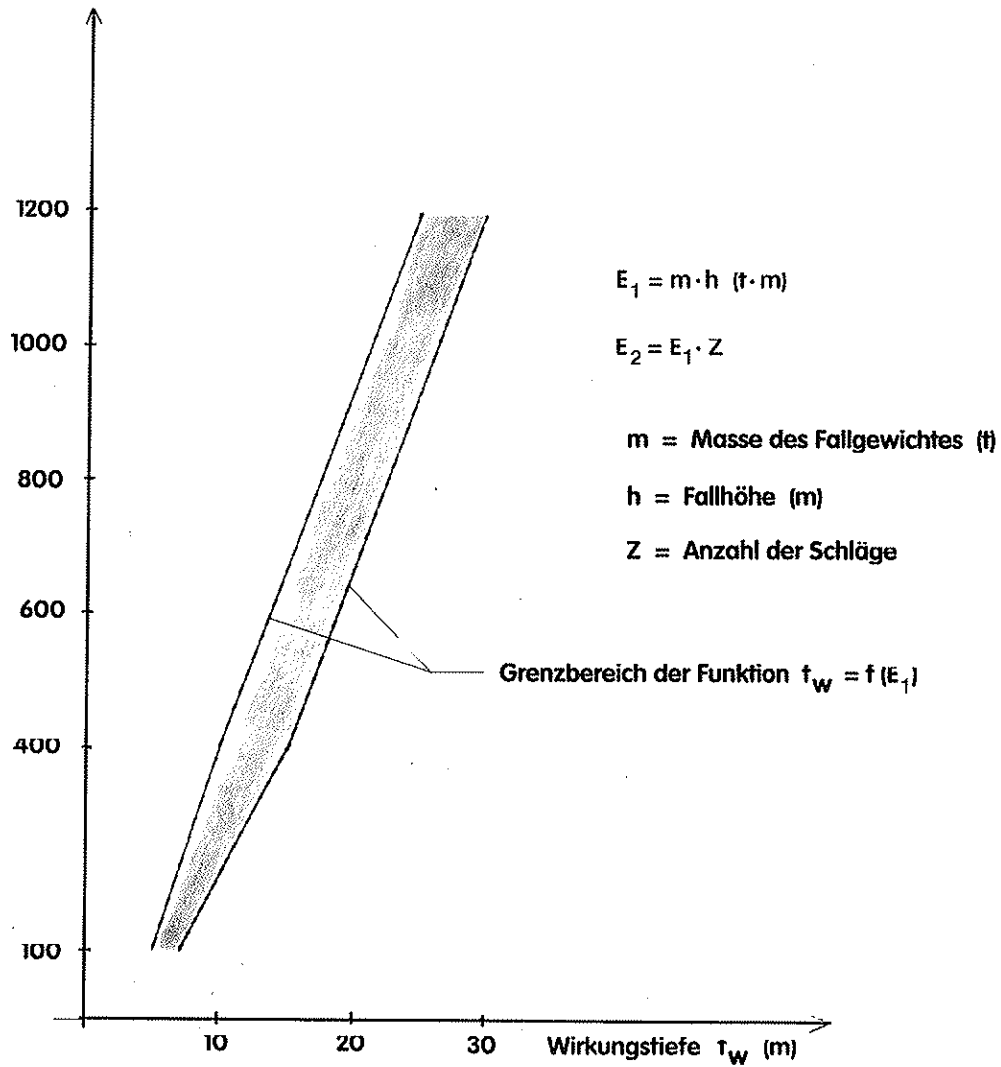


Bild 3 Abhängigkeit der Wirkungstiefe von  $E_1$

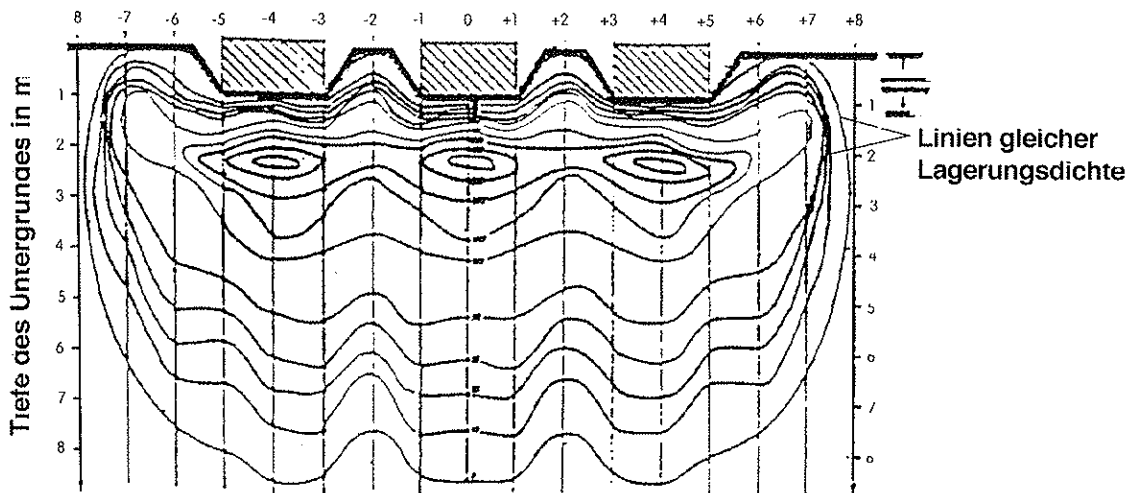


Bild 4 Vertikalschnitt einer mit DYNIV verdichteten Fläche

Verringerung der inneren Reibung durch Entweichen der Gase beim Aufschlag des Fallgewichtes erklärt.

Bei Einsatz der DYNIV gilt als Faustregel für quasihomogenes Bodenmaterial:

- Die erreichbare Tiefe der Verdichtung (Wirkungstiefe  $t_w$ ) ist abhängig von der Fallenergie (potentielle Energie), die in Bild 3 vereinfacht als Produkt aus Fallgewicht ( $G$  in t) und Fallhöhe ( $h$  in m) dargestellt ist.
- Die jeweils erreichte Verdichtung ist im Bild 4 dargestellt und ist abhängig von der Anzahl der Schläge bzw. der Energie  $E_2$ , wobei die Zunahme der Verdichtung je Schlag sich asymptotisch zu einem Grenzwert verhält.

### 2.3 Abschließende Bemerkungen

Die dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) ist ein anwendungsreifes, in der Praxis bewährtes und kostengünstiges Verfahren zur Verdichtung fast aller Bodenarten und anderer, flächenhaft abgelagerter Materialien.

Mit in der Praxis erreichten Verdichtungstiefen von 3 bis 25 m kann sie zwischen die Oberflächenverdichtung (Platte, Walze) und die Tiefenverdichtung (Tiefenrüttler, Sprengverfahren) eingeordnet werden. Sie eignet sich besonders bei großen, grobplanierten Flächen zur Vorwegnahme von Setzungen infolge Auflast (z.B. Deponien auf Tagebaukippen) und Sackungen.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der DYNIV wird auf solchen Oberflächen von Tagebaukippen gesehen, bei denen das verkippte Material als verflüssigungsempfindlich eingestuft wird, der Grundwasserspiegel eine entsprechende Höhe erreicht und die sich außerhalb von Bereichen möglicher Setzungsfließen befinden.

*Dipl.-Ing. Volker Böhme  
Ingenieurbüro Böhme und Partner GmbH,  
Spremberg*

# Dynamische Stabilisierung des setzungsfließgefährdeten Randbereiches der Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen durch Sprengen

Walther Kuntze

Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, Senftenberg

## 1. Vorbemerkungen

Im Ergebnis des Braunkohlenabbaues in Tagebauen der Niederlausitz verblieb eine Vielzahl wassergefüllter Restlöcher. Bei nahezu allen Restlöchern ist ein größerer Abschnitt des Ufers Kippenrand.

Auf Grund der sehr lockeren Lagerung der verkippten vorherrschenden Sande besteht bei Grundwasserwiederanstieg in solchen Bereichen die Gefahr einer „Verflüssigung“ des Sandboden-Wasser-Gemisches, die sich in Setzungsfließ-Rutschungen auswirken kann (Bild 1).

Solche Ereignisse

- kündigen sich nicht durch übliche Rutschungsanzeichen (Rißbildungen u.a.) an,
- beginnen plötzlich und laufen in kurzer Zeit, meist innerhalb weniger Minuten ab,
- können in der angrenzenden Wasserfläche zu Flutwellen führen (Badeverbot),
- erfassen oftmals weite Kippenbereiche im Böschungshinterland (bis zu ca. 600 m) und
- führten immer wieder zu schwerwiegenden Verlusten an Menschen und Technik (FÖRSTER, VOGT 1992).

Deshalb sind im Ergebnis bodenmechanischer Standsicherheitsuntersuchungen längs der Restlochufer bis zu ca. 600 m breite Kippenstreifen gegen jede Art der Nutzung und das Betreten gesperrt. Diese, mit den Schildern

„Lebensgefahr  
Betreten verboten“

gekennzeichneten Sperrstreifen nehmen in der Lausitz insgesamt eine Fläche von ca. 50,6 km<sup>2</sup> ein.

An den Ufern des Tagebaurestloches „Koschener See“ sind Kippenstreifen mit einer

Länge von ca. 10,5 km und einer  
Fläche von ca. 345 ha

gesperrt.

Ganz abgesehen von dem Verlust an nutzbarer Fläche ist ein sicheres Sperren vor allem gegen Betreten erfahrungsgemäß nicht zu garantieren.

Es ist also zwingend erforderlich, die setzungsfließgefährdeten Bereiche so zu sichern, daß keine Rutschungsgefahr mehr besteht.

Aus den in Betracht kommenden technischen Möglichkeiten zur Sicherung solcher Bereiche zeichnet sich die dynamische Stabilisierung durch Sprengen auch unter dem Aspekt der Größe der zu sanierenden Fläche als geeignetes und kostengünstiges Verfahren ab.

Mit dem Ziel, die bestehende Setzungsfließ-Rutschungsgefahr in den Sperrbereichen des Restlochkomplexes Sedlitz-Skado-Koschen zu beseitigen, wurde mit der Sprengstabilisierung zunächst in der Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen begonnen.



Bild 1

**Rutschungskessel** des Setzungsfließens vom 19.06.1991 am Restloch „Skado“. Dieses Setzungsfließen zerstörte eine abgeflachte Absetzerkippenböschung und reichte in Richtung Hinterland bis an das gewachsene Randböschungssystem des ehemaligen Tagebaues „Skado“ heran.

Mögliche Initialwirkungen:

- Wellenschlag
- Sackungen im Kippenboden infolge Grundwasseranstieg.

## 2. Geotechnische Situation in dem setzungsfließgefährdeten Kippenrandbereich

Das Innenkippenmassiv ist in diesem Bereich bis ca. 45 m mächtig und besteht aus einer Pflugkippe und zwei Absetzertiefschüttungen (Kippenaufbau in Bild 7).

Die Verflüssigungsneigung des hauptsächlich aus Sanden zusammengesetzten Kippenmassives zeigte sich in mehreren Rutschungen während der Flutung des Restloches Koschen.

Der Kippengrundwasserspiegel befindet sich in Höhe des Wasserspiegels im Koschener See und etwa 7 m unter der Geländeoberfläche.

Die Uferböschung wurde vor der Flutung des Restloches auf eine Neigung von ca. 8° abgeflacht.

Das Restlochufer ist durch 300 - 600 m breite Sperrstreifen gegen Betreten und Befahren gesichert.

Die geotechnische Situation geht aus der Lageskizze und dem geologisch-geometrischen Schnitt A hervor.

## 3. Technologische Erläuterungen zur Sprengstabilisierung

In das zu stabilisierende Kippengebiet werden in einem bestimmten Raster Bohrlöcher niedergebracht, diese mit bemessenen Sprengstoffmengen besetzt und in einem vorgegebenen Zündregime abgetan.

Die Dimensionierung der Sprengparameter (Abstand der Sprengbohrlöcher, Ladungsteufe und -menge, Zündzeitfolge und Reihenfolge des Initialeintrages) erfolgt an Hand von Richtlinien (u.a. KESSLER, FOERSTER 1992). Diese Parameter werden in Vorversuchen unter vergleichbaren Bedingungen in der Kippe getestet. Die Stabilisierung wird im uferfernen Hinterland begonnen und „Vor Kopf“ in Richtung Ufer vorangetrieben.

Die Sprengbohrlöcher werden im Rotary-Spülbohrverfahren und unverrohrt abgeteuft (Bild 2) und mit den Sprengladungen besetzt (Bild 3). Nach dem

Beräumen und Absperren des jeweiligen Sprengfeldes erfolgt die Zündung der Ladungen (Bild 4 und Bild 4.1).

Durch den hohen Detonationsdruck und die Erschütterungswirkung wird das Sandkorngefüge im wassergesättigten Untergrund zerstört und es kommt zu einer Verflüssigung in dem Sprengfeld. Infolge Eigengewicht der überlagernden Schichten entstehen im Untergrund enorme Porenwasserüberdrücke, die sich oftmals in Form von Wasserfontänen an der Oberfläche abbauen (Bild 5).

Während der ablaufenden Sackungen und Setzungen wird eine Umordnung der Sandkörner und eine dichtere Lagerung des Bodens erzielt. Dabei entsteht an der Oberfläche eine Absenkmulde (Bild 6).

Die Eigenstabilisierung der Kippe, in der gesprengt wurde, erfolgt innerhalb eines Tages. Dadurch ist täglich die Sicherheit von Personal und Technik bei der Durchführung der Arbeiten im unmittelbaren Vorfeld gewährleistet.

Die Stabilisierung erfolgt zunächst in Form eines uferparallel verlaufenden Kippenstreifens (vgl. Lageskizze Koschener See).

Dieser sogenannte „versteckte“ Damm wirkt im Falle einer Verflüssigung des wassergesättigten Kippenbodens im uferfernen Hinterland als Stützkörper und an dessen uferseitiger Begrenzung kommen Setzungsfließen, die an der Böschung eintreten, zum Stillstand (Prinzip im geologisch-geometrischen Schnitt A dargestellt). Im Anschluß daran wird „vor Kopf“ das uferseitige Vorfeld des „versteckten“ Dammes stabilisiert.

Der Nachweis des Stabilisierungserfolges verlangt begleitende Messungen und Prüfungen, die den Zustand der Kippe vor und nach der Sprengstabilisierung erfassen. Dazu gehören u.a. marksscheidende Höhenmessungen (Ermittlung der Oberflächenabsenkung), Drucksondierungen (Erfassung der Lagerungsdichteänderung), Prüfungen an ungestört entnommenen Bodenproben (Gefriermethode) im Labor und Sonderprüfungen in repräsentativen Kippenbereichen (in situ - Verflüssigungstest, Scherwellengeschwindigkeitsmessungen).



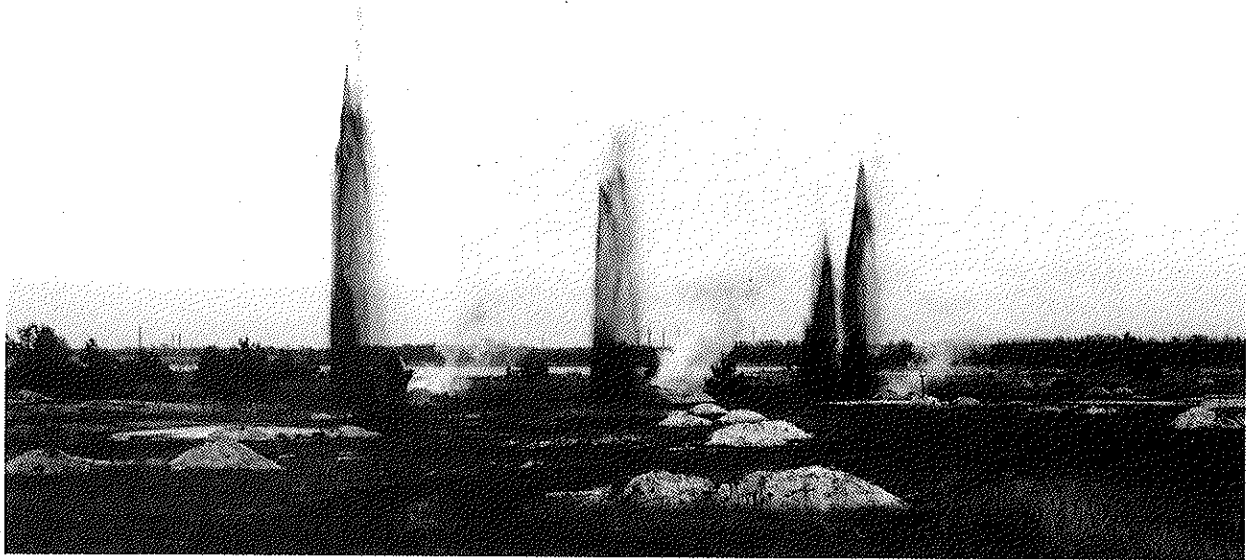
**Bild 2**  
Abteufen der Sprengbohrlöcher in einem bestimmten Raster  
Im Vordergrund Aushubmassen aus den Bohrspülungsgruben;  
im Hintergrund Drucksonde im Einsatz.



**Bild 3**  
 Nach dem „Klarspülen“ des Sprengbohrloches erfolgt der Ladungseinbau im vorliegenden Fall in zwei Etagen.  
 Im Vordergrund sind zwei Sprengladungen abgelegt.



**Bild 4**  
 Sprengfeld beim „Abtun der Ladungen“. Das Feld wurde vor dem Sprengen geräumt und das Zünden erfolgt mit Standort im sicheren uferfernen Hinterland – „Detonationsdruckphase“.



**Bild 4.1**  
 Sprengfeld unmittelbar nach dem Zünden der Ladungen – „Gasdruckphase“.  
 Der im Untergrund mobilisierte Gasdruck baut sich zum Teil in Form von Bohrspülungsfontänen ab.



**Bild 5**  
 Nach dem Initialeintrag entstehen infolge Eigengewicht der überlagernden Schichten im Untergrund enorme Porenwasserüberdrücke, die sich oftmals in Form von Wasserfontänen an der Oberfläche bis zu 30 Minuten lang abbauen. Dies erfolgt meist über die Sprengbohrlöcher (im Bild).





**Bild 6**

Einen Tag später sind die mobilisierten Porenwasserüberdrücke, Sackungen und Setzungen weitestgehend abgeklungen und die Stabilisierungsarbeiten können im angrenzenden Bereich weitergeführt werden. Die Absenkungsmulde des vorangegangenen Sprengfeldes (im Vordergrund) ist mit ausgepreßtem Porenwasser gefüllt.

#### 4. Erste Ergebnisse der Sprengstabilisierung

Mit der dynamischen Kippenbodenstabilisierung in den Gebieten Phase I, II, III und IV (in der Lageskizze dargestellt) wurde die systematische Beseitigung der Setzungsfließ-Rutschungsgefahr in der Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen erfolgreich begonnen.

Gegenwärtig stehen die Stabilisierungsarbeiten im Gebiet der Phase IV kurz vor dem Abschluß.

Im Verlauf der Stabilisierung trat innerhalb des stabilisierten Gebietes eine mittlere Oberflächenabsenkung von  $\Delta h = 1,55$  m ein (Ergebnis des marksscheiderischen Höhennivellements vor und nach dem Sprengen).

Ein Vergleich der Ergebnisse von Drucksondierungen vor und nach der Stabilisierung ist im Bild 7 dargestellt (Nacherkundung bisher nur in einem Teilbereich des Gebietes Phase III abgeschlossen):

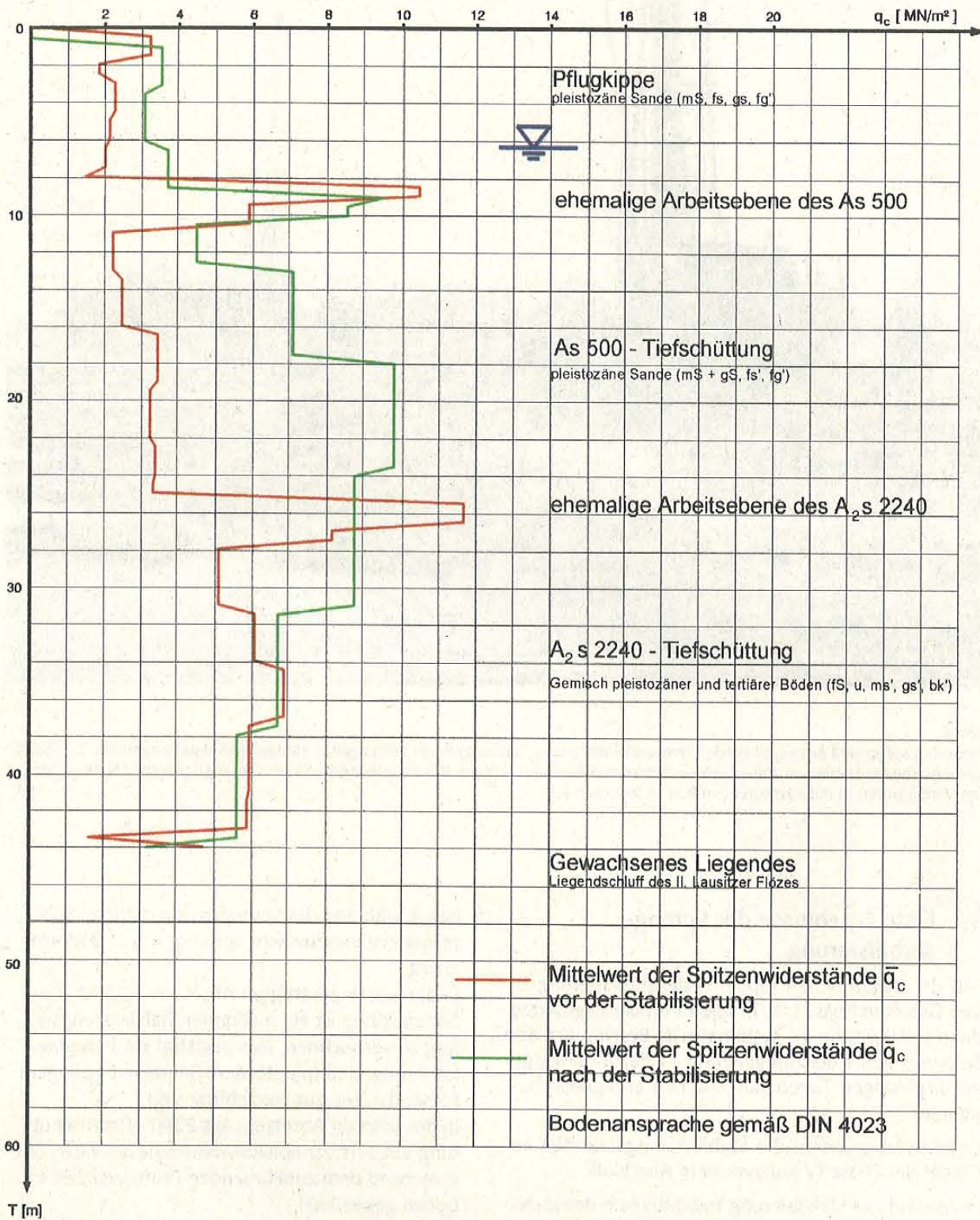
– In der überwiegend erdfuchten Pflugkippe über dem Grundwasserspiegel wurde auf Grund der Dy-

namik während des Sprengens ein mittlerer Spitzenwiderstandszuwachs von  $\Delta q_c = 1 \dots 2 \text{ MN/m}^2$  erzielt.

- In der wassergesättigten Absetzer- As 500 -Tiefenschüttung ist ein markanter Stabilisierungserfolg zu verzeichnen. Das bestätigt die bisherige Erfahrung, daß (pleistozäne) Sande mit geringem Feinkornanteil gut verdichtbar sind.
- In der unteren Absetzer- A<sub>2</sub>s 2240 -Tiefenschüttung tendiert der Spitzenwiderstandszuwachs entsprechend dem zunehmenden Feinkornanteil im Boden gegen Null.  
Das Entstehen großräumiger Verflüssigungen in diesem Teufenbereich ist wegen des erhöhten Feinkornanteiles unwahrscheinlich.
- Infolge der Sprengungen wurden zwei Setzungsfließ - Rutschungen in besonders labilen Uferböschungsabschnitten ausgelöst (Rutschungskessel der Setzungsfließen vom 05.02.92 und vom 11.11.93 in der Lageskizze).

Diese Böschungsbewegungen kamen in den bereits stabilisierten Gebieten zum Stillstand!



