

# **BAM** Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

## **Forschungsbericht 201**

### **Deponieabdichtungssysteme; Statusbericht**

Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner, Dr.-Ing. Hans August, Dr. Tamás Meggyes,  
Dr. Matthias Brune  
(Herausgeber)



## Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist als Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft das technisch-wissenschaftliche Staatsinstitut der Bundesrepublik Deutschland für Materialtechnologien, Chemische Analytik und Sicherheitstechnik. Dieser Komplex stellt in allen Industrieländern einen technologischen Schlüsselbereich dar, da Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe die Grundlage der gesamten Technik bilden. Die Materialforschung, die zuverlässige, normengerechte Prüfung und chemische Analyse sowie die sicherheitstechnische Beurteilung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen sind wesentliche Voraussetzungen für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Wirtschaft im Hinblick auf die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte, Umweltschutzanforderungen und die Notwendigkeit der sparsamen Verwendung von Rohstoffen und Energie.

Die Bundesanstalt hat die Aufgabe, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern, indem sie Werkstoff- und Materialforschung betreibt, die Materialprüfung sowie die chemische Analytik und Sicherheitstechnik stetig weiterentwickelt.

In diesem Rahmen bestehen folgende Arbeitsschwerpunkte:

1. Technisch-wissenschaftliche Grundlagen des Materialwesens, der Sicherheitstechnik und der chemischen Analytik einschließlich zugehöriger Referenzmaterialien und -verfahren

2. Materialsicherung einschließlich Qualitätssicherung, Materialschutz, Recycling
3. Öffentliche technische Sicherheit
4. Technologien im Umwelt- und Gesundheitsschutz
5. Technologien in der Energiesicherung
6. Technologie- und Wissenstransfer

Ihre Arbeiten gliedern sich in:

- A Forschung und Entwicklung, besonders auf denjenigen Gebieten, die der Leistungssteigerung der Wirtschaft, der Sicherheitstechnik sowie der Schaffung und Erhaltung volkswirtschaftlicher Werte dienen,
- B Prüfung und Untersuchung von Stoffen und technischen Produkten auf der Basis von Gesetzen, Verordnungen oder technischen Regeln,
- C Beratung und Information von Bundesministerien sowie Durchführung von Aufgaben, die ihr von diesen im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft übertragen werden, Durchführung von Aufträgen aus der Wirtschaft, Beratung und Information von Wirtschafts- und Verbraucherorganisationen sowie Mitwirkung in nationalen und internationalen Gremien und Normenausschüssen und bei der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern.

Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen.

# Forschungsbericht 201

**Deponieabdichtungssysteme;**

**Statusbericht**

Dr.-Ing. Ulrich Holzlöhner, Dr.-Ing. Hans August, Dr. Tamás Meggyes,  
Dr. Matthias Brune  
(Herausgeber)

Erstellt im Rahmen des BMFT-Verbundvorhabens „Weiterentwicklung von  
Deponieabdichtungssystemen“  
Projektträgerschaft „Abfallwirtschaft und Altlastensanierung“  
im Umweltbundesamt Berlin

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter dem Förderungskennzeichen 1440 569 I7 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Herausgegeben von der

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
☒ 12200 Berlin  
Telefon (0 30) 81 04-0  
Telefax (0 30) 8 11 20 29

Copyright © 1994 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Am Alten Hafen 113-115 · 27568 Bremerhaven  
☒ Postfach 10 11 10 · 27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 4 60 93-95  
Telefax (04 71) 4 27 65

## Zusammenfassung

Auf der Basis von mehr als 1000 Veröffentlichungen und Berichten erstellte die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) diesen Statusbericht über den Stand der Deponieabdichtungstechnik. Mittlerweile ist auf diesem Gebiet ein beachtliches Grundlagenwissen erarbeitet worden, welches zunehmend erfolgreich in die Baupraxis umgesetzt wird und in Regelwerke eingeht.