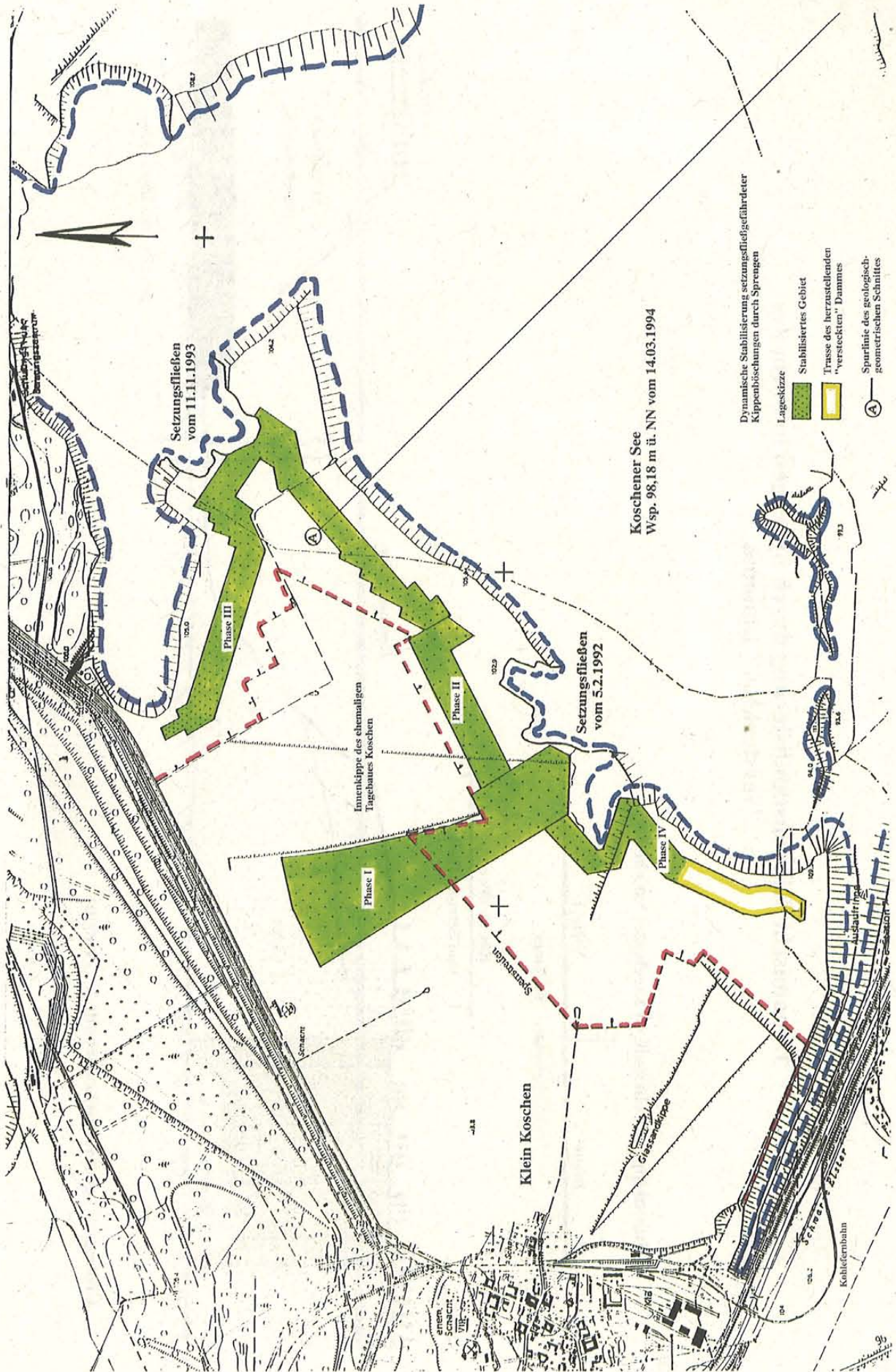


**Mittelwert der Spitzenwiderstände von Drucksondierungen im Bauabschnitt I  
 des Gebietes Phase III vor und nach der Stabilisierung**

Objekt: Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen · Sondierzeitraum: 6.1. - 14.12.1993

Bild 7



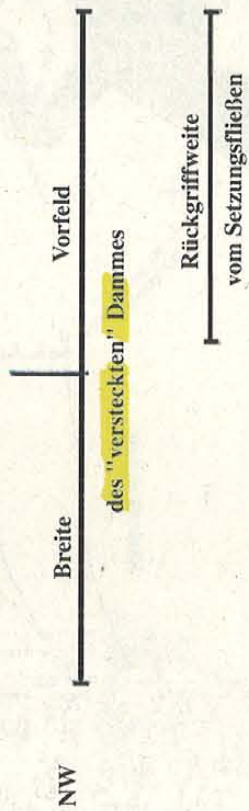


- Dynamische Stabilisierung setzungsfließfähiger Kippabrischungen durch Sprengen
- Lageskizze
  - Stabilisiertes Gebiet
  - Trasse des herzustellenden verstärkten Dammes
  - Spurlinie des geologisch-geometrischen Schnittes



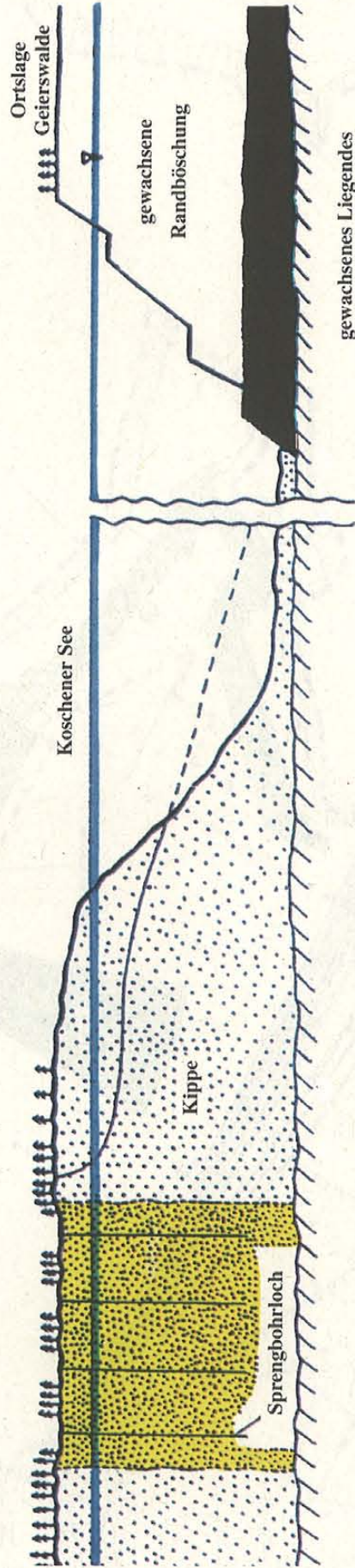
# Dynamische Kippenstabilisierung durch Sprengen in Form des "versteckten" Dammes

Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen



NW

SO



Geologisch - geometrischer Schnitt A (Prinzip)

Nach Abschluß der Sprengarbeiten in der Dammtrasse sowie der Messungen und Prüfungen in dem hergestellten „versteckten“ Damm in der Innenkippe des ehemaligen Tagebaues Koschen sind die Standsicherheitsverhältnisse neu zu bewerten. Mit dem Nachweis der Stabilität des vorher setzungsfließgefährdeten Gebietes und der Bestätigung des betreffenden Gutachtens durch das zuständige Bergamt kann der stabilisierte Bereich zur Nutzung durch die Öffentlichkeit freigegeben werden.

#### **Literatur**

FÖRSTER, W.; VOGT, A.: Rutschung Sedlitz - Beispiel für ein Setzungsfließen in Niederlausitzer Kippen des Braunkohlenbergbaues; Vortrag zur Baugrundtagung Dresden, September 92

KEßLER, J.; FÖRSTER, W.: Sprengverdichtung zur Verbesserung von setzungsfließgefährdeten Kippen; Freiburger Forschungshefte A 819; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1992

*Dipl.-Ing. Walther Kuntze  
Lausitzer Braunkohle AG, Senftenberg  
Hauptabteilung Geotechnik,  
Abteilung Gebirgs- und Bodenmechanik*



# Bewertung biologischer Bodenmechanik

Ernst Scheid, Ingenieurbüro für Boden- und Gewässerschutz,  
Außenstelle Berlin-Brandenburg

## Einleitung

Die Aussagen des Großteils der gedruckten Beiträge sind der konventionellen wissenschaftlichen Bodenmechanik zugeordnet.

Als Ergänzung und weiterführende Entwicklung sei hier die biologische Bodenmechanik angesprochen.

Mit diesem Begriff ist der Einfluß biologischer Einsätze auf die Bodenmechanik und deren Zusammenhang mit den Umwelttechnologien zur Erhaltung der allgemeinen Lebensprozesse bezeichnet.

Umweltschutz basierte bislang vorwiegend auf der Minimierung der Umweltbelastung durch nachgeschaltete Reinigungstechniken. Für eine nachhaltig wirksame Umwelt- und Ressourcenpflege bedarf es einer neuen Generation von Umweltschutzmaßnahmen.

Diese neue Generation enthält insbesondere:

Übersicht und Auswertung der sozio-ökologischen Gegebenheiten der Bedürfnis- und der Nutzungsgrenzwerte.

Dies bedeutet Lösungsansätze und Problemlösungen für umweltverträgliche

- Versorgung
- Entsorgung
- Abfallwirtschaft
- Wiederverwertung
- Deponietechnik
- Sanierung
- Recycling
- Produktionsintegrierte Umweltschutzmaßnahmen
- Übergreifende Informatik gesicherter Erkenntnisse und deren Auswertung auf globalem Niveau
- Einflußnahme auf die unsere gesamte Lebensfähigkeit bestimmenden Parameter.

Gefährdungen des Bodens und der bestehenden bodenmechanischen Verhältnisse können verursacht werden:

- durch Veränderungen des Grundwasserspiegels
- durch außerlandwirtschaftliche Stoffeinträge aus Industrie, Siedlung und Verkehr
- durch landwirtschaftliche Maßnahmen (übermäßiger Stoffeintrag durch Düngung und Pflanzenschutz, Förderung von Erosion, Bodenverdichtung und Monokulturen).

Bodenschutz und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit waren und sind ein wesentliches Anliegen jeder Volkswirtschaft und die weltweiten Ereignisse, die durch Umweltschäden ausgelöst wurden und stän-

dig zunehmen werden, fordern bedingungslos, Boden und Wasser nicht nur zu schützen, sondern dringlichst auch bei Schädigungen in lebenserhaltende Funktionen zurückzusetzen.

Zunehmende Industrialisierung und geänderte wirtschaftliche und agrarpolitische Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft haben zu stärkeren Belastungen von Umwelt und Naturhaushalt und damit auch des Bodens geführt. Der Boden ist unvermehrbar, aber nicht -wie früher häufig behauptet wurde- „unzerstörbar“, so daß dem Schutz des Bodens besondere Aufmerksamkeit gelten muß. Der Schutz des Bodens ist daher zu Recht zu einem Schwerpunkt der Umweltpolitik geworden und stellt eine Aufgabe für die gesamte Gesellschaft dar.

## Bodenschutz

Der Bodenschutz hat die Sicherung der Funktionsfähigkeit des Bodens zum Inhalt - in seiner Eigenschaft als

- Produktionsgrundlage für die Land- und Forstwirtschaft,
- Teil des Naturhaushaltes und der Landschaft,
- Speicher und Filter für den Wasserhaushalt,
- Siedlungs- und Verkehrsfläche,
- Träger von Bodenschätzen.

Vorsorgende Maßnahmen und Abwägung der an den Boden gestellten Ansprüche sind notwendig, um auf Dauer Gefährdungen und Schäden dieser unersetzlichen Bodenfunktionen zu vermeiden.

Es ist mittlerweile klar erkannt worden, daß z.B. Düngereintrag in der Landwirtschaft größtenteils überdimensioniert wird. Die Struktur erodierter Böden -auch durch Dünger erodiert- ist so verändert, daß Nährstoffauswaschungen und Verlagerung von Feinstpartikeln zu Schichtbildungen bis zu Sperrschichten und zu erheblichen Veränderungen der einzelnen Horizonte führen.

Die Erforschung der Ursachen ist bei uns besonders intensiviert worden und hat zu eindeutigen Erkenntnissen geführt.

Es wird unterschieden zwischen **innerer Erosion** und **äußerer Erosion**.

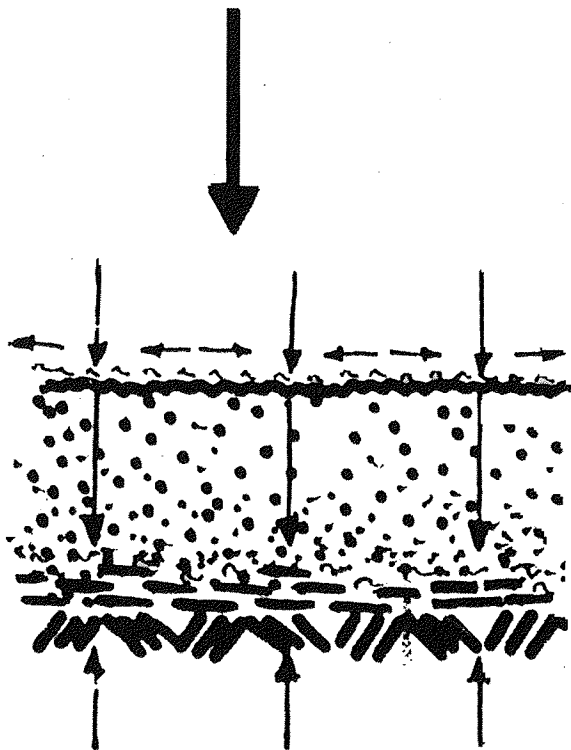
Die **äußere Erosion** wird gestaltet von den Parametern wie

- Temperatur
- Klima

- Bodenfeuchtigkeit
- Evaporation
- Strahlung
- meteorologische Einflüsse

wogegen die **innere Erosion** durch physikalische Veränderungen und Verlagerungsvorgänge gekennzeichnet ist, die auch auf mechanische, chemische, biologische und andere Entwicklungen in der Folge Einfluß nehmen.

#### ENTSTEHUNG ANAEROBER HORIZONTE UND SPERRSCHICHTEN DURCH VERLAGERUNG



#### Kationen-Austausch-Kapazität und Polyuronsäuren

Von besonderer Bedeutung ist die Erkennung des schematischen Aufbaus von Tonen.

**Tone** sind Mehrschichtminerale.

Die Kristallschichten werden durch Kationen wie z.B.  $K^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Fe^{++(+++)}$ ,  $NH_4^+$  und Anionen wie z.B.  $OH^-$  zusammengehalten.

Wasser kann als Dipol in einer Hülle angelagert werden. Tone werden dadurch im Boden beweglich und können in Fließkanälen -Wurzelkanälen, Regenwurm-gängen- oder im Bodengefüge -Groporen- verlagert werden.

Quellfähige Tone weiten sich bei Wasseraufnahme aus und dichten den Boden ab.

Durch Fehlbelegung in den Zwischenschichten treten negative Bindungsstellen auf. Daher haben Tone sowohl Bindungsstellen für Kationen (+) als auch Anionen (-) und Seitenketten von organischen Säuren.

Mit Kationen und Anionen wird ebenfalls Wasser gebunden und somit z.B. Strukturverlust durch  $Na^+$  vermieden.

Die folgenden Abbildungen zeigen den schematischen Aufbau von Polyuronsäuren.

**Polyuronsäuren** sind langkettige organische Säuren, die

- durch Verzehrprouesse von organischer Substanz im Magen/Darmtrakt von Bodentieren -Makro-edaphon- entstehen
- als Schleimmantel Bakterien vor dem Austrocknen schützen
- von Regenwürmern als Schleime ausgeschieden werden, um Gänge und Wurzelkanäle zu stabilisieren
- in allen Schleimen, Schnecken, Gummien und Ausscheidungen an Kernobst enthalten sind
- Zellstrukturen -Pektine- festigen und
- Lebensvorgänge -Zellsaft, Protoplasma- steuern.

Weil Wasser als Dipol in einer Hülle angelagert werden kann, werden Polyuronsäuren dadurch im Boden beweglich.

Bei Wasseraufnahme quellen Polyuronsäuren und können den Boden abdichten.

Durch Abspalten von  $H^+$  aus Seitenketten können Kationen angelagert werden. Durch Eintauschen von  $H^+$  durch die Pflanze werden Kationen als Nährstoffe pflanzenverfügbar.

Die biologische Bodenmechanik ist im wesentlichen gekennzeichnet durch eine Gefügestabilisierung mittels Ton/Humuskomplexen.

**Tone** und **Polyuronsäuren** gehen durch ihre Austauschkapazität sehr stabile Verbindungen -Ton/Humuskomplexe- ein. Die organische Komponente wird dabei so in die Bodenmatrix eingebaut, daß sie vor bakteriellem Verzehr -Humuszehrung- geschützt sind.

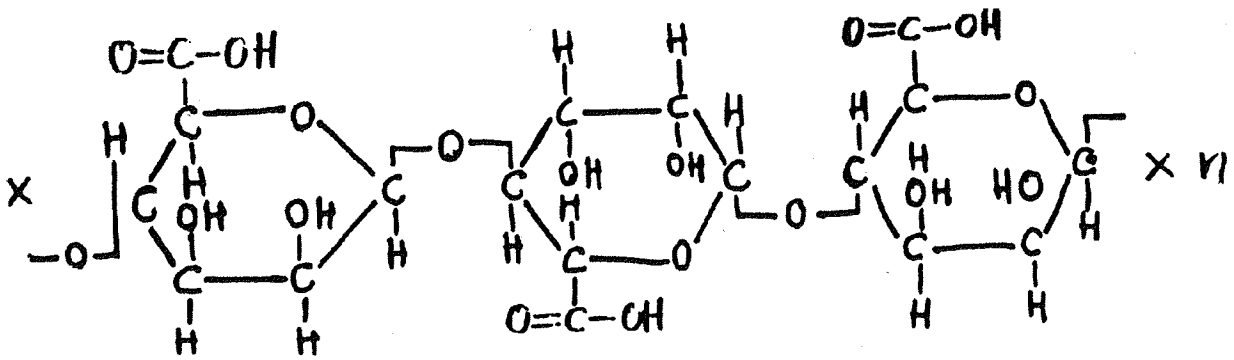
#### Praktische Anwendung:

Die Umsetzung der vorangegangenen Abläufe in die Praxis erfolgt durch die Nutzung Polyuronsäure-bildender natürlicher und aufbereiteter Pflanzen marinen Ursprungs, die den Ionenaustausch auslösen.

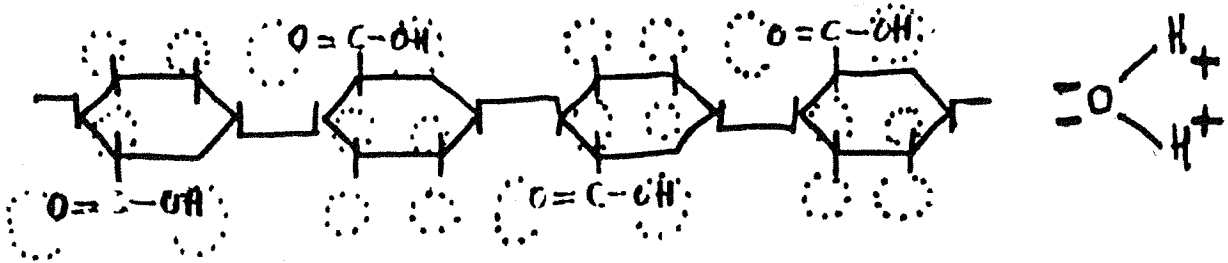
Das Untersuchungsprogramm wurde mit

- Geschiebelehm
- Löß
- sandigem Lehm
- Feinsand-Flugsand durchgeführt.

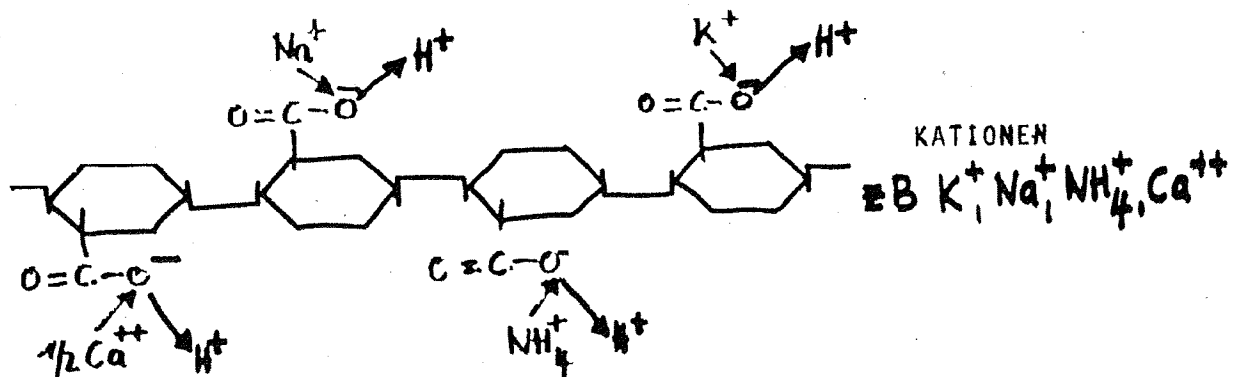
Schematischer Aufbau von Polyuronsäure



Polyuronsäuren lagern Wasser an



Polyuronsäuren tauschen Kationen aus (Pufferung)





Es wurden folgende Zusatzkonzentrationen jeweils eingesetzt:

Zusatzmittel	0,5 kg/m <sup>3</sup>
	1,0 kg/m <sup>3</sup>
	3,0 kg/m <sup>3</sup>
	5,0 kg/m <sup>3</sup> .

Ermittelt wurden:

- die Kornverteilung an den vier unbehandelten und sieben behandelten Böden nach DIN 18 123
- der Wassergehalt  $w$ , die Fließ- und Ausrollgrenze  $w_L$  und  $w_P$  sowie die Plastizitäts- und Konsistenzzahl nach DIN 18 122 an den bindigen Bodenarten; insgesamt kamen 20 Versuche zur Durchführung
- der Reibungswinkel  $\phi'$  und die Kohäsion  $c'$  im dränierten Versuch (D-Versuch) nach DIN 18 137 an vier unbehandelten und zehn behandelten Böden
- die einaxiale Druckfestigkeit  $q_u$  bei unbehinderter Seitenausdehnung nach DIN 18 136 an den bindigen Bodenarten; 11 Proben wurden untersucht
- der Kalkgehalt nach DIN 4022 (Salzsäureversuch).

### Sandiger Lehm, unbehandelt

Das gewählte Versuchsmaterial stammt östlich von Freising bzw. Weihenstephan. Es stellt das Verwitterungsprodukt der im Postglazial entstandenen Lößablagerungen dar. Als sogenannter Lößlehm ist er nahezu kalkfrei und von der Kornzusammensetzung her ein schwach toniger, schwach sandiger Schluff. (Abb. 1)

Die Entnahme des Lehmes erfolgte zu verschiedenen Zeitpunkten. Demgemäß sind in-situ Wassergehalte von 19,0% und 26,6% festgestellt worden.

Die Konsistenz des Materials ist weich bis steif. Der Wassergehalt an der Fließgrenze ( $w_L$ ) wurde mit 37,4% und 37,9% bestimmt. Vom Grad seiner Pla-

stizität ist der Boden als mittelpastisch anzusprechen.

Im einaxialen Druckversuch wurden Druckfestigkeiten zwischen 150 und 260 kN/m<sup>2</sup> ermittelt. Bei einem Versuch kam es zur Ausbildung einer Gleitfläche, deren Winkel wir mit 70° gemessen haben. Mit Hilfe des Spannungskreises nach Mohr ist die Kohäsion mit  $c_u = 30$  kN/m<sup>2</sup> und der Reibungswinkel mit  $\phi_u = 50^\circ$  bestimmt worden (scheinbare Scherparameter) (Abb. 2).

Die wirksamen oder effektiven Scherparameter  $\phi'$  und  $c'$  sind im Rahmenscherversuch ermittelt worden. Der Winkel der inneren Reibung beträgt  $\phi' = 30,5^\circ$  und die Kohäsion  $c' = 17,5$  kN/m<sup>2</sup> (Abb. 3).

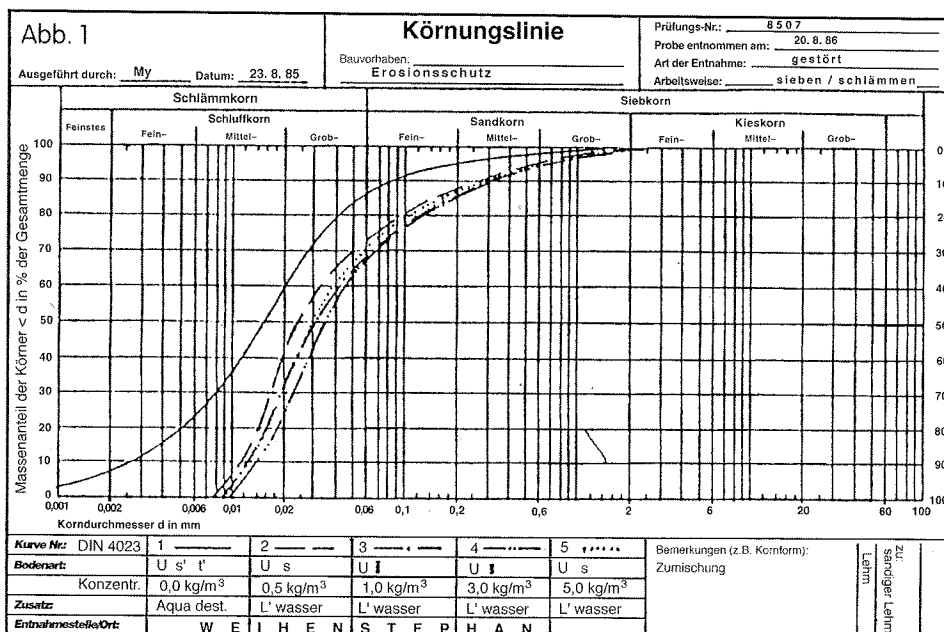
### Sandiger Lehm, behandelt

Dem Lehm wurden die genannten Konzentrationen zugemischt. Ausschlaggebend für die Zumischung war die Tatsache, daß sich in den einaxialen Druckversuchen bei der Zugabe keine eindeutigen Bruchwinkel ausgebildet hatten. Die Ursache hierfür wurde in der Kalkarmut des Bodens gesehen.

Die Kornverteilung der behandelten Böden ist in Abb. 1 (Körnungslinien 2-5) mitgeteilt. Die Körnungslinien werden im Gegensatz zum Kornaufbau des natürlichen Bodens (Körnungslinie 1) steiler, wobei die gewählte Konzentration keinen wesentlichen Einfluß zu haben scheint.

Bei der Bestimmung der Fließgrenzen und Plastizitätszahlen wird der Zusammenhang gemäß Abb. 4 gefunden: Fließgrenze und Plastizitätszahl erhöhen sich unabhängig vom zugesetzten Zusatz mit steigender Konzentration.

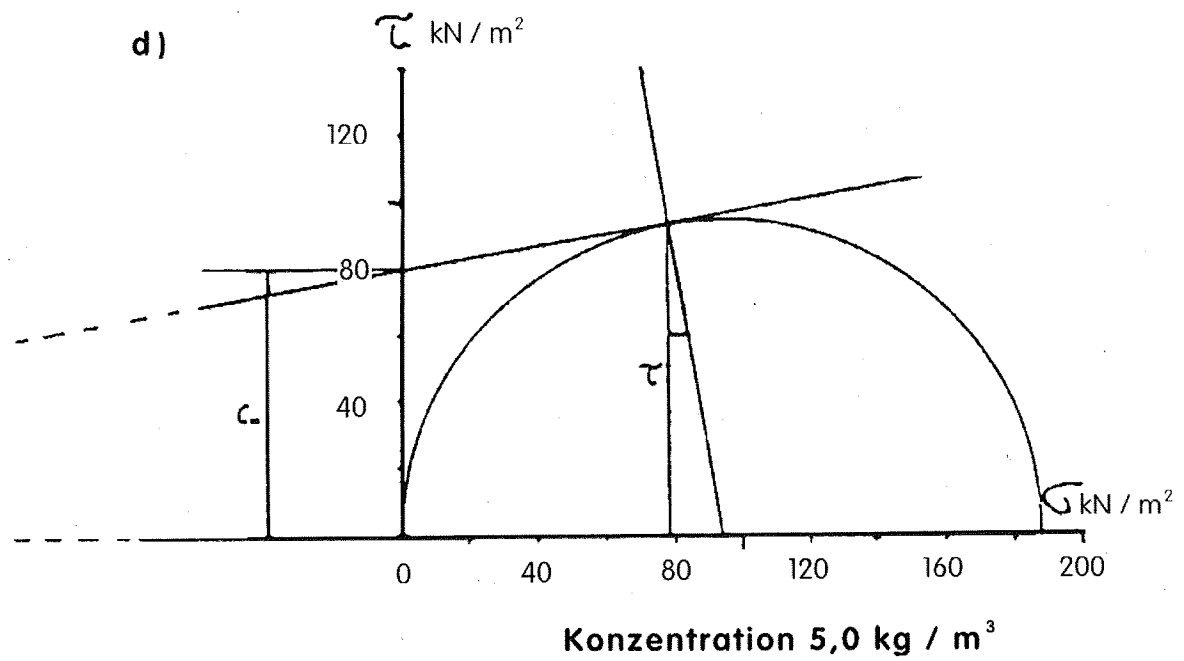
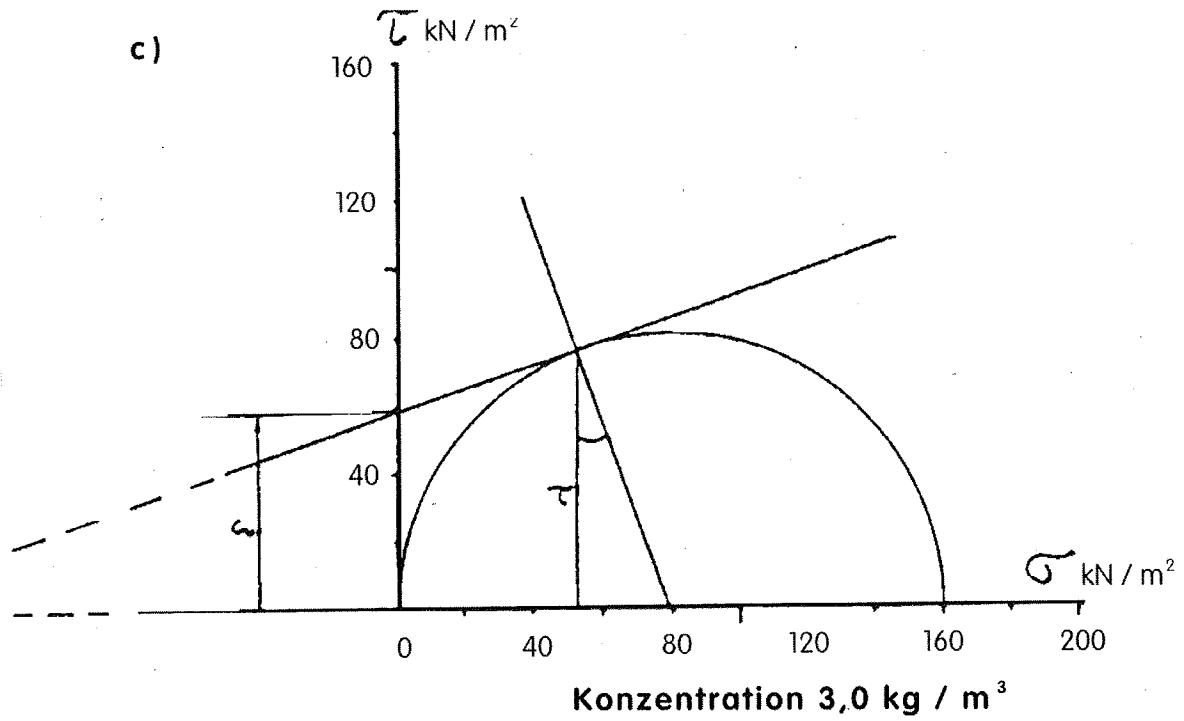
Die Zugabe in der Konzentration von 1,0 - 3,0 und 5,0 kg/m<sup>3</sup> bewirkt eine Erhöhung der einaxialen



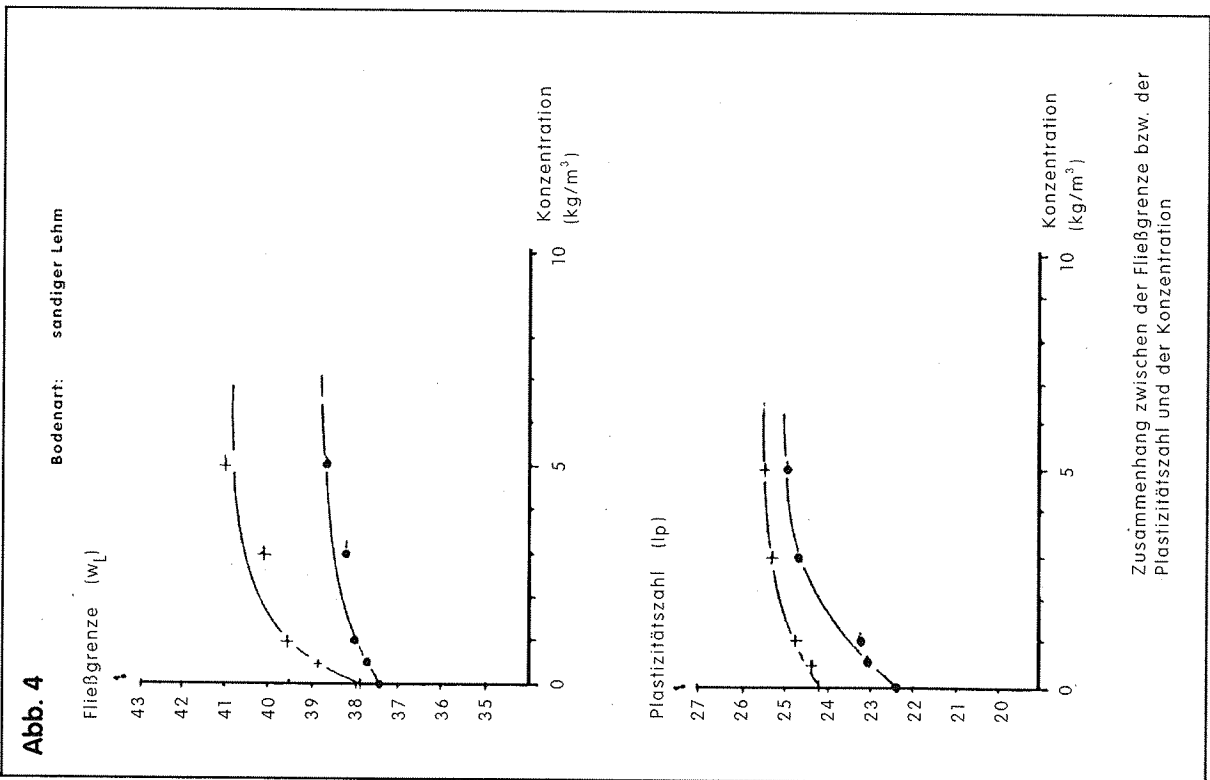
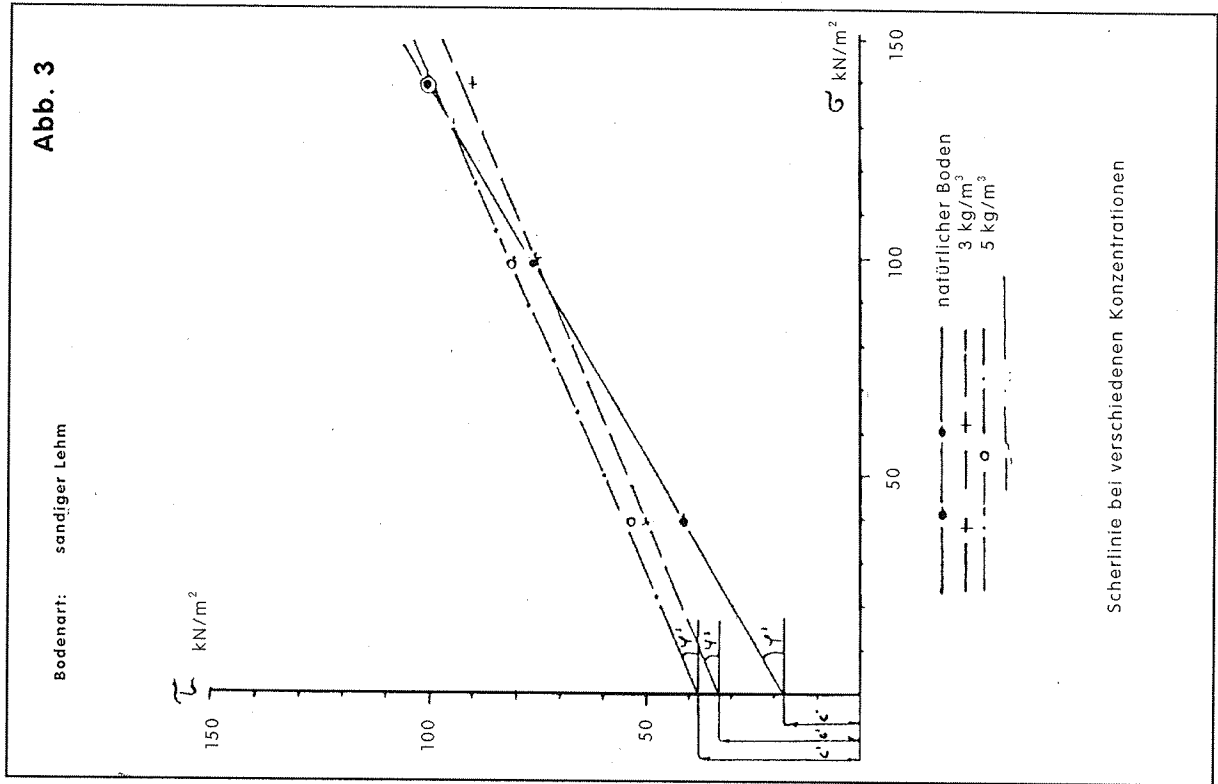


**Abb. 2**

Bodenart: sandiger Lehm



Scherlinien aus einaxialen Druckversuchen  
(Mohrsche Kreise)



Druckfestigkeit auf 190 kN/m<sup>2</sup>. Gleichzeitig ist ein Anstieg der Kohäsion auf 69 kN/m<sup>2</sup> und eine Verringerung des Winkels der inneren Reibung auf 10° festzustellen. Diese mit Hilfe der Mohrschen Kreise gefundenen Zusammenhänge werden in der Abb. 2 dargestellt.

### Sand, unbehandelt

Zur Untersuchung gelangten sogenannte Flugsande mit Dünenbildungen aus Abensberg. Der hellgelbe bis ockerbraune Dünenand ist vom Kornaufbau her sehr einheitlich (U = 1,7). Die Hauptkörnung liegt im Mittel- bis Feinsandbereich (Abb. 5 Kurve 1). Er besteht nahezu zu 100% aus farblosen, eckigen Quarzkörnern. Die Bestimmung des natürlichen Wassergehaltes ergab 4,7%.

Der innere Reibungswinkel ist im Rahmenschergerät mit  $\phi' = 38^\circ$  ermittelt worden. Der Sand hat wegen

seiner Feuchte (Wassersättigung der Poren) eine scheinbare Kohäsion, die unter Wasser oder bei Austrocknung verloren geht. Sie beträgt  $c_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ .

### Sand behandelt

Der Sand wurde mit den Konzentrationen von 3 kg/m<sup>3</sup> und 5 kg/m<sup>3</sup> in Wasser gelöst und dem Boden zugesetzt. Die Verweildauer im Boden war unterschiedlich; sie betrug mindestens 48 Stunden.

Im Scherversuch ist mit der Einbringung von 3,0 bzw. 5,0 kg/m<sup>3</sup> ein Reibungswinkel von 36° ermittelt worden. Dieser liegt um 2° niedriger als beim unbehandelten Boden. Die Kohäsion beträgt einheitlich 7 kN/m<sup>2</sup>, was einer Erhöhung gegenüber dem unbehandelten Boden um 71,4 % entspricht (Abb. 6).

Die folgenden Tabellen 1-3 zeigen weitergehende Zusammenhänge der Kationen-Austausch-Kapazitäten mit den verschiedenen Stoffqualitäten.

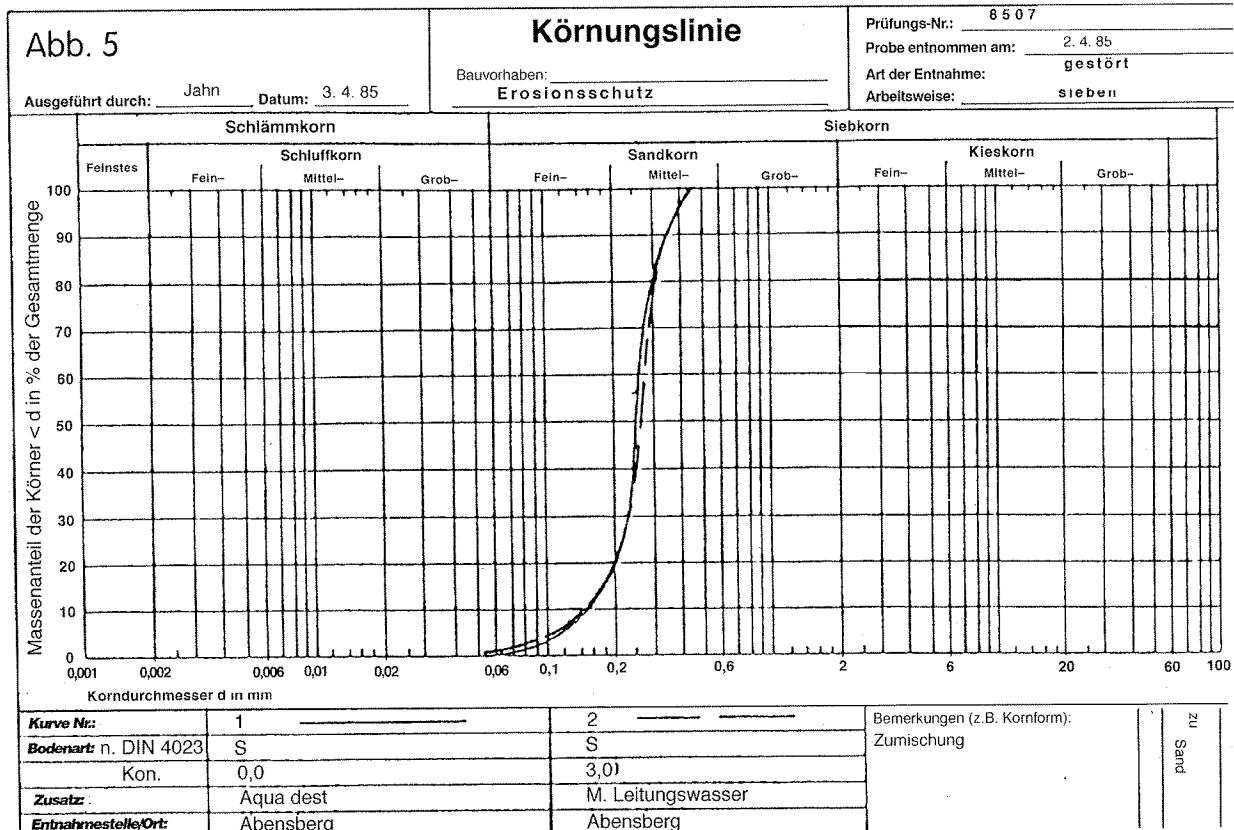


Abb. 6

Zusammenstellung der BODENKENNWERTE  
Bodenart : Sand

Versuchswerte Konzentration kg/m <sup>3</sup>	Konsistenzgrenzen					Scherparameter		einaxiale Druckfestigkeit				
	w %	w <sub>L</sub> %	w <sub>p</sub> %	I <sub>p</sub> %	I <sub>C</sub> -	φ' °	c' kN/m <sup>2</sup>	q <sub>u</sub> kN/m <sup>2</sup>	θ °	c <sub>u</sub> kN/m <sup>2</sup>	φ <sub>u</sub> °	τ kN/m <sup>2</sup>
0,0						38	2					
0,5												
1,0												
3,0						36	7					
5,0						36	7					

Abb. 7

INAKTIVIERUNG VON CADMIUM DURCH IONEN-  
AUSTAUSCH

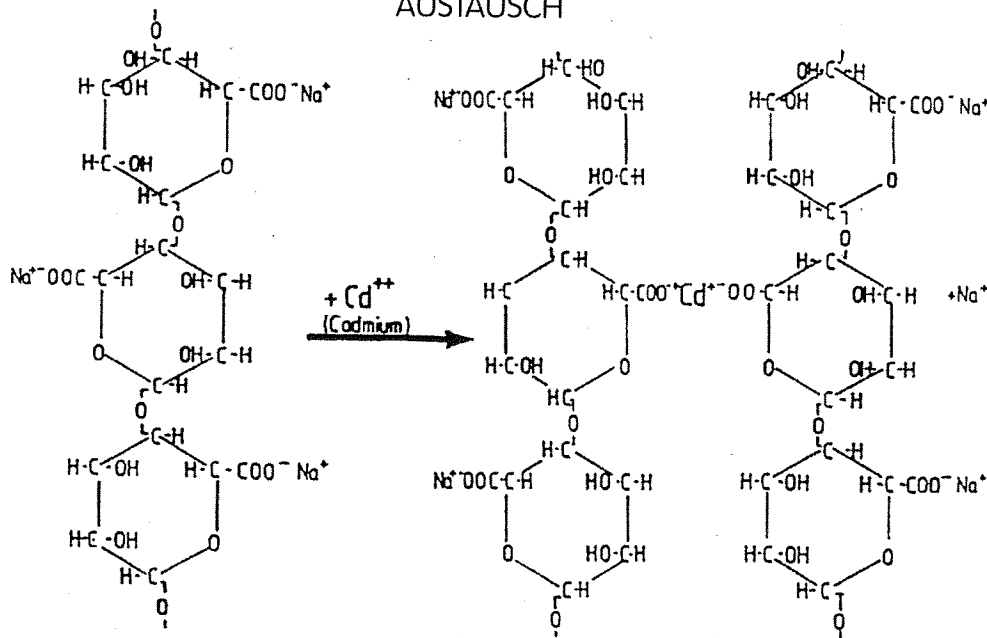


Tabelle 1

## Puffervermögen von TANGINAT im Vergleich zu anderen Ionenaustauschern

CHEM. BEZEICHNUNG BZW. FORMEL (ungepufferte Nährsalze sind auch belastend und schädlich)

g/Val		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kalziumchlorid 55,50	Ca Cl <sub>2</sub> von	0,2	0,6	0,6	0,3	0,0	4,4	5,5	bis	bis	bis
	bis	0,8	2,2	2,2	2,8	5,5	8,3	8,3	19,4	183,7	1110,0
Kalziumsulfat 68,07	CaSO <sub>4</sub> von	0,2	0,7	0,7	0,3	0,0	5,4	6,8	bis	bis	bis
	bis	1,0	2,7	2,2	3,4	6,8	10,2	10,2	23,8	225,3	1361,4
Gips 86,09	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O von	0,3	0,9	0,9	0,4	0,0	6,9	8,6	bis	bis	bis
	bis	1,3	3,4	3,4	4,3	8,6	12,9	12,9	30,1	284,9	1721,8
Kalziumkarbonat 50,04	CaCO <sub>3</sub> von	0,2	0,5	0,5	0,3	0,0	4,0	5,0	bis	bis	bis
	bis	0,7	2,0	2,0	2,5	5,0	7,5	7,5	17,5	165,6	1000,8
Magnesiumchlorid 47,62	MgCl <sub>2</sub> von	0,2	0,5	0,5	0,2	0,0	3,8	4,7	bis	bis	bis
	bis	0,7	1,9	1,9	2,4	4,8	7,1	7,1	15,6	157,6	952,4
Magnesiumsulfat 60,19	MgSO <sub>4</sub> von	0,2	0,6	0,6	0,3	0,0	4,8	6,0	bis	bis	bis
	bis	0,9	2,4	2,4	3,0	6,0	9,0	9,0	21,1	199,2	1203,8
Magnesiumkarbonat 42,16	MgCO <sub>3</sub> von	0,1	0,4	0,4	0,2	0,0	3,4	4,2	bis	bis	bis
	bis	0,6	1,7	1,7	2,1	4,2	5,3	5,3	14,8	139,5	843,2
Natriumchlorid 58,45	NaCl von	0,2	0,6	0,6	0,3	0,0	4,7	5,8	bis	bis	bis
	bis	0,9	2,3	2,3	2,9	5,8	8,8	8,8	20,5	193,5	1169,0
Natriumsulfat 71,03	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> von	0,2	0,7	0,7	0,4	0,0	5,7	7,1	bis	bis	bis
	bis	1,1	2,8	2,8	3,6	7,1	10,7	10,7	24,9	235,1	1420,6
Natriumkarbonat 53,00	NaHCO <sub>3</sub> von	0,2	0,5	0,5	0,3	0,0	4,2	5,3	bis	bis	bis
	bis	0,8	2,1	2,1	2,7	5,3	8,0	8,0	18,6	175,4	1060,0
Natriumbikarbonat 84,01	NaHCO <sub>3</sub> von	0,3	0,8	0,8	0,4	0,0	6,7	8,4	bis	bis	bis
	bis	1,2	3,4	3,4	4,2	8,4	12,6	12,6	29,4	278,1	1680,2
Kaliumchlorid 74,56	KCl von	0,2	0,8	0,8	0,4	0,0	6,0	7,5	bis	bis	bis
	bis	1,1	3,0	3,0	3,7	7,4	11,2	11,2	26,1	246,8	1491,2
Kaliumsulfat 87,13	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> von	0,3	0,9	0,9	0,4	0,0	7,0	8,7	bis	bis	bis
	bis	1,3	3,5	3,5	4,4	8,7	13,1	13,1	30,5	288,4	1742,6
Kaliumcarbonat 69,10	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> von	0,2	0,7	0,7	0,4	0,0	5,5	6,9	bis	bis	bis
	bis	1,0	2,8	2,8	3,5	6,9	10,4	10,4	24,2	228,7	1382,0
Kaliumbikarbonat 100,11	KHCO <sub>3</sub> von	0,3	1,0	1,0	0,5	0,0	8,0	10,0	bis	bis	bis
	bis	1,5	4,0	4,0	5,0	10,0	15,0	15,0	35,0	331,4	2002,2
Ammoniumsulfat 66,06	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> von	0,2	0,7	0,7	0,3	0,0	5,3	6,6	bis	bis	bis
	bis	1,0	2,8	2,8	3,3	6,6	9,9	9,9	23,1	218,7	1321,2