Die Kombinationsdichtung, bestehend aus einer Erdstoffdichtungsschicht im engen Verbund mit einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB), einem Schutzsystem für die KDB, einem oder mehreren Entwässerungssystemen sowie (in Oberflächenabdichtungen) einer Deponiegasfassung hat sich international als Standardabdichtungssystem durchgesetzt. Die Regelwerke schreiben im allgemeinen für die Erdstoffdichtung eine Mindestdicke von 0,75 bis 1,5 m und einen maximalen Durchlässigkeitsbeiwert zwischen  $10^{-8}$  und  $5 \cdot 10^{-10}$  m/s vor, die KDB soll aus PE-HD bestehen und 2,5 mm dick sein. Alternative Abdichtungssysteme wie beispielsweise doppelte Kombinationsabdichtungen oder Dichtsysteme mit Asphalt sind ebenso zugelassen, wenn sie gegenüber der Kombinationsdichtung mindestens gleichwertig sind. Zur Zeit werden intensiv Kriterien für diese "Gleichwertigkeit" erarbeitet und diskutiert.

Erdstoffdichtungen bestehen in der Regel vorwiegend aus Ton und Schluff, aber auch gemischtkörnige Dichtungen mit nichtbindigen Bodenfraktionen finden zunehmend Einsatz. Ein großer Vorteil der Erdstoffe als Dichtelement ist ihre Beständigkeit über geologische Zeiträume. Die mannigfaltigen Erfahrungen mit Erdstoffen insbesondere aus dem Grundbau lassen sich aber nur zu einem kleinen Teil auf den Deponiebau übertragen. Viele Eigenschaften der Erdstoffe müssen aus einem anderen Blickwinkel neu untersucht werden, denn die Beanspruchungen einer Deponieabdichtung unterscheiden sich oft von denen des üblichen Grundbaus. Umfangreiche Forschungsarbeit an Erdstoffen wurde und wird geleistet auf den Gebieten Wasserdurchlässigkeit bei gleichzeitiger chemischer und/oder mechanischer Beanspruchung, Schadstofftransport, Feuchtehaushalt, Austrocknungsverhalten unter Deponiebedingungen, Korrelation von labor- und von feldgemessenen Durchlässigkeitsbeiwerten, Zug- und Druckbeanspruchungen an Böschungen und bei Setzungen des Untergrunds, Standsicherheit mehrlagiger Dichtsysteme und Standsicherheit des Abfallkörpers. Darüber hinaus werden die Einflüsse von Frost, Chemikalien und Sorptionsvorgängen auf die mechanische Stabilität und das Durchlässigkeitsverhalten von Erdstoffen intensiv untersucht, dieses führte bereits zur Entwicklung von Additiven, um die genannten Eigenschaften zu verbessern.

Kunststoffdichtungsbahnen sind hervorragende Sperren für den konvektiven Transport. Im festen Verbund mit einer darunterliegenden Erdstoffdichtung unterbinden sie zudem die Diffusion quasi vollständig. Dies setzt aber eine sehr gute Qualitätssicherung bei der Herstellung der Dichtungsbahn und beim Einbau in der Deponie voraus. Die Herstellung, der Einbau und die Qualitätssicherung sind in Deutschland durch ein Zulassungsverfahren geregelt. Für den Einsatz an Böschungen sind KDB im Hinblick auf Oberflächenstruktur und Verformungsverhalten sorgfältig auszuwählen, zu dieser Thematik werden z. Z. noch Untersuchungen vorgenommen. Für eine langfristige Funktionsfähigkeit der KDB ist das Schutzsystem von großer Bedeutung. Die Entwicklung dieser Systeme ist noch voll im Fluß, wobei der Trend weg von den voll geosynthetischen hin zu teilmineralischen Schutzsystemen geht.

Entwässerungssysteme insbesondere an der Deponiebasis sind harten Beanspruchungen ausgesetzt. Damit sie langfristig funktionsfähig bleiben, müssen sie so gestaltet bzw. unterhalten werden, daß die Entwässerungsrohre (trotz Verschwächung durch Perforation) der Müllaufflast standhalten und die Entwässerungsschicht zusammen mit den Rohren nicht durch Verstopfungs- und Inkrustationsvorgänge an Durchlässigkeit verliert.