**CHEM. BEZEICHNUNG BZW. FORMEL** (ungepufferte Nährsalze sind auch belastend und schädlich)

g/Val		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ammoniumnitrat $\text{NH}_4\text{NO}_3$	von	0,2	0,8	0,8	0,4	0,0	6,4	8,0	bis	bis	bis
	80,03 bis	1,2	3,0	3,2	4,0	8,0	12,0	12,0	28,0	264,9	1600,6
Ammoniumkarbonat $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	von	0,1	0,5	0,5	0,2	0,0	3,8	4,8	bis	bis	bis
	48,03 bis	0,7	2,0	2,0	2,4	4,8	7,2	7,2	16,8	159,0	960,6
Ammoniumphosphat $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$	von	0,1	0,5	0,5	0,3	0,0	4,0	5,0	bis	bis	bis
	49,69 bis	0,7	2,0	2,0	2,5	5,0	7,5	7,5	17,4	164,5	993,8
Ammoniumhydrogenphosphat $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	von	0,3	1,2	1,2	0,6	0,0	9,1	11,4	bis	bis	bis
	114,00 bis	1,7	4,6	4,6	5,7	11,4	17,1	17,1	39,9	377,3	2280,0
Natriumnitrat $\text{NaNO}_3$	von	0,3	0,9	0,9	0,4	0,0	6,8	8,5	bis	bis	bis
	84,99 bis	1,3	3,4	3,4	4,3	8,5	12,7	12,7	29,7	281,3	1699,8
Kalziumnitrat $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	von	0,2	0,8	0,8	0,4	0,0	6,6	8,2	bis	bis	bis
	82,05 bis	1,2	3,3	3,3	4,1	8,2	12,3	12,3	28,7	271,6	1641,0
Ammoniumbikarbonat $\text{NH}_4\text{HCO}_3$	von	0,2	0,8	0,8	0,4	0,0	6,3	7,9	bis	bis	bis
	79,05 bis	1,2	3,2	3,2	3,9	7,9	11,9	11,9	27,7	261,7	1581,0

**BODENWIRKSTOFFE (CHEMISCH)**

Schwefel S	von	0,05	0,16	0,16	0,08	0,00	1,28	1,60	bis	bis	bis
	16,03 bis	0,24	0,64	0,64	0,80	1,60	2,40	2,40	5,61	53,1	320,6
Schwefelsäure $\text{H}_2\text{SO}_4$	von	0,15	0,44	0,44	0,24	0,00	3,92	4,90	bis	bis	bis
	49,04 bis	0,74	1,96	1,96	2,45	4,90	7,36	7,36	17,16	162,4	980,8
Aluminiumsulfat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$	von	0,33	1,11	1,11	0,55	0,00	8,89	11,11	bis	bis	bis
	111,07 bis	1,67	4,44	4,44	5,55	11,11	16,66	16,66	38,87	367,9	2221,4
Eisensulfat $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	von	0,42	1,39	1,39	0,69	0,00	11,12	13,90	bis	bis	bis
	139,01 bis	2,09	5,56	5,56	6,95	13,90	20,85	20,85	48,65	460,4	2780,2

Tabelle 2

Spaltennummer in vorheriger Tabelle:	Ionenaustauscher	Kationenaustausvermögen (KAK) mVal//100 g
1	Kaolinit (Tonkolloid)	3 - 15
2	Chlorit (Tonkolloid)	10 - 40
3	Illit (Tonkolloid)	10 - 40
4	Halloysit (Tonkolloid)	5 - 50
5	Weißtorf (organ. Kolloid)	0 - 100
6	Montmorillonit (Tonkolloid)	80 - 150
7	Vermiculit (Tonkolloid)	100 - 150
8	Gut verrotteter Stallmist (organ. Kolloid)	bis 350
9	TANGINAT-WEM (organ.-mineral. Kolloid)	bis 3312
10	TANGINAT-Bodengranulat (organ. Kolloid)	bis 20000

Tabelle 3

#### TANGINAT PUFFERVERMÖGEN BEI TOXISCHEN SCHWERMETALLEN

Thallium		bis
Tl	204	4080 g
Cadmium		bis
Cd	56	1120 g
Strontium		bis
Sr	43,8	876 g
Quecksilber		bis
Hg	100,3	2006 g
Blei		bis
Pb	103,6	2072 g
Chrom		bis
Cr	26,0	520 g
Vanadium		bis
V	25,47	509 g
Kupfer		bis
Cu	63,54	1270 g

Inzwischen sind zahlreiche **erfolgreiche Anwendungen dieser Technologie** erfolgt. So z.B. wurden Bodennägel und Verklebungen der Mutterbodenkappe oder anderer Oberschichten durchgeführt, wobei die Zusätze jeweils als deutliche Wirkungserhöhung dadurch erkennbar waren, daß die Wurzelbildung der Vegetationsauflage zu erheblich erweiterter Stabilisierung beigetragen haben.

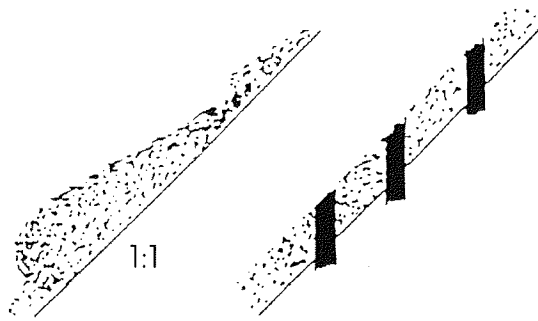
Das vorgenannte Zusatzmittel verfügt außerdem über die Eigenschaft der Pufferung von Schwerme-

tallen (Abb. 7) mit einer Austauschkapazität von 20.000 - 36.000 mVal/100 g als Dimensionsgröße. Die Einbringung der Zusätze geschieht durch Vermischen oder durch Injektion.

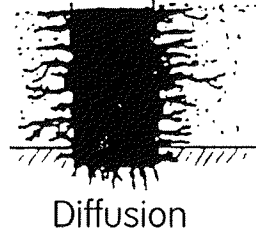
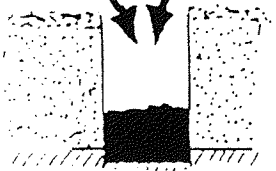
Es wurden von uns bereits erfolgreiche Problemlösungen für die Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft in Senftenberg und das Institut für Bergbau- und Folgegeschäden in Finsterwalde erstellt.

# EROSIONSSCHUTZ DURCH TANGINAT

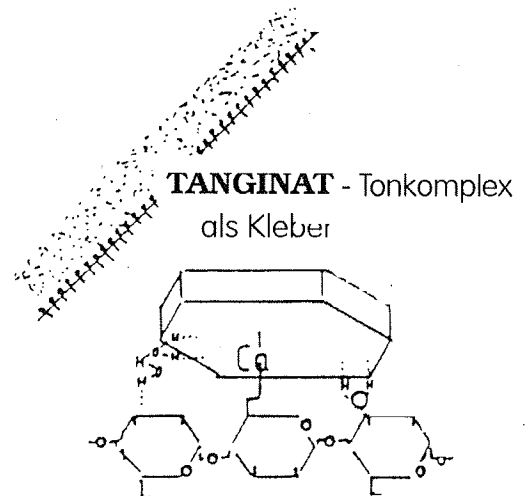
**TANGINAT** - BODENNAGEL gegen  
Oberbodenrutschung



**TANGINAT** Sand  
+Wasser



Verklebung der Mutterbodenkappe  
mit dem Unterboden



## Literatur

CANAWAY, P.M. : The effects of two rootzone amendments. Research Institute Bingley-West Yorkshire, 1986

BASCK, K.; SEYDLITZ, E. : Erosionsschutz - Forschungsauftrag. Baugrundlabor München, 1986

KASELOW: Elimination mit Algenpräparaten, 1988

SCHMID, R. : Kationenaustauschkapazität. Universität Hohenheim, 1987

HÜLSENBERG, C. : Bodenökologische Untersuchungen. Justus Liebig Universität, 1989

BLUNDEN: Optimal Growth of Plants. Portsmouth-Polytec, 1987

HASSAN, ESMAT A. and EL-MOURSİ, E.: Vegetative Growth. National Research Centre - Cairo - Dokki, 1981

SCHEID, E. : Umweltschutztechnik - Bodentechnologien, Berlin, 1990

Dipl. Ing. Ernst Scheid  
E. SCHEID GmbH  
Ingenieurbüro für Boden- und Gewässerschutz,  
Messen und Prüfen im Bausektor  
Außenstelle Berlin - Brandenburg, Berlin



# Geotechnische Eignungsprüfungen von Deponiematerialien

Hans-Volker Huth, Ingenieurbüro für Boden- und Gewässerschutz, Außenstelle Berlin - Brandenburg

## 1. Einleitung

Die Standortfindung, Entwurfsbearbeitung, Bauausführung, Überwachung sowie das Betreiben und die Sanierung von Deponien erfordern die konsequente Anwendung und Weiterentwicklung der analytischen und numerischen Berechnungsmethoden in der Geotechnik des Umweltschutzes.

Die Anwendung von geotechnischen Berechnungsverfahren setzt Kenntnisse der Stoffgesetze von Deponiestandorten und -baumaterialien voraus. Nur dann lassen sich die Berechnungsergebnisse zutreffend interpretieren und wirtschaftlich in die Planung und bei der Ausführung von Deponien umsetzen. Der Arbeitskreis „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ (JESSBERGER, 1990) fordert daher u.a. das Spannungs-Verformungs-Verhalten des Untergrundes als Deponiebaugrund, der Basis- sowie Oberflächendichtungssysteme und des Abfallkörpers theoretisch und experimentell zu untersuchen.

In der theoretischen Bodenmechanik existiert seit einigen Jahren ein eigenständiger Forschungsbereich, der die Aufgabe hat, theoretisch und experimentell abgesicherte Stoffgesetze für Geomaterialien zu entwickeln (DESAI, GALLAGHER, 1984; DESAI, SIRIWADANCE, 1984; CHEN, BALADI, 1985). Einen besonderen Schwerpunkt in der Stoffgesetzerforschung von Geomaterialien bildet die rationelle, zeit- und kostengünstige experimentelle Bestimmung der in den Materialgleichungen enthaltenen Parameter durch geeignete geotechnische Eignungsprüfungen. Gegenwärtig sind noch keine allgemeinen und standardisierten Verfahren bekannt, mit denen sich unter Verwendung von geotechnischen Prüfeinrichtungen, von Rechentchnik und geeigneter Software die Materialparameter verschiedener Stoffgesetze für Deponiematerialien bestimmen lassen.

## 2. Anforderungen an Stoffgesetze von Deponiematerialien

Jeder Lösung einer kontinuumsmechanischen Randwertaufgabe, welche die Größe der Spannungen

und Verformungen im Deponiebereich angibt, liegen folgende Bedingungen zugrunde:

- **Gleichgewichtsbedingungen** für eine statische Berechnung bzw. Bewegungsgleichungen für eine dynamische Berechnung
- **geometrische Bedingungen** zwischen den Deformationen und Verschiebungen (Kompatibilitätsbedingungen)
- **Anfangs- und Randbedingungen**
- **Stoffbeziehungen.**

Für die Formulierung von Stoffgesetzen gelten folgende, vom konkreten Materialverhalten unabhängige Forderungen (TRUESDALL, 1955; DESAI, 1977, GUDEHUS, 1979):

- Objektivität
- Eindeutigkeit
- Existenz
- Stabilität
- Beschreibung eines allgemeinen Spannungs- und Verformungszustandes
- Handhabbarkeit und ökonomische Durchführung der Berechnungen.

Mathematische Modelle für Prozesse der Deponiegeotechnik (z.B. Stabilität, Setzungsverhalten) verlangen Stoffbeziehungen, die für alle Beanspruchungen geeignet sind, die im betrachteten System auftreten können. Da das wirkliche mechanische Verhalten der Deponiematerialien bei solchen Prozessen vorher nicht exakt bekannt ist, müssen bei der experimentellen Bestimmung des Materialverhaltens möglichst zahlreiche Versuche bei den verschiedensten Spannungs- und Deformationsbedingungen durchgeführt werden. Bei den Experimenten dürfen nur solche kraft- bzw. verformungsgesteuerte Versuchsgeräte verwendet werden, die homogene bzw. weitgehend homogene Verschiebungs- bzw. Spannungsfelder in den Bodenproben erzeugen. Diese Forderung erfüllen strenggenommen nur die „echten“ Triaxialgeräte (GUDEHUS, 1979).

Bei den in der bodenmechanischen Laborpraxis üblichen Versuchsgeräten sind die Homogenitätsforderungen nur teilweise erfüllt (Tab. 1).

Versuchsart	Versuchsdurchführung	Volumenmessung durch	Homogenitätsforderung
	KS-Kraftsteuerung WS-Wegsteuerung	W-Wegmessung V-Volumeter B-Bandage Z-Zellwasser	
echter Triaxialversuch	KS, WS	W	erfüllt
Biaxialversuch	KS, WS	W, Z	nahezu erfüllt
Kompressionsversuch	KS	V	teilweise erfüllt
Zylinderdruckversuch	KS, WS	B, Z	teilweise erfüllt
Zugversuch	KS	-	kaum erfüllt
Ödometerversuch	KS, WS	W	kaum erfüllt
konventioneller triaxialer Kompressionsversuch	KS, WS	B, Z	teilweise erfüllt
konventioneller triaxialer Extensionsversuch	KS, WS	B, Z	teilweise erfüllt
direkter Scherversuch	KS, WS	-	nicht erfüllt
Rotationsscherversuch	KS, WS	-	kaum erfüllt
Einfachserversuch	KS, WS	W	nahezu erfüllt

Tabelle 1: Geotechnische Eignungsprüfungen für Stoffgesetze von Deponiematerialien

### 3. Anforderungen an geotechnische Eignungsprüfungen von Deponiematerialien

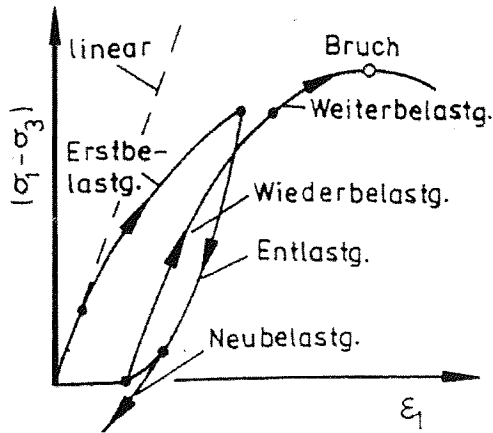
Zwischen den verwendeten Verfahren zur Lösung geotechnischer Probleme der Deponietechnik, der Aufstellung von Stoffgesetzen und der Versuchstechnik besteht ein enger Zusammenhang.

Der einzige Weg, der zur Bestimmung der in den Stoffgesetzen enthaltenen Materialparameter gangbar ist, besteht in der Durchführung geeigneter Labor- und Feldversuche. Dabei ist zu beachten, daß Experimente nur auf der Grundlage eines theoretischen Konzepts geplant, interpretiert und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit eingeschätzt werden können.

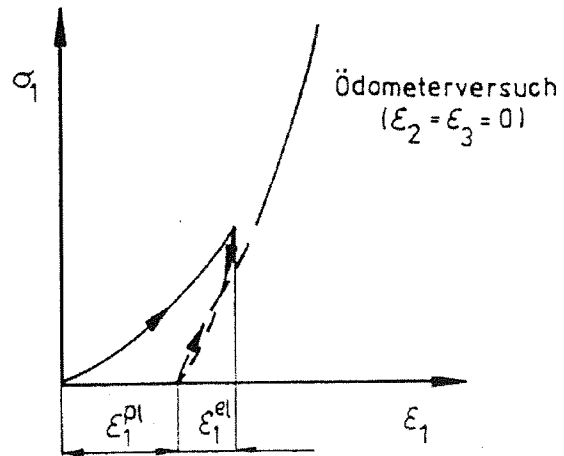
Das alleinige Aufzeichnen von Meßwerten und deren Interpretation ist im Hinblick auf die Anwendung analytischer und numerischer Verfahren in der Geotechnik der Deponien nicht sinnvoll. Eine aus kontinuumsmechanischer Sicht aussagekräftige Versuchsauswertung kann nur erfolgen, wenn die Lösung der entsprechenden Randwertaufgabe des geotechnischen Versuches, nämlich die Verzerrungsgeschichte und die Spannungsverteilung, bekannt ist. Andernfalls kann keine eindeutige Unterscheidung zwischen Materialeigenschaft und Einfluß, der aus der geometrischen Form des Probekörpers herrührt, getroffen werden. Hieraus folgt, daß es angebracht

ist, wenige, jedoch qualitativ hochwertige Versuche durchzuführen, statt einer Vielzahl unter im strengen Sinne falschen Randbedingungen. Bei der Auswahl geeigneter Prüfmaschinen, geotechnischer Versuchsgeräte sowie des durchzuführenden Versuchsplanes sollte sich an den komplexen stofflichen Eigenschaften von Geomaterialien orientiert werden:

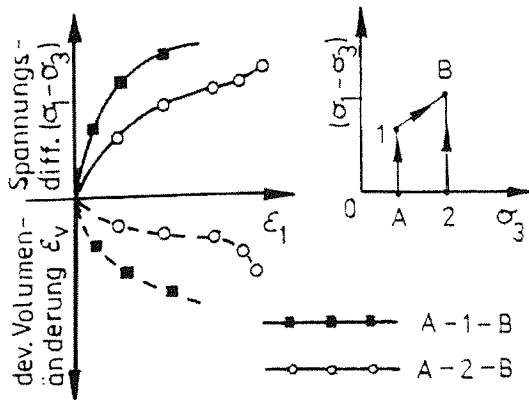
- ausgeprägte physikalische und geometrische Nichtlinearität im Spannungs-Verformungsverhalten bei Erstbelastung, Entlastung sowie Wiederbelastung (Abb. 1a)
- unterschiedliches Materialverhalten im Druck- und Zugbereich
- gekoppelte elastische und plastische Formänderungen auch bei geringen Belastungen (Abb. 1b)
- Spannungs- und Verformungspfadabhängigkeit (Abb. 1c)
- Einfluß der Belastungs- bzw. Verformungsgeschwindigkeit (Abb. 1d)
- Volumenänderungen sowohl bei Normal- als auch bei Scherbeanspruchungen (Kontraktanz und Dilatanz, Abb. 1e)
- Einfluß der mittleren Hauptspannung auf das Verformungs- und Bruchverhalten
- Ver- und Entfestigung nach Erreichen des Fließ- bzw. Bruchzustandes (Abb. 1f)
- anisotropes Verhalten aufgrund der Entstehungs- und Belastungsgeschichte
- Hystereseerscheinungen bei großen Lastwechseln.



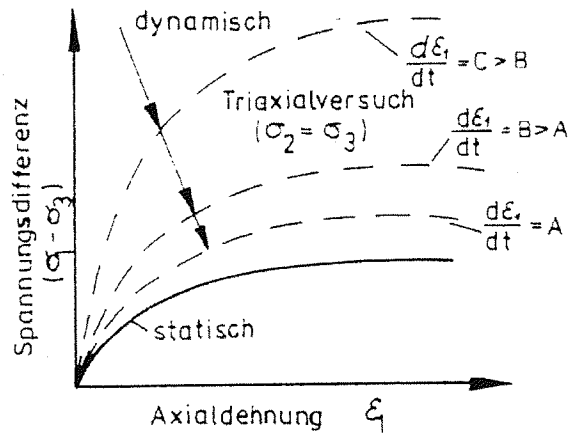
a) Be-, Ent-, Wieder-, Weiter- und Neubelastung



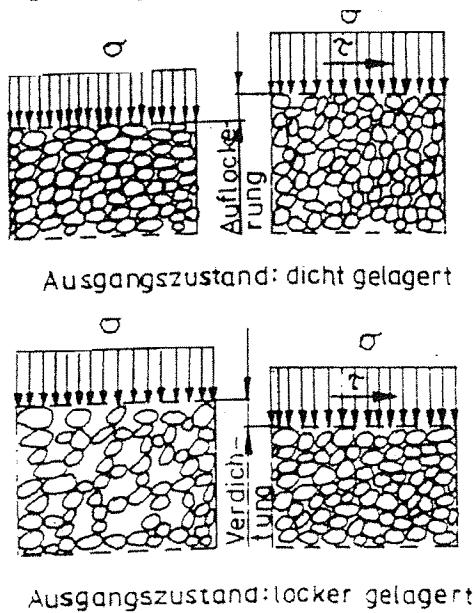
b) Elastisch-plastische Anteile



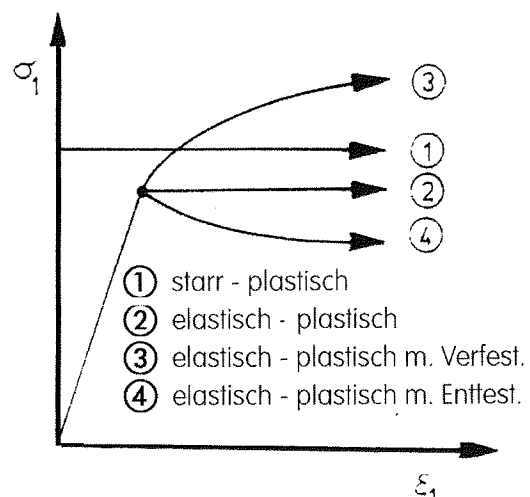
c) Spannungspfad



d) Deformationsgeschwindigkeit



e) Auflockerung, Verdichtung



f) Ver- und Entfestigungsverhalten

Abb. 1: Einflußgrößen von Deponiematerialien auf geotechnische Eignungsprüfungen

#### 4. Zusammenfassung

Zwischen den verwendeten Verfahren zur Lösung eines geotechnischen Problems, der Aufstellung von Material- und Stoffgesetzen von Deponiematerialien und der Versuchstechnik besteht ein enger Zusammenhang. Einerseits sollten Spannungs-Verformungs-Beziehungen für Deponiematerialien hinreichend allgemein sein, daß möglichst alle wesentlichen bei Deponien auftretenden geotechnischen Effekte wiedergegeben werden, und andererseits genügend speziell, so daß alle Materialkennwerte, welche die Stoffeigenschaften repräsentieren, durch hinreichend wenige, technisch realisierbare Experimente konkret bestimmbar sind. Dabei ist zu beachten, daß geotechnische Eignungsprüfungen nur auf der Grundlage eines theoretischen Konzeptes geplant, interpretiert und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit eingeschätzt werden können.

Beim gegenwärtigen Stand der Versuchstechnik sind für geotechnische Zielstellungen der Deponietechnik nur kraft- bzw. verformungsgesteuerte Zylinderdruckversuche, Ödometer und konventionelle Triaxialversuche sowie Scherversuche durchführbar.

Die Durchführung geotechnischer Eignungsprüfungen von Deponiematerialien stellt eine anspruchsvolle und teilweise schwierig zu lösende Aufgabe dar, die umfangreiche Erfahrungen des Bearbeiters auf den Gebieten der

- Kontinuumsmechanik
- geotechnischen Meßtechnik
- numerischen Methoden der Mathematik
- Versuchsauswertung und -interpretation erfordert (HUTH, 1990).

#### 5. Literatur

JESSBERGER, H.L. u.a.: Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponien und Altlasten“. GDA.-Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1990

DESAI, G.S.; GALLAGHER, R.H. (Eds.): Mechanics of engineering materials. -Chichester: Wiley and Sons, 1984

DESAI, G.S.; SIRIWARDANCE, H.J.: Constitutive laws for engineering materials. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1984

CHEN, W.-F.; BALADI, G.Y.: Soil plasticity. Theory and Implementation. -Elsevier Science Publisher, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1985

TRUEDELLE, C.A.: Hypoelasticity. Journal of Rational Mechanics and Analysis, 4 (1955) 1, S. 83-133

DESAI, C.S.: Numerical methods in geotechnical engineering. - Mc Graw Hill, New York, 1977

GUDEHUS, G.: Stoffgesetze der Bodenmechanik. In: Grundbau - Taschenbuch, Band I, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst u. Sohn, 1979

HUTH, H.-V.: Zusammenstellung von Grundlagen und Konzepten von Spannungs- und Verformungs-Beziehungen für Böden sowie Beschreibung von Methoden zur Parameterbestimmung in Stoffgesetzen. -Monografie, Humboldt-Universität zu Berlin, 1990 (unveröff.)

*Dr.-Ing. habil. Hans-Volker Huth  
E. Scheid GmbH  
Ingenieurbüro für Boden und Gewässerschutz,  
Messen und Prüfen im Bausektor  
Außenstelle Berlin-Brandenburg, Berlin*



# Einsatz eines Tonminerals als mineralische Basisabdichtung im Deponiebau

(Friedländer Blauton und seine Anwendung für mineralische Abdichtungen, insbesondere im Deponiebereich)

Hans-Gerd Franke, ORA Handels GmbH & Co., Berlin

**D**as Friedländer Blauton-Tonmehl wird aus einer ergiebigen Lagerstätte in der Nähe der mecklenburgischen Stadt Friedland gewonnen. Der Friedländer Blauton ist ein blaugrauer, schwach schluffiger, wenig verfestigter mariner Ton. Er wurde während des eozänen Tertiärs vor ca. 67 Millionen Jahren in einem Meeresbecken abgelagert. Seine jetzigen schollenartigen Lagerungsverhältnisse sind auf die von Norden vordringenden Eismassen während des Pleistozäns vor 1,5 Millionen Jahren zurückzuführen. Das Friedländer Blauton-Vorkommen erstreckt sich auf einer Fläche von 2,8 km<sup>2</sup> und besitzt Mächtigkeiten bis zu 130 m. Aufgrund der marinen Genese weist die Lagerstätte eine große Homogenität auf.

Der Friedländer Blauton besteht zwischen 70 und 75% aus Tonmineralien, deren Anteil Quarz liegt zwischen 20 und 25%. Tonmineralogisch wird der Rohstoff etwa zu gleichen Teilen Smektit und Illit dominiert, enthält aber auch einen Anteil von ca. 10% Kaolinit.

Bei der Kornverteilung werden ca. 70% Feinstkornanteil gemessen, die Schlufffraktion liegt bei ca. 27% und ca. 3% beträgt der Anteil Feinsand.

Diese Werte werden über die gesamte Lagerstätte hinweg mit großer Homogenität erreicht. Ein Verschneiden unterschiedlicher Massen bzw. das Selektieren weniger geeigneten Materials entfällt somit. Hinsichtlich der plastischen Eigenschaften sprechen wir bei dem Friedländer Blauton von einem ausgeprägt plastischen Ton.

Der Gehalt an organischen Bestandteilen liegt unter dem laut TA-Siedlungsabfall festgeschriebenen Maximalwerten. Der Friedländer Blauton ist mit ca. 0,6% als nahezu kalkfrei einzustufen. Der Grenzkalkgehalt in mineralischen Dichtungen von < 15% ist sofern von Bedeutung, daß kalkhaltige Mergel mit Friedländer Blauton-Tonmehl verbessert werden können.

Gemäß dem Aktivitätsdiagramm nach Skempton ergibt sich für den Friedländer Blauton ein „aktives Materialverhalten“.

Trotz des stark bindigen Charakters zeigt der Blauton in den Verdichtungsversuchen ein relativ gutes Verdichtungsverhalten. Die an den Einzelproben des einfachen und modifizierten Proctorversuches durchgeführten Durchlässigkeitsversuche bestätigen

diese Feststellung und liefern Ergebnisse zwischen  $5 \times 10^{-11}$  und  $5 \times 10^{-12}$ . Die äußerst geringen Durchlässigkeitsbeiwerte werden auch im Feldversuch erreicht. Voraussetzung hierfür ist die Optimierung der gerätetechnischen und baubetrieblichen Randbedingungen mit dem Ziel einer gleichmäßigen Verdichtung und Homogenisierung.

Der natürliche Wassergehalt von ca. 32% liegt im Bereich des Proctorwassergehaltes. Ein Verdichtungsgrad  $D_p > 95\%$  der einfachen Proctordichte sowie ein Luftporenanteil  $n_a < 5\%$  werden erreicht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die in den neuesten Richtlinien an mineralisches Dichtungsmaterial gestellten Anforderungen von dem Friedländer Blauton in allen Belangen eingehalten werden.

Die für die großtechnische Herstellung einer mineralischen Abdichtung erforderliche zusätzliche Optimierung der Verdichtungsgeräte, endgültige Einbaulagenstärke, Zahl der Übergänge sowie Art und Intensität der Vorzerkleinerung sind unabhängig von Eignungsprüfungen durch ergänzende Prüfungen über Probeverdichtungen in Versuchsfeldern, abgestimmt auf das konkrete Bauvorhaben, vorzunehmen.

Aufgrund seiner mineralischen Zusammensetzung und seiner geotechnischen Eigenschaften ist der Friedländer Blauton vor allem zur Vergütung von Böden prädestiniert.

Je nachdem welche Anforderungen an den Durchlässigkeitsbeiwert, den Tonmineralgehalt und den Gehalt an Feinstkorn beim jeweiligen Projekt stehen und je nach Beschaffenheit des zu vergütenden Bodens werden unterschiedliche Anteile Friedländer Blauton-Tonmehl dem zur Verfügung stehenden Material zugemischt.

Im ungünstigsten Fall der Vergütung eines einkörnigen Sandes werden zum Erreichen des Durchlässigkeitsbeiwertes  $k < 1 \times 10^{-10}$  ca. 12% Friedländer Blauton-Tonmehl in Ansatz gebracht.

Meistenteils stehen zur Bodenvergütung gemischtkörnige Materialien zur Verfügung, die bereits einen bestimmten Anteil an Feinstkornfraktion unter 2 µm bzw. einen Anteil von Tonmineralien enthalten, so daß zum Erreichen der geforderten Parameter wesentlich geringere Zugaben aufzubringen sind.



Hinsichtlich der Eignung für Deponieabdichtungen werden die Tone in zwei Gruppen eingeteilt, und zwar Tone mit hohem Smektitanteil und Tone mit hohem illitischen-kaolitischen Anteilen.

Die Tone mit hohen quellfähigen Bestandteilen (Smektite) besitzen ein hohes Sorptionsvermögen, sind jedoch anfällig für Quell- und Schrumpfmechanismen und haben nur eine relativ geringe chemische Beständigkeit. Die Porenraumversiegelung ist optimal bei anorganischen Sickerwasserbestandteilen, jedoch relativ unsicher bei organischen Sickerwasserbestandteilen.

Beim Friedländer Blauton haben wir aufgrund der natürlich vorliegenden tonmineralogischen Zusammensetzung sehr günstige Voraussetzungen für die Schadstoffrückhaltung auf der einen Seite sowie Abdichtungswirkung auf der anderen Seite.

Betrachten wir die Anforderungen, die künftig an mineralische Abdichtungssysteme gestellt werden, so wird ersichtlich, daß die Qualität der zur Anwendung kommenden Tone sehr hoch sein muß. Die Anforderungen an mineralische Abdichtungen können am besten erfüllt werden, wenn geeignete Dichtungsmaterialien homogen bei angemessener Qualitätssicherung in die Deponieabdichtungssysteme eingebaut werden.

Grundsätzlich werden Dichtungsmaterialien bevorzugt, die gegenüber einer breiten Palette von chemischen Beanspruchungen beständig sind sowie ein hohes Rückhaltevermögen gegenüber Schwermetallen und organischen Sickerwasserstoffen besitzen.

Die mineralischen Abdichtungssysteme können durch physikalische, chemische sowie biologische Faktoren beansprucht werden. Es ist daher sicherzustellen, daß alle Beanspruchungen ohne Beeinträchtigungen des Gesamtsystems aufgenommen werden können.

Für die Abdichtungswirkung von mineralischen Dichtungsmaterialien ist deren Erosions- und Suffosionssicherheit von Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Dichtungsschichten aus Mischböden mit vernachlässigbarer Zugfestigkeit bzw. Kohäsion. Gemäß den einschlägigen Richtlinien und Empfehlungen ist primär die Kontaktersion bzw. -suffosion an der Grenzfläche Dichtungsschicht/Auflager von Bedeutung.

Auf der Grundlage von klassifizierenden Untersuchungen wurde der Nachweis ausreichender Sicherheit gegen Kontaktersion bzw. -suffosion rechnerisch durch Anwendung von in der Literatur veröffentlichten Grenzkriterien geführt. Durch die Berechnung wird bestätigt, daß das für die mineralische Barriere vorgesehene Tonmehl-Sand-Gemisch gegenüber dem Material des Auflagers (schwach feinsandiger Mittelsand) sowohl erosions- als auch suffosionssicher eingestuft werden kann.

Gegenüber chemischen Beanspruchungen ist der Friedländer Blauton aufgrund der tonmineralogischen Zusammensetzung sowie des sehr geringen Kalkgehaltes von ca. 0,5% und des Gehaltes an organischen Bestandteilen gemessen in Corg-Gehalt von ca. 0,9 % in hohem Maße resistent. Das betrifft sowohl die Beanspruchung durch Niederschlag als auch Sickerwasser.

Aus den bereits dargestellten Beanspruchungsfaktoren ergeben sich die Anforderungen an das Dichtungsmaterial und an die eingebaute Dichtungsschicht.

Die wichtigste Anforderung an das Dichtungsmaterial ist eine möglichst geringe Durchlässigkeit gegenüber Wasser sowie zusätzlich bei Basisabdichtungen gegenüber Schadstoffen unter Berücksichtigung des Stofftransportes, der durch Konvektion, Diffusion und Sorption bestimmt wird. Die Abdichtungseigenschaften müssen durch die Stabilität des mineralischen Abdichtungsmaterials gegenüber hydraulischen, statischen und verformungsbedingten Beanspruchungen gewährleistet werden.

Um eine Homogenität der mineralischen Abdichtungsschicht zu erreichen, ist bereits bei den Ausgangsmaterialien auf eine geringe Parameterstreuung zu achten, damit die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse und somit die Qualitätssicherung möglich ist.

Für die eine Komponente, den Friedländer Blauton-Tonmehl, ist die Homogenität sehr hoch. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 2,8 und 7,4% in einem sehr niedrigen Bereich, somit kann beispielsweise der Tonmineralgehalt exakt eingestellt werden, ohne daß weitere aufwendige Untersuchungen erforderlich sind.

Bei der Eignungsprüfung gemischtkörniger Dichtungsmassen ist natürlich auch der anstehende Boden bzw. das Material, dem Friedländer Blauton zugemischt wird, zu untersuchen und die generelle Eignung festzustellen sowie die nach erfolgter Vergütung erreichten Werte zu dokumentieren. Der  $k$ -Wert spielt dabei nach wie vor eine wichtige Rolle.

Entscheidend für die mineralische Basisabdichtung der Deponieklasse II ist aber der Gehalt an Feinstkorn  $< 2 \mu\text{m}$ , der nach der TA-Siedlungsabfall mindestens 20% betragen soll, wovon die Hälfte aus Tonmineralien bestehen muß. Für die geologische Barriere, gleich, ob natürlich vorhanden oder mit technischen Mitteln hergestellt, ist in verschiedenen Ländervorschriften ein Tonmineralgehalt von mindestens 10% erforderlich. Für die Wirksamkeit der geologischen Barriere, ob natürlich vorhanden oder mit technischen Maßnahmen hergestellt, ist bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit von  $k \cdot 10^{-8} - 10^{-7} \text{ m/s}$  das Schadstoffrückhaltevermögen der Tonminerale von entscheidender Bedeutung. Das beim Friedländer Blauton natürlich vorhandene Verhältnis der

Tonminerale Smektit, Illit und Kaolinit ist für die Wirkung der geologischen Barriere geradezu ideal, da sowohl die Resistenz der Tonminerale wie auch die Schadstoffrückhaltung in hohem Maße gegeben sind.

Durch entsprechende Voruntersuchungen im Labor wird das Mischungsverhältnis von Friedländer Blauton-Tonmehl zu anstehendem Material ermittelt, bei dem die Anforderungen der TA Siedlungsabfall bzw. der im konkreten Fall angewandten Vorschriften sicher erfüllt werden.

Bei jedem Bauvorhaben sind die Eignungsprüfungen für das vorgesehene mineralische Dichtungsmaterial rechtzeitig vor Baubeginn durchzuführen. Nach den Eignungsprüfungen im Labor werden Probeverdichtungen in Versuchsfeldern durchgeführt.

Unter Probeverdichtungen sind Verdichtungsprüfungen in begrenzten Versuchsfeldern zu verstehen, die generell vor Beginn der Erdarbeiten und zwar grundsätzlich innerhalb des eigentlichen Baufeldes angelegt werden. Die Lage ist dabei so zu wählen, daß die Auflagerfläche und der Aufbau den späteren Baustellenbedingungen entspricht.

Zweck der Probeverdichtung ist, für das jeweilige Dichtungsmaterial und den vorhandenen Untergrund die geeigneten Verdichtungsgeräte oder Gerätekombinationen nach Art und Arbeitsweise festlegen zu können. Ziel ist es, die entscheidenden Parameter Homogenität und Dichtigkeit zu optimieren. Dafür muß außerdem die erforderliche Anzahl der Verdichtungsübergänge in Abhängigkeit von der jeweiligen Schütthöhe ermittelt werden.

Es wird untersucht, ob die Werte für Dichte, Wassergehalt und Durchlässigkeitsbeiwerte, die mit den im Labor verdichteten Proben ermittelt worden sind, auch beim Einbau mit Erdbaugeräten erreicht werden können. Die Ergebnisse der Untersuchung dienen als Grundlage zur Festlegung der Einbau- und Abnahmekriterien für die Abdichtungsschicht. Die Ergebnisse der Eignungsprüfung einschließlich der Versuchsfelderergebnisse sind zu dokumentieren. Die im Labor ermittelten Ergebnisse müssen sich dabei in den Versuchsfeldergebnissen widerspiegeln.

Probleme bereiten dabei häufig die beträchtlichen Schwankungen der Qualität vieler Lehm- und Tonlagerstätten. Bei Variationskoeffizienten von über 20 ja sogar 50 bis 100% können keine für Deponie erforderlichen homogenen Qualitäten in der mineralischen Dichtungsschicht erreicht werden.

Über bestimmte Transportentfernungen hinweg ist der Einsatz von Rohton, der in der Regel im ungemischten grubenfeuchten Zustand eingebaut wird, nicht mehr ökonomisch. Außerdem ist die Belastung öffentlicher Verkehrswege beim Transport von Rohton im Vergleich zur Anwendung von Friedländer Blauton-Tonmehl etwa 10x so hoch. Stellt man

sich vor, daß allein für die Basisabdichtung einer mittleren Deponie schon etwa um die 100.000 t Ton zu transportieren sind, so ist das ebenfalls ein umweltbelastender Faktor.

Die Anwendung des Friedländer Blauton-Tonmehles bringt hier deutliche Vorteile. Das Blauton-Tonmehl ist bei der Verarbeitung im Vergleich zu hochquellfähigen Tonmineralezeugnissen unkompliziert zu verarbeiten und weniger empfindlich gegen extreme Witterungseinflüsse. Die Gefahr, daß die geringe Durchlässigkeit sich nach Kontakt mit deponiebürtigen Stoffen verändert, besteht im Gegensatz zu den hochquellfähigen Tonerzeugnissen ebenfalls nicht. Das Friedländer Blauton-Tonmehl ist für die verschiedensten Arten der mineralischen Abdichtung eine echte Alternative. Die 1992/93 mit Friedländer Blauton-Tonmehl bzw. grubenfeuchtem Ton basisabdichteten Deponien erfüllen alle Anforderungen an die mineralische Dichtungsschicht.

Überzeugen Sie sich selbst von der Qualität und den Anwendungsmöglichkeiten der Friedländer Tonminerale.

*Ing. Hans-Gerd Franke  
ORA Handels GmbH & Co.  
Ex- und Import KG, Berlin*



# Geokunststoffe im Deponiebau

Lutz Wichter, Technische Universität Cottbus,  
Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik

## 1. Einleitung

Geokunststoffe sind aus dem modernen Deponiebau nicht mehr wegzudenken. Die Industrie hat in den letzten beiden Jahrzehnten eine Vielzahl von Produkten für verschiedenste Aufgabenstellungen entwickelt, die zunächst im Erdbau und Verkehrswegebau zur Anwendung kamen. Mit der Verknappung des Deponieraums und dem steigenden Bewußtsein für den Schutz der Umwelt fanden sie mehr und mehr auch Anwendung in der Deponietechnik. Inzwischen gibt es viele Produkte, die speziell für den Einsatz in Deponien entwickelt wurden, und der Deponiesektor ist ein wichtiger Marktbereich der ehemals vornehmlich im Textilgeschäft tätigen Firmen geworden.

Die Aufgaben der im Deponiebau verwendeten Produkte kann man (wie beim Erdbau) definieren. Sie sollen

- Abdichten
- Trennen
- Schützen
- Filtern
- Dränieren
- Bewehren.

Diese Aufgabenstellungen bestimmen über die Wahl der Grundstoffe und ihre Verarbeitung zu den entsprechenden Flächengebilden: Kunststoffdichtungsbahnen, Vliesen, Geweben, Gittern und sogenannten zusammengesetzten Produkten (wie z.B. Bentonitmatten). Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die verschiedenen Produkte und ihre Einsatzbereiche bei den Deponieklassen I und II gegeben werden. Der Einsatz von Geokunststoffen in Sonderabfalldeponien (Deponiekategorie III) wird nicht behandelt. Ausführliche Informationen sind in den Produktbeschreibungen der Hersteller enthalten.

## 2. Abdichten

Im Deponiebau werden Basisabdichtungen und, nach der Schließung der Deponie oder von Teilbereichen, Oberflächenabdichtungen erforderlich. Die Dichtungssysteme bestehen dabei im einfachsten Fall aus dem (tragfähigen) Unterbau, der eigentlichen Dichtung und einer Schutzschicht. Mit zusätzli-

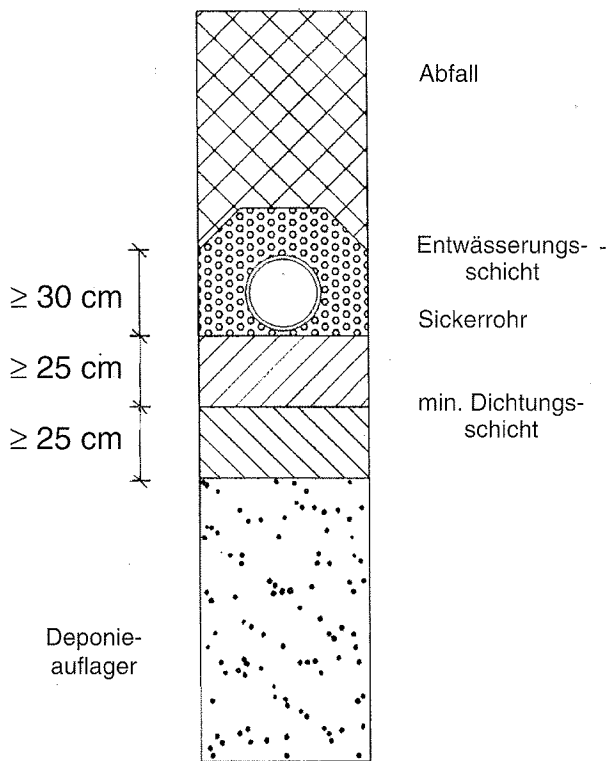
chen Dichtungskomponenten entstehen Doppel- und Mehrfachdichtungen; eine mineralische Dichtung und eine Kunststoffdichtungsbahn bilden zusammen die Kombinationsdichtung, die als Basisabdichtung heute in der Regel zur Ausführung kommt. Die Planung und Herstellung von Deponieabdichtungssystemen soll nach den Bestimmungen der TA Siedlungsabfall erfolgen. Dort ist nach den Abschnitten 10.4.2. auch der Einsatz von Dichtungssystemen möglich, die den Kombinationsdichtungen gleichwertig sind; der Begriff der Gleichwertigkeit ist aber bisher nicht definiert. Für die Bewertung der Gleichwertigkeit soll künftig das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT) in Berlin zuständig sein. Denkbar ist zum Beispiel der Einsatz einer Asphaltabdichtung anstelle einer Kunststoffdichtungsbahn - solche Dichtungssysteme wurden in Baden-Württemberg bereits ausgeführt. Es ist hier nicht der Platz, Vor- und Nachteile alternativer Dichtungssysteme zu diskutieren, zumal oft auch wirtschaftliche Interessen der Industrie beim Vorschlag der Systeme eine Rolle spielen. Die Standardausführungen für Basis- und Oberflächenabdichtungen sind im folgenden skizziert.

### Basisabdichtungen

#### Deponiekategorie I - Mineralstoffdeponien

Für diese bisher als Bauschuttdeponien oder Erdaushubdeponien bezeichneten Deponien sind an den Untergrund keine besonderen Anforderungen an die Dichtigkeit zu stellen. Es wird also keine sog. geologische Barriere verlangt, denn die abgelagerten Stoffe dürfen nur sehr geringe organische Anteile enthalten. In reinen Erdaushubdeponien wird auch Bauschutt nicht mehr angenommen. Die übliche Ausführung einer Basisabdichtung bei neuen Deponien besteht (über einem tragfähigen Untergrund) aus einer mindestens 25 cm mächtigen mineralischen Dichtungsschicht. Auf der mineralischen Dichtung wird eine mindestens 30 cm mächtige Entwässerungsschicht angeordnet. Eine Verwendung von Geokunststoffen ist im Regelfall nicht vorgesehen. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Basisabdichtung für Deponien der Deponiekategorie I. Bei reinen Erdaushubdeponien wird man auf eine besondere Basisabdichtung in vielen Fällen ganz verzichten können.





## Deponieklasse I

Bild 1 Basisabdichtung für Deponien der Deponieklasse I (Mineralstoffdeponien)

### Deponieklasse II - Reststoffdeponien

Reststoffdeponien (auch als Hausmülldeponien bezeichnet) erfordern wegen der größeren Gehalte an organischen Bestandteilen und der damit verbundenen höheren möglichen Schadstofffreisetzung die Erfüllung strengerer Anforderungen an die Auswahl des Deponiestandortes und die Wahl des Systems der Basisabdichtung. Der Untergrund muß die Funktion einer geologischen Barriere erfüllen; wo dies aufgrund der geologischen Gegebenheiten nicht von selbst der Fall ist, muß durch bautechnische Maßnahmen (z.B. Injektionen) eine „geologische“ Barriere hergestellt werden. Auf dem „geologisch dichten“ Untergrund wird im Regelfall eine Kombinationsdichtung aufgebracht. Sie besteht aus einer mindestens 0,75 m mächtigen mineralischen Dichtungsschicht mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von höchstens  $k = 5 \times 10^{-10}$  m/s und einer darüber befindlichen Kunststoffdichtungsbahn aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD). Die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) muß mindestens 2,5 mm dick sein und eine Zulassung für den Einbau in Kombinationsdichtun-

gen besitzen (Zulassungen derzeit nur von der BAM - Bundesanstalt für Materialprüfung).

Bezüglich der Lieferung und des Einbaus gelten:

- Schutz vor jeglicher Art von Beschädigung muß gewährleistet sein.
- Es muß ein Verlegeplan erstellt werden.
- Schweißarbeiten dürfen nur bei Temperaturen über + 5 Grad Celsius von qualifiziertem Personal bei absolut trockenen Verhältnissen ausgeführt werden. Schweißnähte sollten als Doppelnähte mit Prüfkanal hergestellt werden.