Die Frage, welche Dichtungssysteme und welche Dichtmaterialien am geeignetsten für Oberflächenabdichtungen sind, ist in Diskussion und bedarf noch weiterer Forschung.

Dichtwände werden schon seit einiger Zeit erfolgreich bei der Altlastensicherung eingesetzt. Die am häufigsten eingesetzten Dichtmaterialien sind Bentonit-Zement-Suspensionen und Stahl.

## Summary

The Federal Institute for Materials Research and Testing have analysed more than 1000 papers and documents and compiled a state-of-the-art report on landfill liner systems. Since their introduction, landfill liners have achieved considerable standards in scientific understanding, engineering skill and statutory approach.

Generally, composite liners are required which consist of earthen layer(s) in intimate contact with geomembrane(s), protective layers, drainage systems and (in capping systems) gas venting and collection equipment. A minimum thickness (2.5 mm) for the geomembrane (usually special types of HDPE with very good ESC resistance), maximum permeability ( $10^{-8}$  to  $5 \times 10^{-10}$  m/s) and minimum thickness (0.75 to 1.5 m) of the clay and other technical parameters are specified in regulations and quality systems. Double liners, pure clay liners, other materials (e.g. asphalt) are also permitted and used if they are equivalent to the composite liner. Methods for the assessment of equivalent liner alternatives are under discussion.

The main constituents of earthen liners are clay and silt, although non-cohesive soils have also been suggested. An important argument for the use of earthen materials is their durability proved over geological time. Though considerable experience on liners has been accumulated in other fields (hydraulic and foundation engineering etc.), many properties have had to be studied from a new approach because of the more stringent requirements and heavy-duty conditions of the landfill industry. Permeability to water under chemical and/or mechanical attack, pollutant transport, moisture behaviour, desiccation under landfill conditions, discrepancy between laboratory and field data on permeability, strains and stresses on slopes, subsidence of the subgrade and settlement of waste, the stability of multi-layered liners and of the landfill itself has been extensively investigated. The effects of frost, chemicals, sorption and mineralogical changes on strength and permeability have been of special interest. Organic and inorganic additives to improve these properties are increasingly being used.

HDPE geomembranes provide an excellent barrier effect if the requirements of the quality system are observed in their manufacture and installation, in field seaming and in the design for slopes. In composite liners the geomembrane completely suppresses convection, and a concentration leap of pollutants on the geomembrane/clay interface counteracts diffusion. Resistance of the protective layers under landfill conditions is of great importance. Drainage pipes in basal liners require special design considerations. They have to withstand high loads from the overburden, while their strength is weakened by apertures and their function is often hampered by incrustation.

Materials to be used in capping systems - essential in reducing the amount of water percolating into the landfill - are still under discussion. Cut-offs have become effective tools in sealing off contaminated land, bentonite/cement slurries, composite systems, steel etc. being the most frequently used materials. In spite of the considerable progress made some problems of landfill liners still remain to be solved.

## Inhaltsverzeichnis

A	Einleitung (U. Holzlöhner, H. August)	7
B	Abdichtungssysteme (M. Brune)	9
C	Entwässerungssysteme (M. Brune)	19
D	Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen (U. Müller)	41
E	Kunststoffdichtungsbahnen (W. Müller, G. Lüders)	49
F	Erdstoffabdichtungen und andere mineralische Abdichtungen (U. Holzlöhner)	59
G	Mechanische Beanspruchung von Erdstoff-Abdichtungsschichten, Setzungsschäden (U. Holzlöhner)	61
H	Feuchtehaushalt, Austrocknungsgefährdung von Erdstoff-Abdichtungsschichten (U. Holzlöhner)	69
I	Schadstofftransport (U. Holzlöhner, H. August)	85
J	Hydraulische Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten (U. Holzlöhner)	99
K	Chemische und physikalische Einwirkungen auf mineralische Abdichtungsmaterialien, innovative Baustoffe (U. Holzlöhner)	105
L	Bauverfahren, Qualitätssicherung (T. Meggyes)	117
M	Zusammenwirken von Komponenten, Systemverhalten (M. Brune)	135
N	Dichtwände (T. Meggyes)	153
O	Oberflächenabdichtungssysteme (T. Meggyes)	173
P	Abdichtungssysteme mit Asphalt (H. August)	185