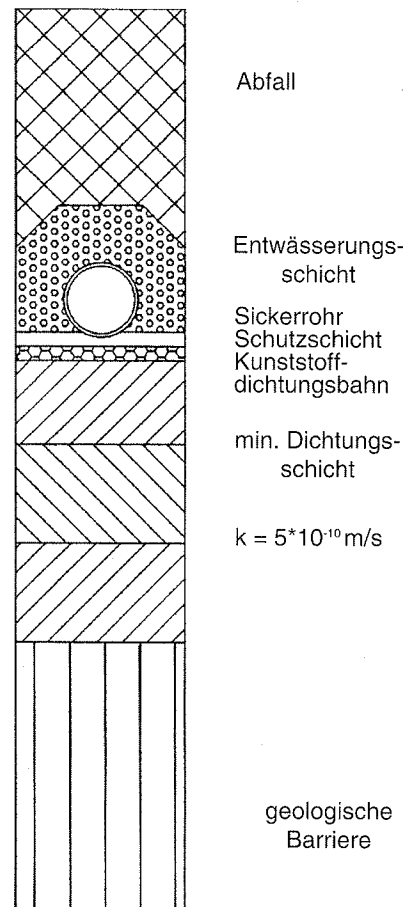
Der Einbau der Dichtungsbahnen stellt wegen der Temperaturdehnung der Bahnen, der Abhängigkeit vom Wetter für die Schweißarbeiten und der notwendigen Koordinierung mit den Erdarbeiten beim Einbau der mineralischen Komponente des Dichtungssystems hohe Anforderungen an Planung und Ausführung bereits bei der Verlegung auf der mehr oder weniger horizontalen Deponiesohle. Beim Einbau auf Böschungflächen werden die Schwierigkeiten noch verstärkt. Hinzu kommt hier, daß durch die Glätte der Oberfläche der Bahnen unter Umständen die standsichere Herstellung der über der KDB anzuordnenden Schichten (sie werden weiter hinten beschrieben) nicht ohne weiteres möglich ist. Um die Schwierigkeiten zu verringern, bieten die Hersteller der Dichtungsbahnen Produkte mit strukturierten Oberflächen (aufgeformte Warzen, Dorne, Stege etc.) an. Weil der sachgerechte Einbau und die Standsicherheit auf den Böschungflächen zu Problemen führen kann, sagt die TA Siedlungsabfall dazu aus, daß „die Art des Deponiebasisabdichtungssystems der Böschungfläche in Abhängigkeit von der Neigung“ festzulegen sei. Laborversuche in Rahmenschergeräten (Flachschergeräten) zur Bestimmung der Scherfestigkeit an den Grenzflächen KDB-mineralische Dichtung und KDB-Schutzschicht sind daher als Grundlage für rechnerische Standsicherheitsbetrachtungen üblich. In der Regel werden dabei Geräte mit Scherflächen von 30 x 30 cm oder 50 x 50 cm benutzt. Es bleibt aber festzustellen, daß z.B. mineralische Schutz- und Entwässerungsschichten auf einer Kunststoffdichtungsbahn bei Starkregen rechnerisch und auch praktisch kaum ganz sicher gegen Abgleiten auszubilden sind; Schadensfälle während der Bauausführung sind also witterungsbedingt nicht auszuschließen, und faire Ausschreibungsunterlagen sollten diesem Risiko Rechnung tragen.

Über der Kunststoffdichtungsbahn ordnet man üblicherweise eine 0,5 m dicke Dränschicht aus (möglichst rundkörnigem) Kies der Körnung 16/32 mm an. Die Wahl der relativ groben Körnung resultiert nicht aus den hydraulischen Anforderungen. Die großen Porenräume sollen sicherstellen, daß sich die Dränschicht während der Existenz der Deponie nicht (im Zweifel also: nie) durch Anlagerung von Bestandtei-

len und Bakterienentwicklung aus dem Reststoffkörper zusetzt. Kies mit Rundkorn der Korndurchmesser 16/32 ist in manchen Gebieten Deutschlands selten und damit teuer. Alternativ hat man daher auch schon gebrochenes Material eingebaut. Auch grobkörnige Reststoffe, z.B. Schlacken aus der Müllverbrennung, bieten beim Einbau Kostenvorteile. Man kann sich ihrer auf nützliche Art entledigen und spart anderswo Deponieraum. Voraussetzung für die Verwendung solcher Reststoffe ist, daß ihre bodenmechanische Eignung (Stabilität des Korngerüstes unter den Deponieauflasten, Durchlässigkeit, Handhabbarkeit auf der Baustelle) durch entsprechende Prüfungen nachgewiesen wird. In jedem Falle entsteht aber durch den Einbau solcher grobkörniger Materialien die Notwendigkeit, die Kunststoffdichtungsbahn gegen Beschädigung (Perforation durch eindringende hervorstehende Kieskörner unter der Deponieauflast und bei erhöhten Temperaturen, Schlitzen und Kerben beim Einbau durch ungünstig geformte und orientierte Körner) durch Aufbringen einer Schutzschicht zwischen Dränschicht und Kunststoffdichtungsbahn zu schützen. Im Prinzip kämen für eine solche Schutzschicht feinkörnigere Böden in Frage, doch sind sie besonders auf geeigneten Flächen nur unter großen Schwierigkeiten einzubauen. Die Industrie hat deshalb geotextile Schutzschichten entwickelt. Die notwendige Masse pro Flächeneinheit solcher Schutzvliese aus PEHD in Abhängigkeit von der Körnung der Dränschicht und den Deponieauflasten hat SAATHOFF (1994) auf der Grundlage von Versuchen mehrerer Autoren zusammengestellt. Als Resultat der vorliegenden Untersuchungen kann gesagt werden, daß es bei einer Abweichung von der empfohlenen Körnung 16/32 mm (Rundkorn) auf die Körnung 8/32 mm wohl ein Schutzvlies mit einer Flächenmasse von 1200 g/m<sup>2</sup> in der Regel ausreichen dürfte, um die KDB bei mittleren Deponieauflasten vor Beschädigungen zu schützen. Eine generelle Empfehlung für die notwendigen Stärken der Schutzschichten kann aber sicher nicht gegeben werden. Es fehlen bisher sowohl Kriterien für die noch zu tolerierenden Verformungen der KDB, die Wahl der Temperaturen bei den Laborversuchen, die Simulation der Beanspruchungen beim Einbau und andere festzulegende Parameter, so daß jeweils im Einzelfall über die Wahl der Schutzvliese entschieden werden muß. Neuere Entwicklungen, wie bentonit- oder sandgefüllte doppellagige Vliese, können die Palette der zur Verfügung stehenden Produkte erweitern. Bei größeren abzudichtenden Flächen dürfte es immer sinnvoll sein, vor Baubeginn Probefelder mit den zum Einbau vorgesehenen Materialien anzulegen und dann (nach entsprechenden Feldversuchen) über die Eignung der einzelnen Komponenten zu entscheiden. Bild 2 zeigt das Schema einer Basisabdichtung für die Deponieklasse II.

## Oberflächenabdichtung

Oberflächenabdichtungen müssen so beschaffen sein, daß sie Setzungen aus dem Deponiekörper ohne Beschädigungen folgen können. Bei geeigneten Deponieoberflächen muß zudem sichergestellt sein, daß sie über lange Zeiten standsicher sind. Zudem sollen sie von einem aufzubringenden Bewuchs nicht durchdrungen werden.



## Deponieklasse II

Bild 2 Basisabdichtung einer Deponie der Klasse II

Eine dichte Deponieoberfläche minimiert den Sickerwasseranfall und damit die Kosten der Deponie. Sie beugt damit auch einem „Zuwachsen“ der Entwässerungseinrichtungen vor. Andererseits finden Zersetzungsprozesse im Deponiegut beim Fehlen von Wasser fast nicht mehr statt, wie Erfahrungen beim Ausgraben von Altdeponien gezeigt haben.

### Deponieklasse I - Mineralstoffdeponien

Für Mineralstoffdeponien wird in der Regel auf einer (bei erdbaumäßigem Einbau des Deponiegutes nicht notwendigen) Ausgleichsschicht eine mineralische Dichtungsschicht aufgebracht. Darüber folgt eine mindestens 30 cm mächtige Entwässerungsschicht,

die mit einer Rekultivierungsschicht von 1 m Dicke abgedeckt wird. Bei einer reinen Erdstoffdeponie (also ohne Bauschuttanteile etc.) kann auf den Einbau einer Dränschicht verzichtet werden; auch die Frage nach einer Begründung für die Dichtungsschicht muß hier im Einzelfall gestellt werden. Der Einsatz von Geokunststoffen ist in der Regel nicht erforderlich, es sei denn, man möchte aus filtertechnischen Gesichtspunkten die Rekultivierungsschicht von der Entwässerungsschicht trennen.

Bild 3 zeigt schematisch eine Dichtung für die Oberfläche einer Mineralstoffdeponie.

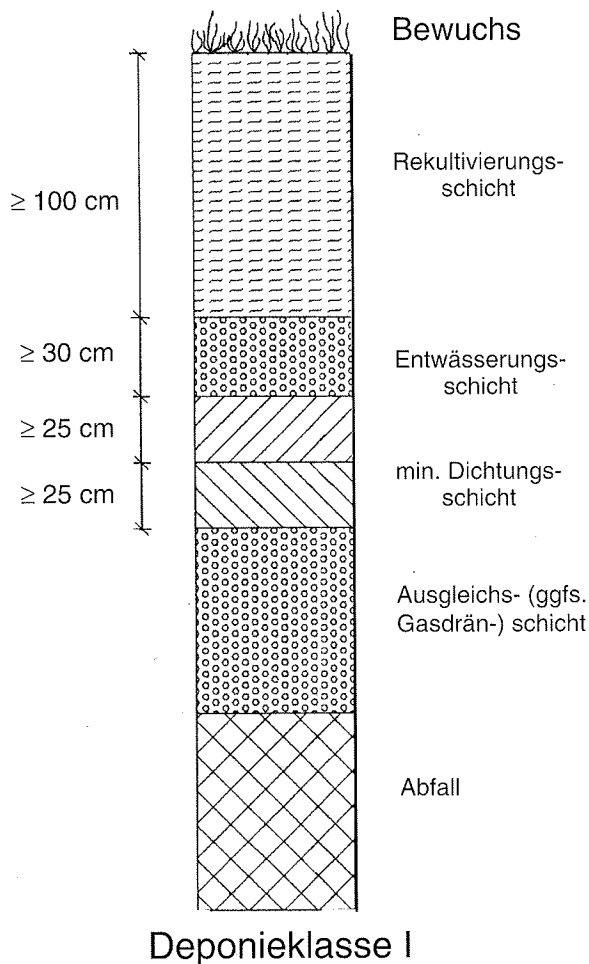


Bild 3 Oberflächenabdichtung einer Mineralstoffdeponie

### Deponieklasse II - Reststoffdeponien

Für diese Deponieklasse wird heute in der Regel für die Oberflächenabdichtung ebenfalls eine Kombinationsdichtung gewählt, wenngleich bei der bautechnischen Ausführung auf geneigten Flächen erhebliche Probleme auftreten können. Langanhaltende Setzungen aus dem Abbau des Deponiegutes können hochwertige Kombinationsdichtungen ebenfalls in Mitleidenschaft ziehen. Der Einbau einer Kombi-

nationsdichtung ist deshalb aus technischer Sicht bisher nicht immer die optimale Lösung, und andere Systeme sind durchaus zulässig. Auch eine zunächst zeitlich befristete Abdeckung allein mit Mineralstoffen, vielleicht in Kombination mit einer Bentonitmatten, kann sinnvoll sein. Über die Art der endgültigen Oberflächenabdichtung und über den Zeitpunkt des Einbaus sollte daher immer im Einzelfall und unter Wertung der Randbedingungen der Deponie entschieden werden.

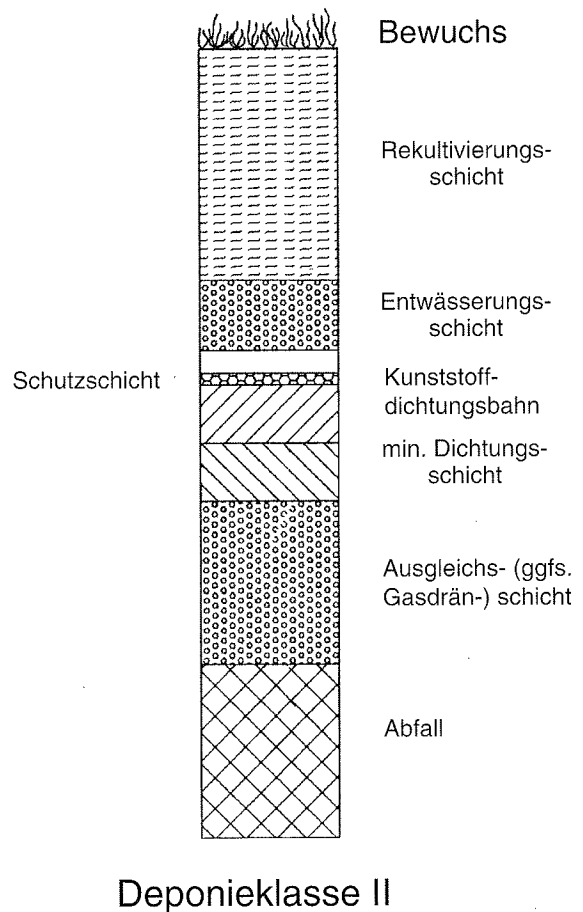


Bild 4 Oberflächen-Kombinationsabdichtung für Reststoffdeponien

### Dichtungsbahnen mit Bentonitkern

Die Hersteller von Geokunststoffen haben versucht, die Vorteile von Kunststoffprodukten - ständige Qualitätskontrollen, leichte Verlegbarkeit, hohe Verlegeleistung, geringe Bauhöhe etc. - mit der großen Beständigkeit natürlicher Dichtungsstoffe wie z.B. Ton zu verbinden. Dies führte zur Entwicklung von sog. Bentonitmatten. Bentonit ist ein hochquellfähiger Ton. Er wird in Pulverform zwischen zwei Vlieslagen in einer Stärke von wenigen Millimetern im Werk eingebracht. Die Vliese werden dann (z.B. durch Vernadeln) miteinander verbunden. Das so entstandene Produkt wird auf Rollen gewickelt und kann wie jedes andere Geotextil verlegt werden. Der

Bentonit quillt bei Wasserzufuhr und bildet wegen seiner sehr geringen Durchlässigkeit eine Dichtungsschicht. An den Überlappungen der Bahnen wird die Dichtigkeit durch aufgestreutes Bentonitpulver erzielt.

Betonitmatten haben gegenüber Dichtungsbahnen aus PEHD manche Vorteile, und sie sind bereits in großen Mengen eingebaut worden. Sie eignen sich z.B. gut zur Oberflächenabdichtung und zur Abdeckung von Teilbereichen in Deponien. Flache Teiche, z.B. für die Klärschlammbehandlung, lassen sich damit kostengünstig dichten, etc. Ihre Nachteile ergeben sich aus der (im Vergleich zu üblichen mineralischen Dichtungsschichten) geringen Dicke und der damit verbundenen relativ leichten Zerstörbarkeit sowie der Perforationsgefahr beim Einbau.

### 3. Trennen und Filtern

Die Funktionen des Trennens und Filterns werden im Deponiebau häufig von ein- und demselben Geotextil übernommen. Die Bemessung der Filterschichten in Dichtungssystemen kann dabei nach den Vorschlägen des Arbeitskreises 14 „Kunststoffe im Erd- und Wasserbau“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau erfolgen. Zu beachten ist, daß Müll keine definierten Kornverteilungskurven hat. Sein „bodenmechanisches“ Verhalten ist also nicht demjenigen eines Erdstoffes gleichzusetzen. Auch eine Durchströmung vom Müll in den mineralischen Filter wird selten so stattfinden, wie es in der klassischen Filterbemessung angenommen wird. Der Trennfunktion kommt also die größere Bedeutung zu, so daß im Zweifelsfall die Öffnungsweiten des geotextilen Filters/der Trennschicht eher kleiner zu wählen sind als nach den klassischen Filterregeln erforderlich.

### 4. Schützen

Die Schutzfunktion von Geokunststoffen wurde bereits im Abschnitt über Abdichtungen angesprochen. Wie alle im Bereich von Deponien der Klasse II eingesetzten Materialien müssen Schutzvliese beständig gegen konzentrierte und verdünnte aggressive Flüssigkeiten und Gase sowie ganz allgemein gegen chemische und biologische Angriffe sein. Damit kommt dem Rohstoff PEHD (Polyethylen hoher Dichte) die Hauptrolle im Deponiebau zu. PEHD wird bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten für den Transport und die Aufbewahrung aggressiver Medien in Form von Behältern, Rohrleitungen etc. eingesetzt und hat sich als sehr beständig erwiesen. Schutzschichten werden daher in der Regel aus PEHD-Spinnfaservliesstoffen hergestellt.

### 5. Dränieren

Der Einbau mineralischer Dränschichten auf geeigneten Flächen ist bautechnisch schwierig und teuer. Es

bietet sich daher an, Dränschichten aus Geokunststoffen zu verwenden. Die Industrie hat spezielle Verbundsysteme für diesen Zweck entwickelt. Diese Produkte sind in der Regel mehrschichtig aufgebaut: ein Kern aus Wirrgelegen, gitterförmig angeordneten Stegen oder ähnlichem dient als Sickerschicht für den Transport der Flüssigkeit in der Produktebene. Beiderseits wird der Kern durch geotextile Filterschichten (oft mit Gittern verstärkt) abgedeckt; durch diese Schichten erfolgt der Zufluß. Die zur Verwendung vorgesehenen Produkte müssen sowohl senkrecht zur Ebene als auch in der Ebene genügend durchlässig sein. Zudem dürfen sie unter den Deponielasten ihren Durchflußquerschnitt nicht wesentlich verringern.

Die Dränagefunktionen von Dränschichten werden durch eingelegte Rohre unterstützt und kontrollierbar gemacht. Rohre der Sohldränage sollten einen lichten Durchmesser von 250 mm haben, um Befahrungen der Rohrleitungen mit hochwertigen Kamerasystemen zu erlauben. Zum sicheren Transport der Kameras sollten in den Rohren Zugseile eingelegt sein. Starkwandige Rohre aus PEHD haben sich bewährt. Auch Steinzeugrohre können wegen ihrer großen Widerstandsfähigkeiten gegen chemische und biologische Angriffe Verwendung finden. Wegen ihrer Sprödigkeit reagieren sie aber empfindlicher auf schlechte Auflagerbedingungen und Setzungen des Untergrundes, so daß bei ihrem Einbau besondere Sorgfalt bei der Sicherstellung der Tragfähigkeit des Untergrundes und der Ausbildung der Bettung der Rohre notwendig ist.

Entgasungsschächte werden ebenfalls meist aus PEHD hergestellt. Bei nicht radialsymmetrischer Belastung können sie sich unter Deponierandbedingungen leicht verformen, wenn in ihrem Inneren nicht ein Stützgerüst aus grobkörnigem Mineralstoff eingebaut ist.

### 6. Bewehren

Die Verknappung des Deponieraumes kann dazu zwingen, Deponieböschungen möglichst steil anzulegen, um mehr Deponievolumen zu erhalten. Die Scherfestigkeit des Deponiegutes setzt aber einer Versteilung der Böschungen Grenzen. Die Beurteilung der Scherfestigkeit von Hausmüll, Hausmüll-Klärschlammgemischen und reinem Klärschlamm unter Berücksichtigung der Veränderung durch Abbauprozesse ist schwierig. Versuchstechnisch sind der Ermittlung zutreffender Scherparameter durch die Heterogenität der Massen, Hygienegesichtspunkte und die Notwendigkeit zur zeitlichen Extrapolation der Festigkeitsentwicklung Grenzen gesetzt. Wenn eine Versteilung der Böschungen Zweifel an der Dauerstandsicherheit entstehen läßt, kann man die Böschungsbereiche bewehren. Als Bewehrungs-

material kommen bei Hausmüll- und Klärschlammdeponien nur Geogitter aus PEHD in Frage.

Auch die Böschungen von Mineralstoffdeponien können zu Rutschungen neigen, wenn vorwiegend bindiger Boden eingebaut wird. Meist wird nur dann Boden an der Deponie angeliefert, wenn die Witterungsverhältnisse einen Einbau anderswo nicht zulassen. Der angelieferte Boden ist dann naß und

kann nicht verdichtet werden (falls dies auf Mineralstoffdeponien überhaupt geschieht); die Scherfestigkeit ist sehr gering und es kommt zu Rutschungen. Bild 5 zeigt als Beispiel einen Schnitt durch eine Erddeponie, die an der Böschungsseite mit 50 m langen Bahnen aus Geokunststoff (Polyestergewebe) bewehrt wurde, um die Böschung mit einer Neigung von 1:2 standsicher ausführen zu können.

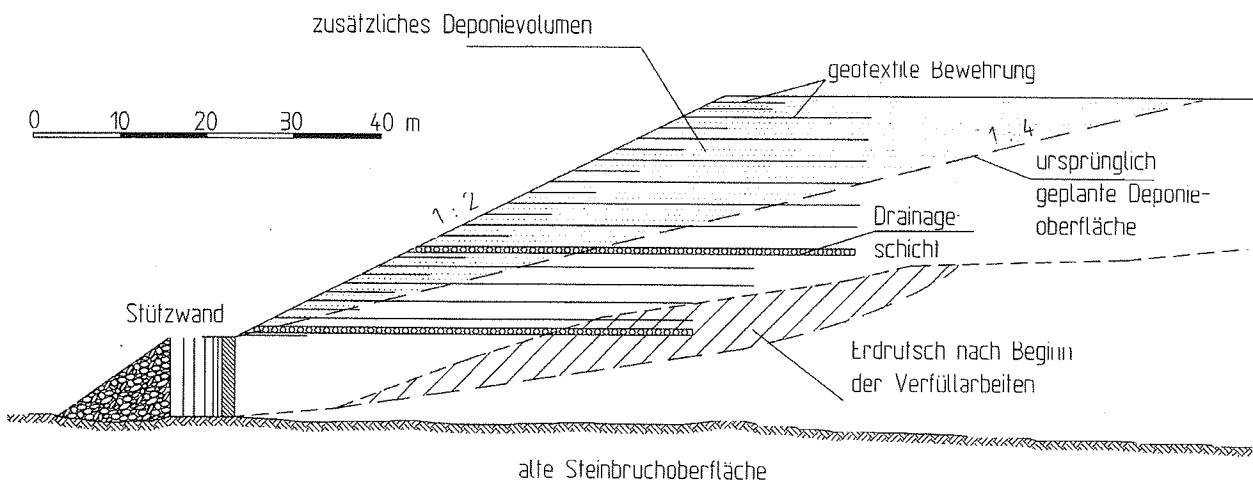


Bild 5 Bewehrung der Böschung einer Mineralstoffdeponie zur Gewährleistung der Standsicherheit

#### Literatur:

SAATHOFF, F.: Geokunststoffe im Deponiebau - Definitionen, Anforderungen, Funktionen und Bemessungsgrundlagen. Firmenschrift Naue Fasertechnik GmbH & Co. Kg, Lübbbecke, 1994.

Prof. Dr. Lutz Wichter  
Technische Universität Cottbus,  
Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/  
Geotechnik, Cottbus



# Die Sicherung einer geschlossenen Deponie am Beispiel Golm (Landkreis Potsdam-Mittelmark)

Ulrich Turczynski

Boden- und Deponie Sanierungs GmbH, Potsdam

## 1. Einführung

Betriebene und stillgelegte Altdeponien, insbesondere in der ehemaligen DDR, weisen zum Teil erhebliche bauliche Mängel sowie Mängel der inneren und äußeren Standsicherheit auf. Daneben stellen sie in der Regel Kontaminationsquellen, vor allem für den Luft- und Grundwasserpfad, dar. Das liegt unter anderem in der damals üblichen Standortauswahl und den Randbedingungen wie z.B. der Gesetzeslage, der Genehmigungs- und Kontrollpraxis, dem zu deponierenden Abfallspektrum, den mangelhaften Betriebsplänen sowie den Möglichkeiten und Grenzen von Technik und Betriebsführung begründet. Die unzureichende Dokumentation und Nachweisführung erschweren zudem eine Bestandsaufnahme.

Nachdem seit 1989/90 eine systematische Erfassung und Erstbewertung der Deponien und Abfallkippen in den neuen Bundesländern stattgefunden hat, besteht nunmehr die dringende Aufgabe,

- abgeschlossene Deponien oder Deponien, auf denen die Verbringung eingestellt wurde, zu sichern und zu sanieren sowie
- noch betriebene Deponien unter der Einbeziehung von Sicherungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen auf der Grundlage genehmigter Betriebspläne abzuschließen und danach ebenfalls zu sichern und zu sanieren.

Die Vorgehensweise ist grundsätzlich durch die Hauptarbeitsschritte der Altlastenbehandlung

- I. Erfassung
- II. Gefährdungsabschätzung
- III. Sicherung/Sanierung
- IV. Erfolgskontrolle/Überwachung

vorgegeben.

Eine bedeutende Rolle kommt dabei der Festlegung des Ziels der jeweiligen Bearbeitungsstufe zu: Zum einen sind Inhalt und Ziel entsprechend den Ergebnissen der vorherigen Bearbeitungsstufe, der Gesetzes- und Vorschriftenlage, Schutzgütern etc. zu definieren. Zum anderen gilt es, die notwendigen und verfügbaren Mittel zu optimieren sowie den zeitlichen Rahmen und Ablauf der Bearbeitung festzulegen. Um einen Stillstand in einer Bearbeitungsstufe

zu vermeiden, ist es wichtig, die Ergebnisse und weitere Ziele in dem jeweiligen Arbeitsschritt zu benennen und zu koordinieren.

## 2. Deponie Golm, Situation und Aufgabenstellung

Auf der Deponie Golm, ca. 5 km westlich von Potsdam in einem Niederungsgebiet, dem Golmer Luch, am Rande des Zernsees gelegen, wurden bis Mitte 1990 Siedlungsabfälle, u.a. Haus- und Gewerbemüll, sowie Baurestmassen der Stadt Potsdam verbracht. Der Betrieb wurde eingestellt. Ein Schließungskonzept liegt nicht vor.

Der Deponiekörper umfaßt eine Grundfläche von ca. 16 ha; der Müll wurde bis auf eine Höhe von 10 m aufgeschüttet. Der Deponiekörper verfügt über keine Basisabdichtung und keine natürliche geologische Barriere. Das fast ebene Plateau ermöglicht das ungehinderte Eindringen von Niederschlagswasser und den Austrag von Schadstoffen. Auf dem Plateau sind deutliche Vegetationsausfälle infolge von Deponiegasaustritten zu verzeichnen; die Deponiegasproblematik ist auch unter dem Aspekt der abschließenden Rekultivierungsmaßnahmen zu beachten. Obwohl der Deponiekörper im Böschungsbereich bewachsen ist, stellt der Deponiekörper in seiner jetzigen Form einen „Störfaktor“ im Landschaftsbild des Golmer Luches dar.

Durch das ungehindert austretende Deponiegas ergeben sich folgende Gefahren für Mensch und Umwelt:

- Bildung explosionsfähiger Gas-/Sauerstoffgemische
- Gefahr der Selbstentzündung des Deponiekörpers
- erhebliche Geruchsbelästigung und Gesundheitsgefährdungen durch Spurenstoffe im Deponiegas
- Gasmigration in die umliegenden Siedlungsflächen
- Behinderung oder Schädigung von Rekultivierungsmaßnahmen
- Schädigung des Ökosystems.

Die hydrogeologische Situation stellt sich u.a. durch die Nachbarschaft zu einem ehemaligen Spülfeld, der künstlichen Absenkung des Grundwasserspiegels

im Luchgebiet, die Nachbarschaft eines Havelsees etc. kompliziert dar. Aufgrund des oberflächennahen Grundwassers und Setzungen des Deponiekörpers ist davon auszugehen, daß kontinuierlich Schadstoffe aus der Deponiebasis ausgewaschen werden. Die vor der jetzigen Bearbeitung durchgeführten Untersuchungen zur hydrogeologischen Situation inklusive Aufschluß- und Erkundungsgrad mußten aufgrund ihres zeitlichen und materiellen Umfangs unzureichend bleiben. Auf der Basis des jetzigen Kenntnisstandes müssen weitere Untersuchungen unbedingt erfolgen, um die von dem Komplex Deponie/Spülfeld ausgehenden Umweltbelastungen in ihrem ganzen Ausmaß beurteilen zu können.

### 3. Vorgehen

#### 3.1. Grundlagenermittlung/Vorplanung

Im Rahmen der Grundlagenermittlung/Vorplanung war eine Konzeption für die Sicherung des Deponiekörpers zu entwickeln. Einen wesentlichen Anteil in dieser Bearbeitungsphase umfaßten die Arbeiten zur Fortführung und zum Abschluß der Gefährdungsabschätzung. Aus der Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Kontaminationspfade sowie den speziellen Rahmenbedingungen mußten die Mindestanforderungen für die Sicherungsmaßnahmen festgelegt werden.

Im Rahmen einer Standsicherheitsuntersuchung galt es, die zu erwartenden Setzungen hinsichtlich der Anwendbarkeit verschiedener Dichtungs- und Abdeckungsvarianten zu berechnen und bezüglich der aufzubringenden Profilierungsmassen die innere und äußere Standsicherheit des Deponiekörpers und insbesondere der Böschungen nachzuweisen. Ferner wurden die Vegetationsschäden im Umfeld der Deponie erfaßt und daraus ein Rekultivierungskonzept erarbeitet. Ein weiterer Teil der Grundlagenermittlung und Vorplanung war die Fortschreibung des Datenpools Grundwasseranalytik. Über einen Variantenvergleich (Massenausgleich, externe Massen, Gestaltungsvarianten) wurde die Geometrie des Deponiekörpers unter Beachtung der landwirtschaftlichen Einordnung, der erforderlichen Mindestgefälle, der Arbeitsschutzmaßnahmen und Umweltbelastungen während der Sanierungs- und Profilierungsarbeiten erarbeitet sowie ein Oberflächenabdichtungssystem ausgewählt (Bild 1 und 2).

#### 3.2. Deponiegasregime

Da die Aussagen zum Deponiegasregime aus früheren Bearbeitungen weiteren Handlungsbedarf aufzeigten, mußte parallel zur Vorplanung eine gastechnische Voruntersuchung durchgeführt werden. In großen Bereichen wurden Methangaskonzentrationen von 35% bis 50% festgestellt, so daß aus Grün-

den der Sicherheit, des Umwelt-, Brand- und Explosionsschutzes, sowie der Rekultivierung weiterer Handlungsbedarf bestand (Bild 3).

Im Rahmen eines Gasabsaugversuches wurden 5 Entgasungsbrunnen errichtet und das gefaßte Deponiegas über eine Fackel verbrannt. Das begleitende Gasmeßprogramm hatte die Ermittlung der zur Verfügung stehenden absaugbaren Gasmenge, die Bestimmung der Deponiegaszusammensetzung und die Dimensionierung eines aktiven Entgasungssystems für die gesamte Deponie zum Ziel. Die Ergebnisse aus dem Absaugversuch (5 Brunnen über die Deponie verteilt, Methangehalte > 40%, Bild 4) lassen auch für ein zu konzipierendes aktives Entgasungssystem einen kontinuierlichen Betrieb der Fackel erwarten. In der Planung ist auch eine mögliche Gasverwertung in einem Blockheizkraftwerk als Variante vorgesehen; die Wirtschaftlichkeit ist nach einer dreimonatigen Betriebszeit des aktiven Entgasungssystems zu überprüfen.

#### 3.3. Entwurfs- und Ausführungsplanung

Im Rahmen weiterer Planungsphasen wird das Konzept der Grundlagenermittlung/Vorplanung in genehmigungs- und ausführungsfähige Unterlagen überführt. Die Ausführungsplanung beinhaltet die technische und konstruktive Umsetzung der in der Entwurfsplanung erarbeiteten Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen.

Die Sicherung des Deponiekörpers soll unter der Zielstellung erfolgen, den vorhandenen Altdeponiekörper durch 'Bautechnische Maßnahmen' so zu verändern, daß ein Zustand hergestellt wird, der die Sickerwasserbildung minimiert, den Austritt von Deponiegas unterbindet sowie die landschaftliche Einbindung der Deponiekörpers in das Umfeld berücksichtigt.

Das beinhaltet im einzelnen die Herstellung eines

- standsicheren und abdeckfähigen Deponiekörpers mit den erforderlichen Böschungs- und Kronen- neigungen
- Deponieoberflächenabdichtungssystem
- Entwässerungssystem zur Fassung und schadlosen Ableitung des Oberflächenwassers
- Aktiventgasungssystem
- Deponieüberwachungssystem
- Bauablaufplanes und Mengenberechnung

sowie

- die Rekultivierung und landschaftliche Einbindung der Deponie Golm.

#### 3.4. Profilierungsmaßnahmen

Vor Beginn der Profilierungsarbeiten mit externen Massen werden die Gasbrunnen gebohrt und ausgebaut. Zum einen wird dadurch eine frühzeitige Ent-



# DEPONIE GOLM – POTSDAM

IST – ZUSTAND

ANSICHT VON WESTEN

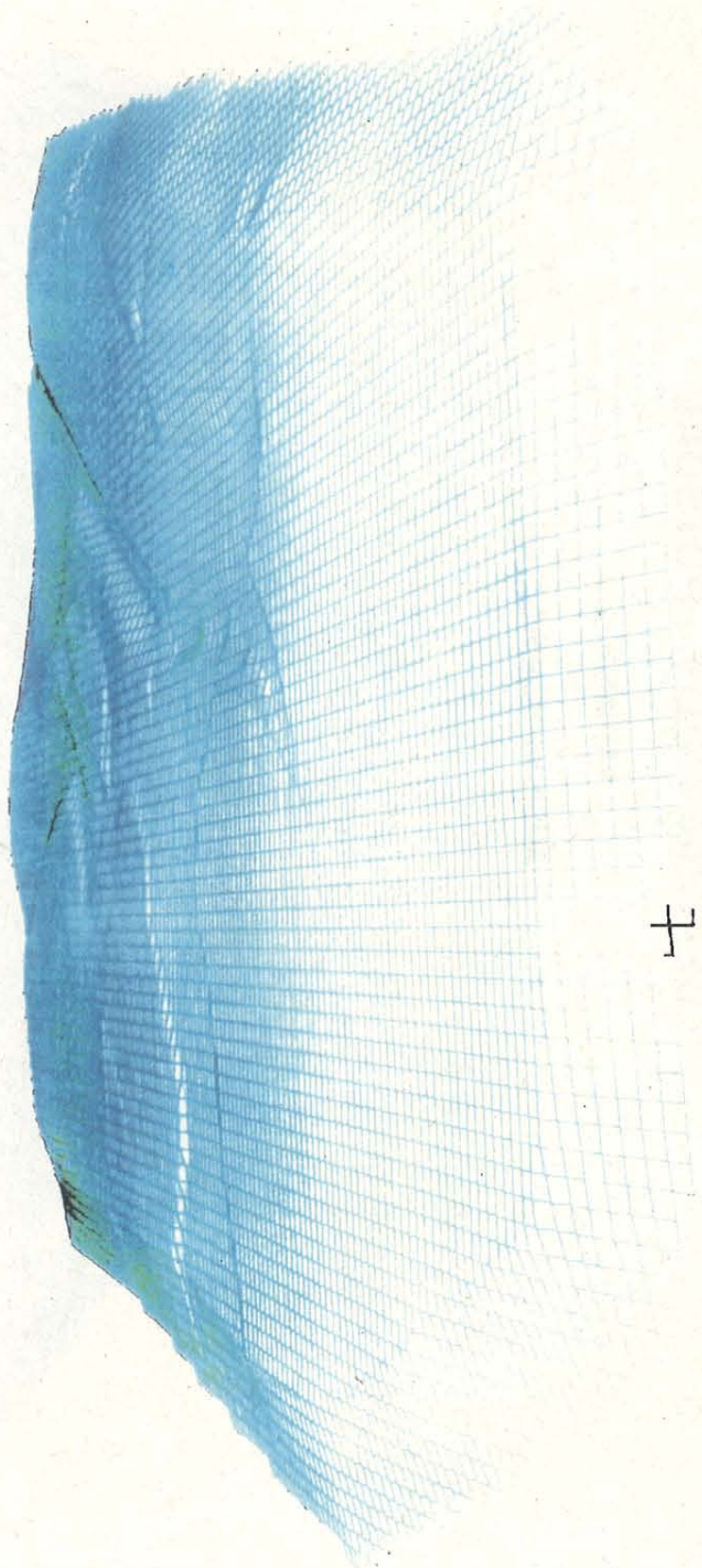


Bild 1



# DEPONIE GOLM – POTSDAM

## VARIANTE 2

### ANSICHT VON WESTEN

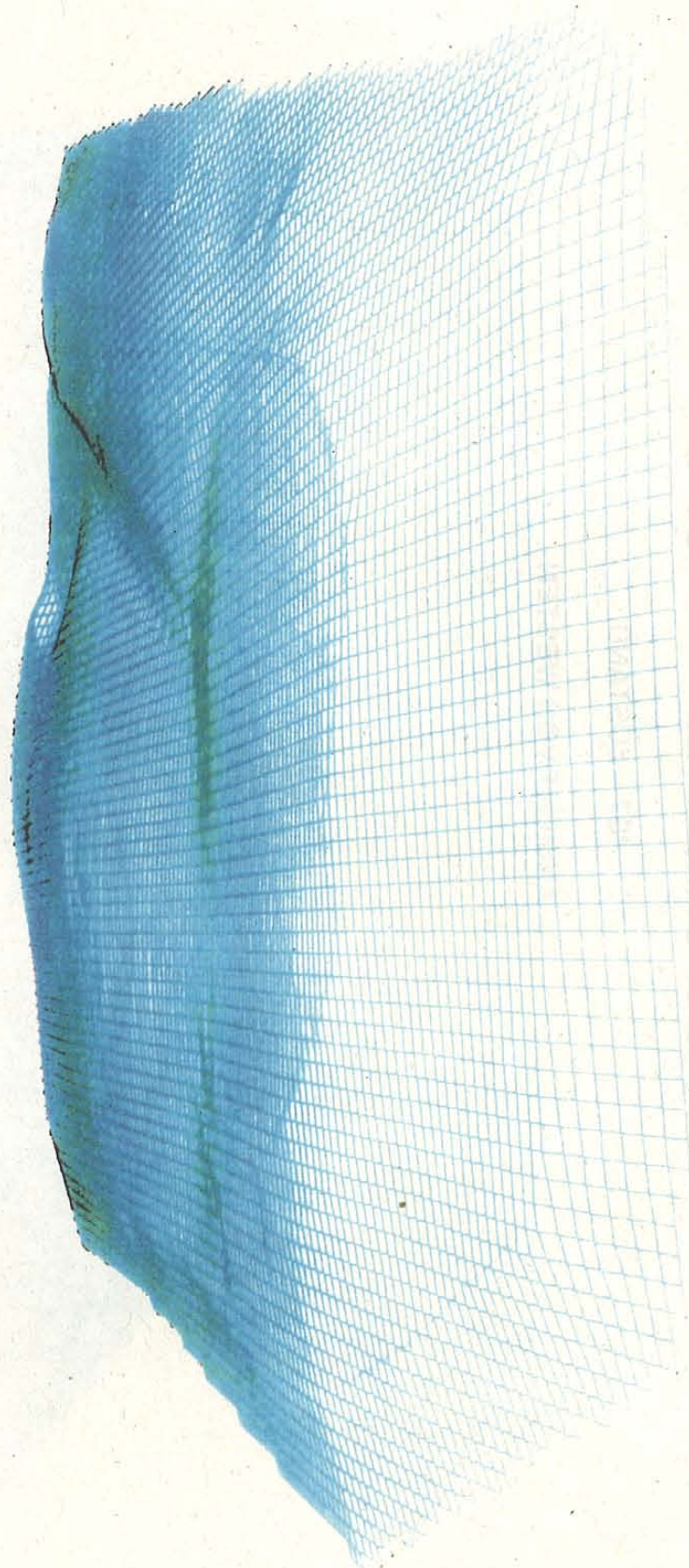


Bild 2



Bild 3

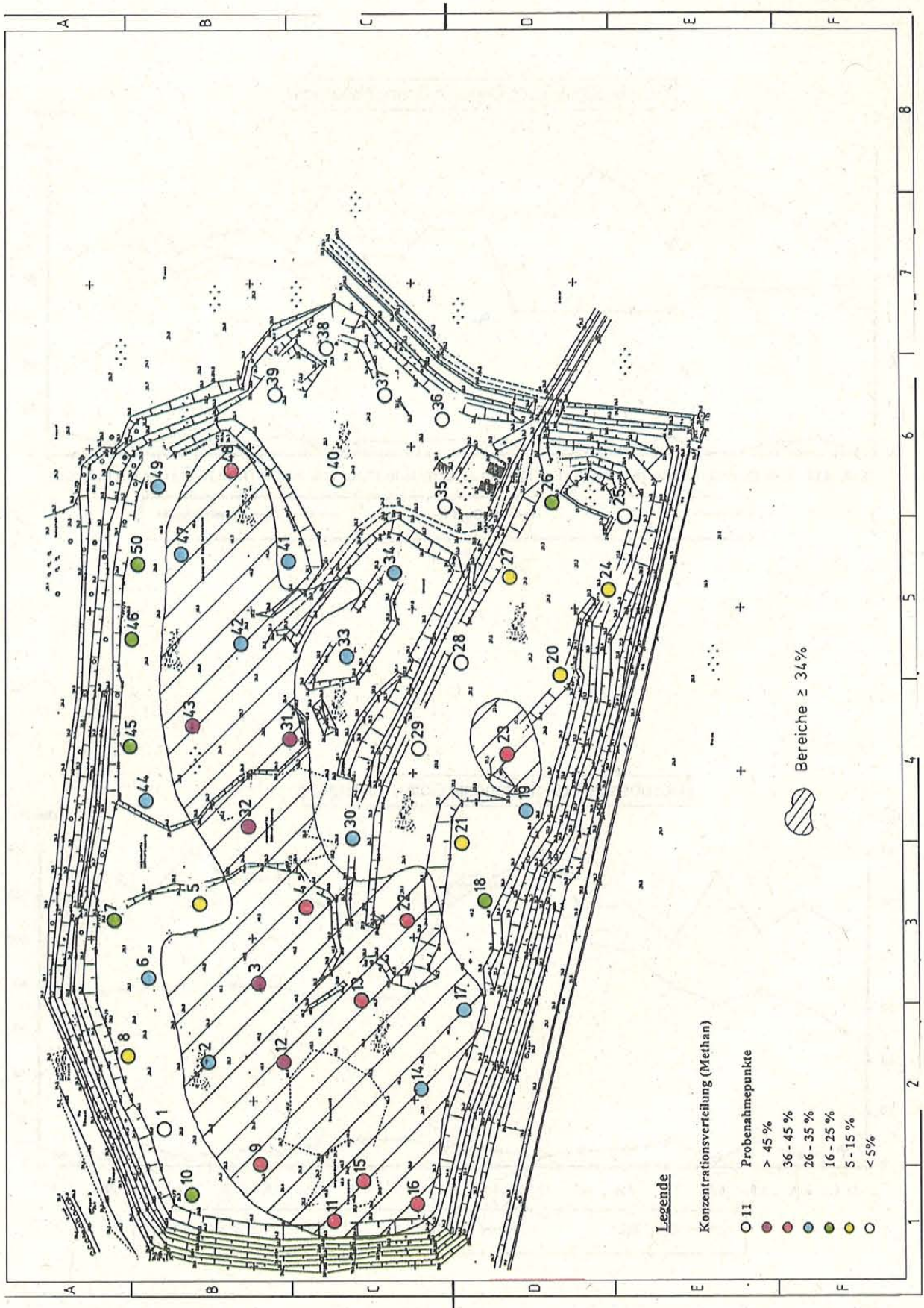
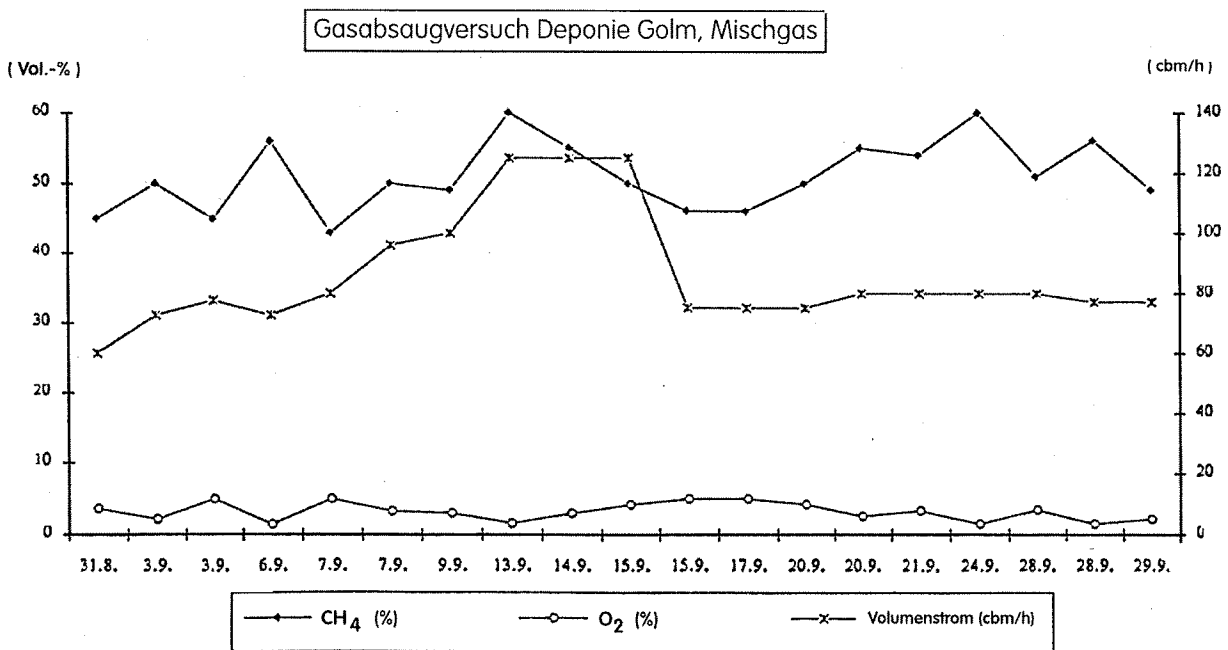
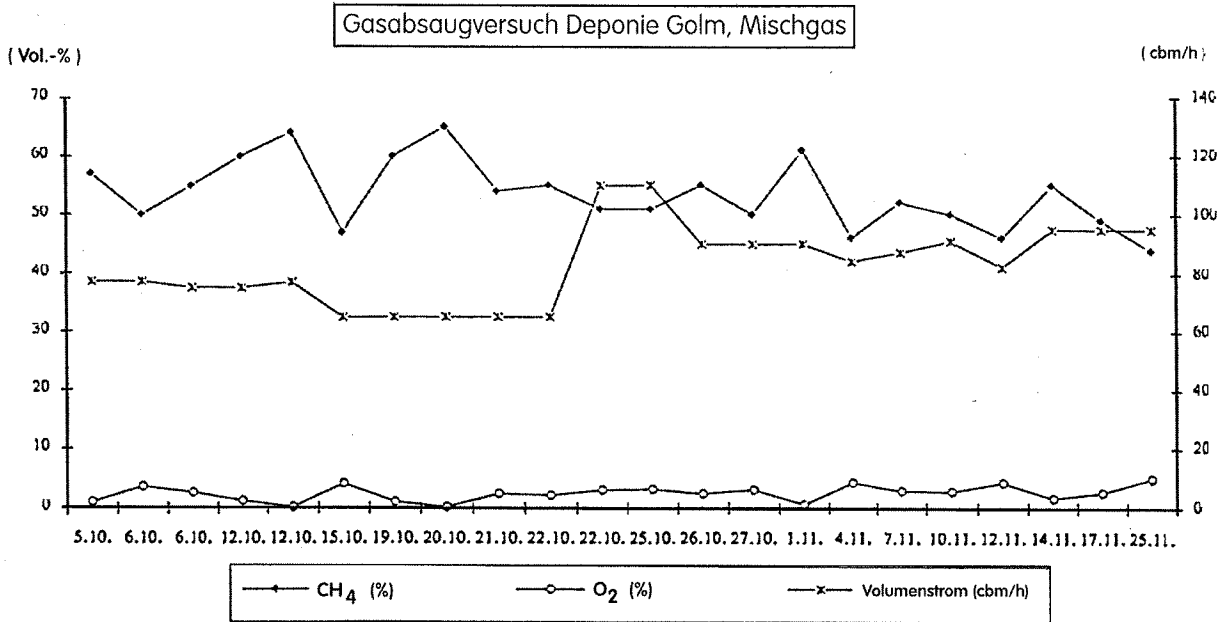


Bild 4



gasung der Deponie ermöglicht, zum anderen wird der Aufwand gegenüber einer nachträglichen Installation deutlich verringert.

Zur Profilierung der Deponie Golm werden erhebliche Massen benötigt. Hier ist geplant, im Umland anfallenden Bauschutt und Bodenaushub zu verwenden. Über die so zu erzielenden Erlöse erfolgt eine deutliche Reduzierung der Gesamtkosten. Neben den technologischen Fragen des Einbaus der Massen sind hier vor allem die Transportlogistik zu entwickeln sowie eine Optimierung der Wirtschaftlichkeit und der zeitlichen Realisierbarkeit anzustreben. Das zu erstellende Konzept der Bauschuttverbringung beinhaltet die rechtliche Situation, die Erfassung der beteiligten Instanzen und Unternehmen einschließlich Akquisition, die Transportlogistik und eine Wirtschaftlichkeitsstudie.

Für eine effiziente und zeitsparende Bauabwicklung kommt der Koordinierung der einzelnen Sicherungs- und Sanierungsschritte (z.B. Errichtung des Entgasungssystems und Aufbringen der Profilierungsmassen) eine besondere Bedeutung zu. Unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung von Umweltbelastungen, insbesondere für die Anwohner, ist z.B. auch die Wahl des Transportmittels für die Profilierungsmassen entscheidend.

Nach den Profilierungsmaßnahmen, die einen Zeitraum von zwei bis drei Jahren in Anspruch nehmen werden, wird das Oberflächenabdichtungssystem aufgebracht und die Deponie dem Charakter der Landschaft entsprechend rekultiviert.

#### **4. Zusammenfassung**

Die Sicherung der Deponie Golm stellt

- mit dem stufenweisen Herangehen bei der Untersuchung, Planung und Ausführung sowie
- der konstruktiven Zusammenarbeit von Auftraggeber, Genehmigungsbehörde und ausführenden Unternehmen

ein Beispiel für die Durchführung einer effizienten Sicherungsmaßnahme bei begrenztem Mittel- und Zeitaufwand dar. Besonders zu erwähnen ist die Kostenoptimierung durch den geplanten Einsatz von unkontaminierten, inerten Baurestmassen für die Profilierung.