## A Einleitung (U. Holzlöhner, H. August)

Ein Statusbericht soll den allgemeinen, internationalen Stand des betrachteten Fachgebiets darstellen. In der Abfallentsorgung und damit auch in der Deponieabdichtungstechnik bestehen jedoch große Unterschiede zwischen den verschiedenen Ländern. Zu den wenigen Prinzipien und Zielen, die allgemein angestrebt oder doch wenigstens propagiert werden, gehört die Hierarchie in der Abfallbehandlung: Vermeiden, Verwerten, Inertisieren, Deponieren. Deponieren ist also die niedrigstwertige Behandlungsart. Von der Deponie sollen möglichst keine schädlichen Wirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diesem Ziel kommt man nahe, indem man die einzelnen Barrieren des Multibarrierenkonzepts nach Stief ständig verbessert. Die Deponieabdichtungen sind eine Barriere, andere sind beispielsweise die geologischen Bedingungen des Standorts und der Deponieinhalt. Das allgemein akzeptierte Ziel für den Inhalt ist, ihn geogenen Ablagerungen vergleichbar zu machen. Dann wären keine schädlicheren Emissionen als bei natürlich entstandenen Gesteinen zu erwarten. Wenn diese Forderung nicht erfüllt ist, müssen andere Barrieren wie die Abdichtungen vorhanden sein.

Bei der praktischen Umsetzung gibt es in den einzelnen Ländern große Unterschiede. Die Ursachen dafür sind natürlicher und wirtschaftlich-politischer Art. Für Deutschland sind folgende Faktoren bestimmend: Das humide Klima begünstigt den Schadstoffausbreitungsweg Wasser und führt zur Gegenmaßnahme der Oberflächenabdichtung von Deponien. Standorte auf Lockergesteinen mit geringem Flurabstand erfordern eine wirksame Basisabdichtung. Große Bevölkerungsdichte, hoher Industrialisierungsgrad und eine kritische Öffentlichkeit erzwingen eine ständige Weiterentwicklung der Deponieabdichtungstechnik. Die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit erleichtert die Durchführung der als notwendig erkannten Maßnahmen. In Südeuropa, in trockenen Klimazonen und in Permafrostgebieten wird wegen geringeren Wasseranfalls die Abdichtung als nicht so dringend angesehen. England hat sich lange Zeit auf geologische Barrieren, Co-disposal und die Selbstreinigungskraft seiner Flüsse und umgebenden Meere verlassen. Deshalb wird hier wie in dem ähnlichen Bedingungen unterworfenen Japan erst seit wenigen Jahren die Abdichtungstechnik intensiv betrieben. Die neuen Bundesländer und die mitteleuropäischen Staaten sind gegenüber dem westdeutschen Entwicklungsstand um mindestens zwei Jahrzehnte zurück. In den Entwicklungsländern sind kaum Ansätze einer vernünftigen Abfallwirtschaft zu erkennen. Die meisten der für unsere Verhältnisse wichtigen Erkenntnisse werden also aus Mitteleuropa und aus Nordamerika zu erwarten sein.