Über die weiteren Arbeiten zur hydrogeologischen Situation sowie die Installation eines entsprechenden Überwachungssystems wird eine Erfolgskontrolle der durchgeführten Maßnahmen ermöglicht. Ferner können gegebenenfalls erforderliche weitere Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen, etwa beim benachbarten Spülfeld, aufeinander abgestimmt werden.

*Dr.-Ing. Ulrich Turczynski  
Boden- und Deponie Sanierungs GmbH,  
Potsdam*



# Verallgemeinerte Erfahrungen bei der Sanierung eines Sonderabfall-Zwischenlagers einer Lackfabrik

Jürgen Keßler, BIUG GmbH, Freiberg

## 1. Einleitung

Die Technische Anleitung Abfall (TA Abfall) hat bekanntlich für die Bundesrepublik Deutschland erst im Jahr 1990 bundeseinheitlich Vorschriften über die Anforderungen an die Verwertung und sonstige Entsorgung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen nach dem Stand der Technik festgeschrieben.

Noch 1987 wurden in der Bundesrepublik Deutschland eine Million Tonnen Sonderabfälle in nicht geeigneten Anlagen bzw. im Ausland entsorgt.

Die in unserem Vortrag vorzustellende Lagerung von Sonderabfällen in einer ostdeutschen Lackfabrik, 1990 errichtet, stellt eine solche, nicht geeignete Anlage dar, obwohl die Lagerung von seinerzeit nicht recycelbaren oder deponierbaren Reststoffen in dieser Lackfabrik nach bestem Wissen und Gewissen erfolgte.

Im Rahmen einer 1991 für das gesamte Betriebsgelände erarbeiteten Gefährdungsabschätzung wurde auch die sprachlich vereinfachend als „Deponie“ bezeichnete Anlage einer ersten Begutachtung unterzogen.

Dabei konnten als **positive Aspekte** festgestellt werden:

- Die Ablagerung wurde mit einer **Oberflächenabdichtung** und einer **Basisabdichtung** als Folienabdichtung umschlossen.
- Hinzutretendes Oberflächenwasser sollte über einen durchlässigen Erdstoff („Dränage“) abgeleitet werden.
- Über die Ablagerung wurde 1990 eine technische **Dokumentation** angefertigt, die auch noch 1992 verfügbar war. Darin wurden Menge, Art der Stoffe, Eigenschaften der Behälter und die räumliche Verteilung der Stoffe im Deponiekörper festgehalten.
- Als Standort wurde eine Fläche ausgewählt, die im weitesten Sinne über einen Untergrund verfügt, der einer **geologischen Barriere** nahe kam.
- Die Abfälle wurden als nicht gemeinsam mit Hausmüll behandelbar eingestuft. Der Betrieb errichtete ein eigenes Lager von Sonderabfällen.

- Ein einfaches Element zum „Messen“, das im Zentrum des Lagers angeordnet wurde, stellte ein Kontrollrohr dar.
- Das Zwischenlager wurde relativ befriedigend in die Landschaft eingeordnet. Aufgebrachter Mutterboden sicherte schnell einen natürlichen Bewuchs (Abb. 1).



Abb. 1 Ansicht des Sonderabfall-Lagers, Südseite

Als **Negativaspekte** mußten vermerkt werden:

- Als **Endlager** eingerichtet, ohne den Anforderungen zu entsprechen.
- Keine Untersuchungen über die gesamte **Geologie und Hydrogeologie** der näheren Umgebung.
- **Sickerwasser** wurde nicht genügend beachtet, optisch belastetes Wasser konnte **ungehindert austreten**.
- Technischer Mangel dadurch, daß eine mit guter Absicht angebrachte Anschüttung das ganze Gegenteil bewirkte: Anströmendes Hangwasser wurde geradezu in die Deponie hineingebracht, da die Anschüttung aus bindigem Material bestand.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden technische Maßnahmen realisiert, die zumindest den Grundwasseranstau verminderten und Niederschlagswasser ableiteten.

"Deponie" für lösungsmittelhaltige Abfälle  
 Aufbau; schematisch (Längsschnitt)

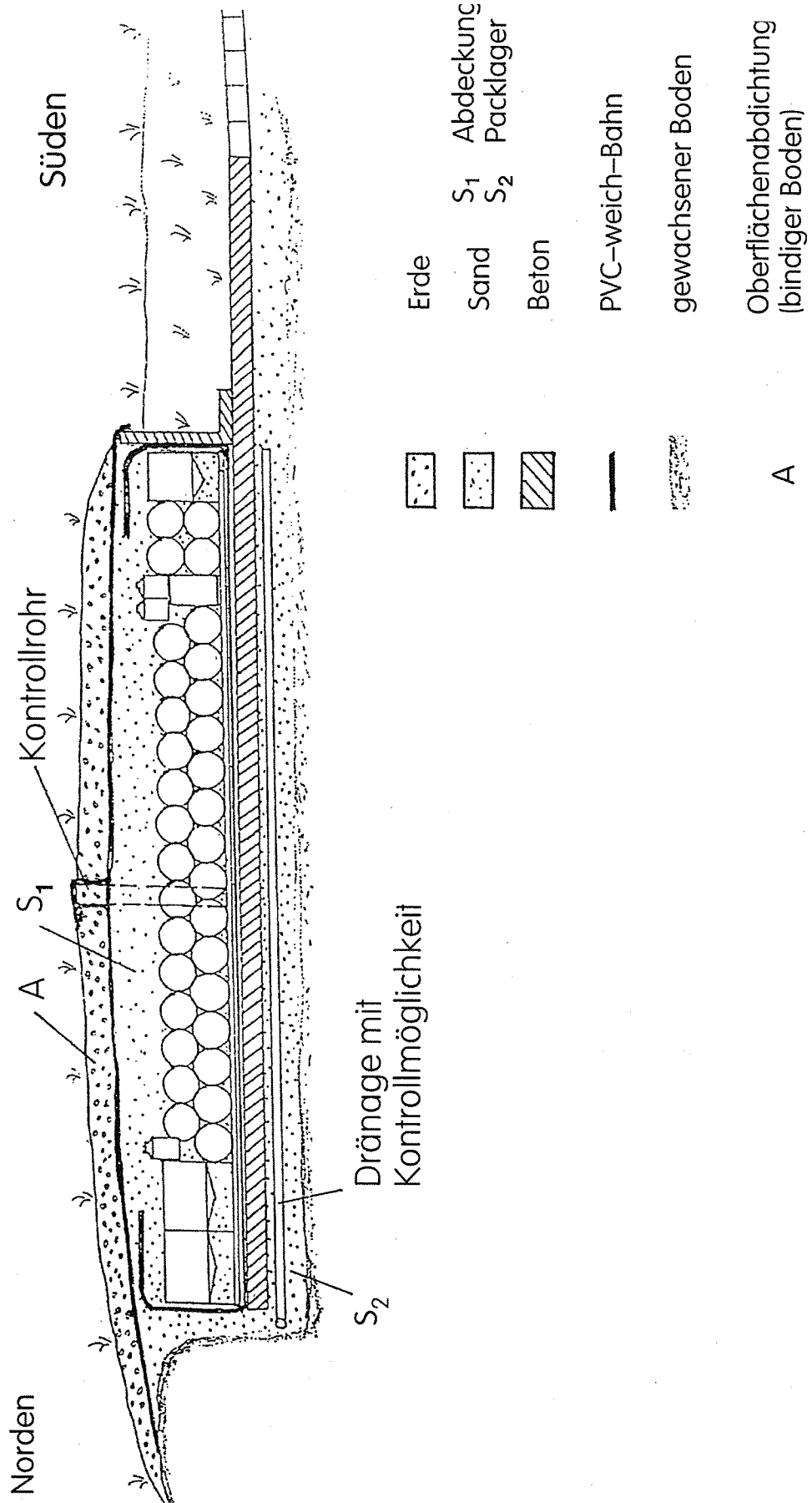


Abb. 2 Sonderabfall-Lager, Längsschnitt



Der Inhaber der jetzigen Firma Oli-Lacke beabsichtigt, neben den laufenden Investitionen für die Produktion auf dem Betriebsgelände auch mehrere Wohngebäude errichten zu lassen. Dazu war es erforderlich, die von der „Deponie“ eingenommene Fläche am Rande des Betriebsgeländes zu beräumen.

Auf diese Weise ergab sich die seltene Gelegenheit, die Auswirkungen einer etwa drei Jahre währenden Sonderabfall-Ablagerung nicht nur in der Umgebung der Deponie, sondern im Deponiekörper selbst detailliert beobachten zu können.

## 2. Aufbau der Deponie und Untersuchungsgeschichte

Der Aufbau der Deponie ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Die eigentliche Deponie war auf einer Betonplatte angelegt und von PVC-Bahnen eingekapselt. Dieser Teil umfaßte ein Volumen von ca. 420 m<sup>3</sup>.

Etwa die Hälfte davon wurde von Behältnissen (Tankpaletten, Fässern, Kannen) mit Lösungsmitteln eingenommen. Der Rest bestand aus einer Sandverfüllung. Im Zentrum der Deponie war ein Kontrollrohr aus Steinzeug angebracht. Unter der Betonplatte war eine Dränageschicht von 20 bis 30 cm Kies eingebracht. Eine Dränageleitung, die einsickernde Niederschlagswässer ableiten sollte, lag am Rande der Betonplatte im Kiesbett. Die über der PVC-Dichtungsbahn aufgebrachte Bodendecke war etwa 30 cm stark.

Die eingelagerten Abfälle befanden sich in mehr als 600 Behältnissen mit Fassungsvermögen zwischen 50 l und ca. 600 l.

Über den Inhalt der Behältnisse lag folgende generalisierte Information vor:

„Die Fässer enthalten flüssige Stoffe, die etwa den Abfällen entsprechen, die gegenwärtig vom Betrieb unter der Bezeichnung 'Lösungsmittelabfälle', nicht halogeniert, Schl.-Nr. 55370, zur Sonderabfallverbrennung gegeben werden.

Die Tankpaletten enthalten überwiegend ausgehärtetes Produkt (Lacke oder Rohstoffe, wie ausgehärtete Lackharze).

In den Kleingebinden sind überwiegend ausgehärtete Lackbestandteile und sonstige lackbehaftete Feststoffe enthalten. Damit kommen sie in ihrer Zusammensetzung einem Abfall nahe, der als 'Lackierereiabfälle', Schl.-Nr. 55510, zur Sonderabfallentsorgung gegeben wird.“

Im Rahmen der ersten Untersuchung (Gefährdungsabschätzung) wurden im Betriebsgelände vier Grundwasserbeobachtungspegel installiert. Einer dieser Pegel (B 2) ist im Abstrombereich der Deponie angeordnet und beprobt worden.

## Grund- und Deponiewasseranalysen, wesentliche Parameter

	Einheit	B1	HP 1	WP 1
pH-Wert		5,95	6,54	4,57
Leitfähigkeit	µS/cm	390	450	2640
AOX	µg/Cl	9,1	37	190
LHKW (nach TVO)	µg/l	0,3	1,1	250
BTEX	µg/l	< 1	< 1	93000

Da sich geringe Anzeichen einer Lösungsmittelbelastung aus AOX-Wert und dem LHKW-Gehalt ableiten ließen, ist ein 2-Zoll-Hilfspegel (HP 1) näher an der Deponie gesetzt worden. Seine Lage ist Abb. 4 zu entnehmen. Die Analysendaten dieses Pegels und der ca. 10 cm tiefen Wasseransammlung im Kontrollrohr der Deponie (WP 1) lassen den Schadstoffpfad anhand der AOX- und der LHKW-Werte deutlich erkennen. Die monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (BTEX) reichern sich vor allem in der Deponieluft an, wie noch zu zeigen sein wird.

## 3. Ablauf der Sanierungsmaßnahme

Den Auftrag für die Durchführung der Sanierung erhielt die Fa. Großmann/Türpe in Fischbach bei Dresden. Die ingenieurtechnische Betreuung übernahm BIUG Freiberg.

Im Folgenden wird der Hergang der Sanierungsarbeiten kurz erläutert:

Da mit den Voruntersuchungen nicht eindeutig nachzuweisen war, welche Mengen von flüssigen Inhaltsstoffen der Fässer bereits in den Hinterfüllsand einwandern konnten, wurde zunächst ein Winkelstützelement aus Beton aus der Stützwand herausgehoben (Abb. 3). Die in diesem Bereich noch intakte Dichtungsbahn wurde geschlitzt. Über eine in die



Abb. 3 Ausheben des ersten Winkelstützelements

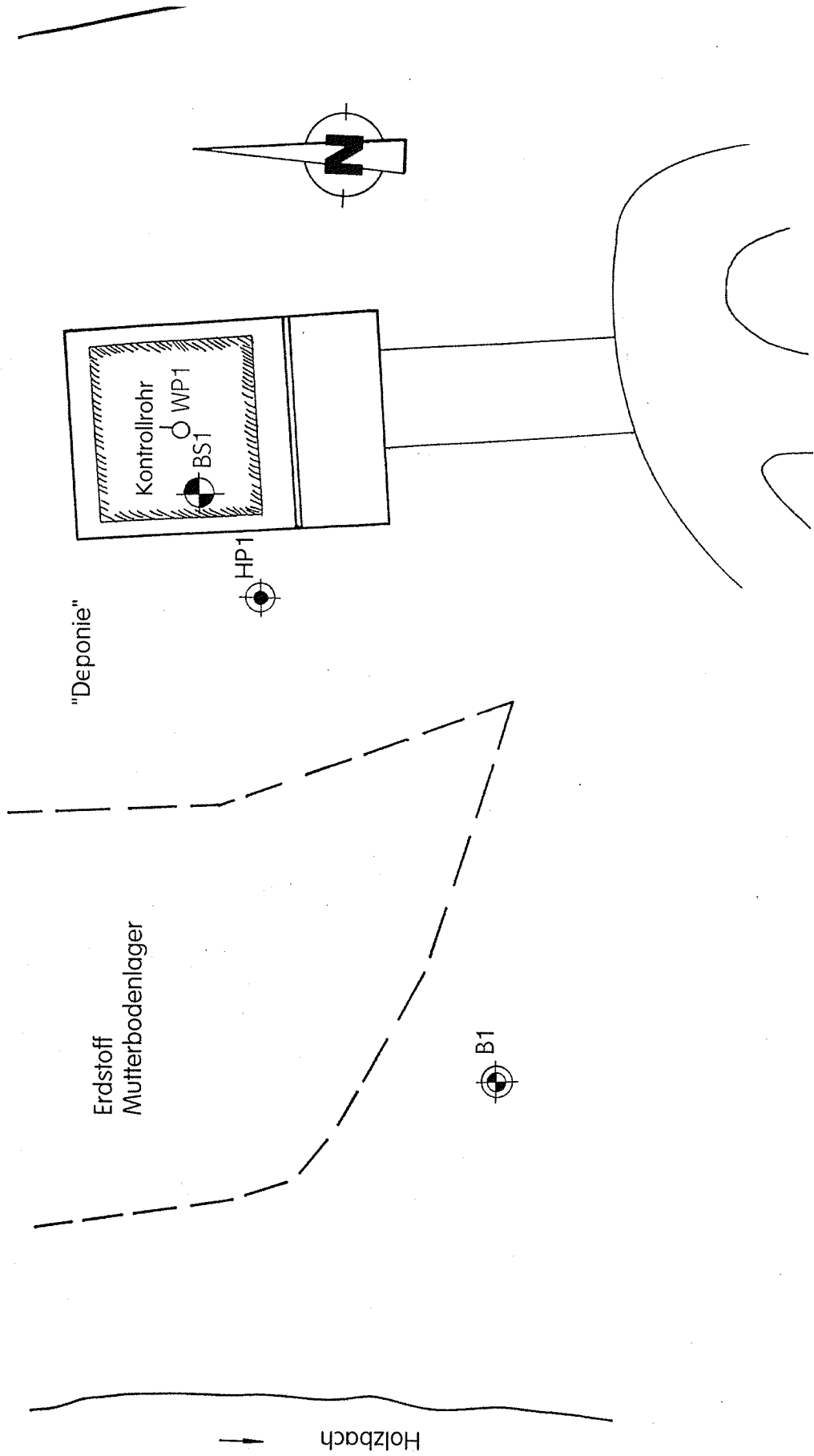


Abb. 4 Lageskizze



Hinterfüllsande getriebene Lanze ist mittels einer mobilen Bodenluftabsauganlage ein Absaugtest durchgeführt worden (Abb. 5).



Abb. 5 Deponieluftabsaugung

Dabei wurde auch eine erste Deponieluftprobe entnommen, die einen hohen Anteil an BTEX und eine geringe Belastung durch LHKW zeigte.

Eine später im „hinteren Teil“ der Deponie entnommene Luftprobe (DL 2) wies sogar noch höhere Gehalte an BTEX und LHKW aus.

*Analysedaten von Deponieluft (Gehalte in mg/m<sup>3</sup>)*

	DL 1	DL 2
<b>BTEX</b>		
Benzol	64	250
Toluol	330	2000
Σ BTEX	510	2300
<b>LHKW</b>		
Σ LHKW	1,3	25

Da der Deponieinhalt ein sehr begrenztes Gesamtvolumen besaß und keine intensive Gasfreisetzung erfolgte (erkennbar am nicht vorhandenen Überdruck), konnte trotz der Analysenwerte ohne aufwendige Absauganlagen gearbeitet werden, zumal beim Öffnen der Deponie sofort eine starke Verdünnung erfolgte (mit tragbaren Exposimetern wurde die tatsächliche Belastung der Umgebungsluft kontrolliert).

Das Material der Bodendecke über der Dichtungsbahn hatte sich bei der Voruntersuchung als unbelastet erwiesen. Es wurde streifenweise abgetragen und zur Wiederverwendung umgelagert.

Nach dem Entfernen der Bodendecke konnte die Dichtungsbahn zurückgeschlagen werden. Damit wurde der obere Teil der Sandhinterfüllung zugänglich.

Die Behältnisse wurden durch vorsichtiges Abtragen des Sandes freigelegt.

In Abb. 6 ist an Tankpalette und Fässern der allgemeine Erhaltungszustand erkennbar. Nach Entfernen des Sandes sammelte sich Sickerwasser, das ebenfalls entsorgt werden mußte.



Abb. 6 Erhaltungszustand der Behältnisse

Das Kontrollrohr der Deponie ist erreicht. Die fortschreitende Korrosion der Fässer zeigte sich z.B. an der Farbe bzw. dem Rost (Abb. 7).

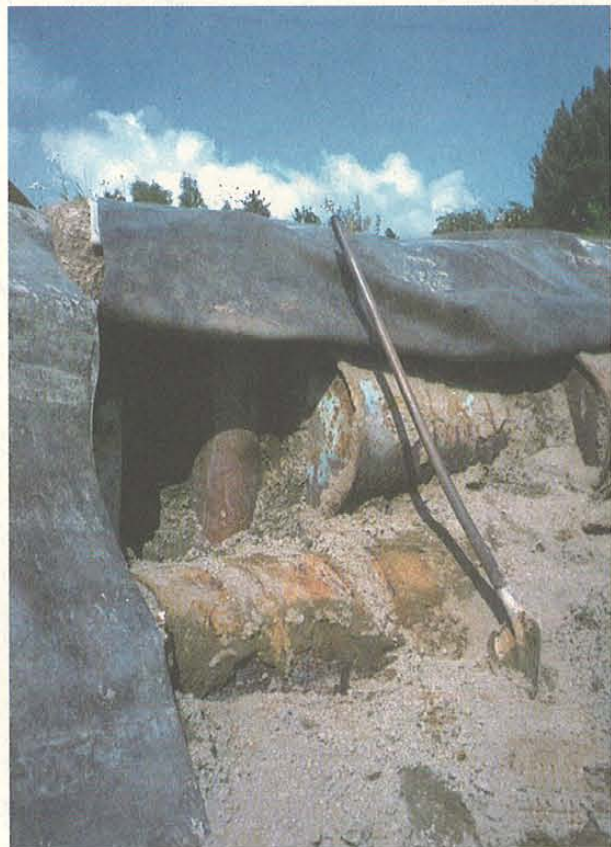


Abb. 7 Situation am Kontrollrohr



Die Fässer waren überwiegend vollständig mit Farb- und Lösungsmittelrückständen gefüllt (Abb. 8).



Abb. 8 Inhalt der Behältnisse

Die Entleerung des flüssigen Inhalts der Behältnisse erfolgte durch ein Tankfahrzeug mit Saugpumpe. Die Auswirkungen des Austretens und der Reaktion von flüssigen Inhaltsstoffen auf der Metalloberfläche sind in der Abb. 9 gut erkennbar.

Für die Entsorgung des Deponieinhalts sind folgende Hauptwege genutzt worden:

- Hinterfüllsande, Sickerwasser, feste Inhaltsstoffe: Thermische Verwertung/Entsorgung
- Flüssige Inhaltsstoffe: Destillation, Reste ebenfalls thermische Entsorgung
- Metallbehältnisse: Shreddern und anschließend Metallrecycling.

Schließlich mußte noch geklärt werden, inwieweit durch die Basisfolienabdichtung ausgetretene Flüssigkeiten die Betonplatte und den Untergrund kontaminiert haben. Außer dem mit einem kleinen Kernbohrgerät gewonnenen Betonkern (in der Tabelle als BK bezeichnet) sind das Kiesbett (BS 1/1) und der gewachsene Boden (BS 1/2 + 3) untersucht worden.



Abb. 9 Oberflächenreaktion ausgetretener Inhaltsstoffe

*Beton- und Bodenuntersuchungen, wesentliche Analysedaten (Gehalte in mg/kg TS)*

	BK	BS 1/1	BS 1/2 + 3
EOX	1,0	< 1,0	< 1,0
BTEX	1,6	n.n.	n.n.

n.n. = nicht nachweisbar

Die Analysenergebnisse zeigen, daß an den Feststoffen eine von der Deponie verursachte Belastung praktisch noch nicht besteht. Die obersten Millimeter der Betonplatte lassen eine beginnende Kontamination vermuten. Im wesentlichen ist aber der bisher aus dem Deponiekörper ausgetretene Schadstoff in flüssiger Phase verblieben und transportiert worden.

#### 4. Schlußfolgerungen

Die bei der Sanierung der noch sehr jungen Sonderabfalldeponie gesammelten Erfahrungen lassen die folgende verallgemeinerte Einschätzung zu:

1. Auch geringfügige Anzeichen einer „Anormalität“ wie optisch auffällige Sickerwässer oder Ergebnisse

chemischer Analysen (mit Belastungen weit unter den Grenz-/Eingreif-/Sanierungsrichtwerten der einschlägigen Listen) können ein ernst zu nehmender Hinweis auf bestehende Gefährdungspotentiale sein. Während in einer Industrieregion (wie der Raum Halle-Bitterfeld) mit einer großräumigen Grundwasserbelastung z.B. AOX-Werte von 15 µg/l bis 50 µg/l, Ausdruck des allgemeinen Belastungszustandes sind, können in einer industriearmen oder nicht industrialisierten Gegend bereits 10 µg/l ein Indiz für ein größeres Gefahrenpotential sein.

Deshalb sind die sorgfältige historische Recherche und das stufenweise Vorgehen bei den Untersuchungen von größter praktischer Bedeutung.

2. Die tatsächlich von einer „Altablagerung“ ausgehende Gefährdung ist u.a. auch von ihrem Entwicklungszustand abhängig. Neben dem Fehlen oder Vorhandensein und Funktionieren von technischen Schutzmaßnahmen spielen stoffliche Zusammensetzung und Dauer der Lagerung eine wesentliche Rolle.

Im konkreten Falle wäre es im Laufe der nächsten Jahre infolge der fortschreitenden Korrosion der Behältnisse und der Reaktion der Lösungsmittel

mit der Dichtungsbahn sicher zu einer erheblichen Infiltration von Wasserschadstoffen in das Grundwasser gekommen.

3. Vor einer „Entsorgung“ von Sonderabfällen auf oder in Sondermülldeponien bzw. Sonderabfalllagern sollte stets nach einer alternativen Entsorgungsmöglichkeit mittels „Entgiftung“, d.h. Umwandlung der Schadstoffkomponenten in naturidentische Substanzen, gesucht werden, auch wenn dadurch momentan höhere Kosten in Kauf genommen werden müssen.  
Die (Sonder-) Abfalldeponien von heute sind Altlasten von morgen.  
Unser Auftraggeber, die Lackfabrik Oberlichtenau GmbH, hat in diesem Sinne den richtigen Weg beschritten.
4. Durch den Staat könnten solche Schritte wirksam unterstützt werden, indem Maßnahmen zur Vermeidung von Sonderabfall finanziell und moralisch besser honoriert werden als dessen „geordnete Deponierung“.

*Dr.-Ing. habil. Jürgen Keßler  
Beratende Ingenieure für Umweltgeotechnik  
und Grundbau (BIUG) GmbH, Freiberg*