In Deutschland spiegeln die TA Abfall und die TA Siedlungsabfall den gegenwärtigen Stand der Deponietechnik wider. Es heißt dort "Deponien sind Endlager und müssen so gebaut und betrieben werden, daß sie nach Abschluß der Einlagerung und gegebenenfalls einer

gewissen Zeit der Nachsorge sich selbst überlassen werden können". Bei dem gegenwärtigen Stand der Entsorgung kann das nur heißen, daß für alle Barrieren – für die geologische wie für die Barrieren "Abdichtungen" und "Deponieinhalt" – jeweils das Optimum anzustreben ist. Für die Abdichtungen steht die Gewährleistung der Langzeitfunktionsfähigkeit im Vordergrund. Hierbei kommt der Qualitätssicherung, Kontrolle und Überwachung auf der baubetrieblichen Seite und der Beständigkeit auf der Materialseite besondere Bedeutung zu. Die baulichen Komponenten und die Herstellungsvorgänge bestimmen über ihre Teilsicherheiten bzw. Versagenswahrscheinlichkeiten das Verhalten des Gesamtsystems Abdichtung.

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) koordiniert das BMFT-Verbundvorhaben "Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen" (Förderkennzeichen 1440569). Der vorliegende Bericht beschreibt den Stand der Technik ohne die schon vorliegenden Teilergebnisse des laufenden Vorhabens. Im Hauptteil eines jeden Kapitels ist der gegenwärtige Stand dargestellt; im anschließenden Abschnitt "Offene Fragen, Wissenslücken" wird auf die zu dem betreffenden Teilgebiet gehörenden Forschungsvorhaben innerhalb des Verbundvorhabens verwiesen.

Der Bericht beschränkt sich auf obertägige Deponien. Nicht behandelt werden siloartige Betonbauwerke und andere als Zwischenlager einzustufende Anlagen. Das Thema ist ferner abgegrenzt gegen die Nachbargebiete "Deponieuntergrund" und "Deponiekörper". Beide werden nur dann berührt, wenn sich Rückwirkungen auf die Abdichtungen ergeben. Es sei auf die parallel laufenden BMFT-geförderten Verbundvorhaben "Deponieuntergrund" und "Deponiekörper" hingewiesen, die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und von der Bergischen Universität-Gesamthochschule Wuppertal koordiniert werden.

Folgende Personen trugen mit ihren Arbeiten zur Vervollständigung des Statusberichtes bei und sind in den Inhaltsverzeichnissen der einzelnen Kapitel dort aufgeführt, wo ihr Beitrag einfloß: Herr Dipl.-Ing. U. Aversch, Herr Prof. H. Beitzel, Herr Prof. H. L. Jessberger, Herr Dipl.-Ing. M. El Khafif, Herr K. Lenfort, Herr Dr. agrar. R. Plagge, Frau B. Schütz und Herr Dipl.-Ing. T. Voigt. Weiterhin sei den folgenden Personen herzlichst für Anregungen, Korrekturen und Vorschläge gedankt: Frau Dr. A. Gorantonaki, Herrn Prof. J. Brauns, Herrn Prof. T. Dietrich, Herrn A. Friedrich, Herrn Dipl.-Math. G. Heibroock, Herrn Dipl.-Ing. J. Kayser, Herrn Prof. A. Komodromos, Herrn G. Korsch, Herrn Dipl.-Ing. K. Mallwitz, Herrn Dr. S. Melchior, Herrn Dr. W. Müller, Herrn Dipl.-Geol. H.-J. Schmitz, Herrn Dr.-Ing. E.-J. Vater, Herrn Dr. R. Wienberg und allen weiteren Teilnehmern des BMFT-Verbundvorhabens "Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen".



## B Abdichtungssysteme (M. Brune)

1	Einführung	9
2	Abdichtungssysteme im internationalen Vergleich	9
2.1	Deutschland	9
2.2	Österreich	10
2.3	Schweiz	11
2.4	Dänemark	11
2.5	Großbritannien	12
2.6	Vereinigte Staaten von Amerika	13
2.7	Italien	14
2.8	Japan	15
2.9	Ungarn (T. Meggyes)	15
3	Literatur	16

### 1 Einführung

Im folgenden soll ein vergleichender Überblick über die Gestaltung von Deponieabdichtungssystemen in sechs europäischen Ländern, den USA und Japan entsprechend dem gegenwärtigen Stand der Technik gegeben werden. "Stand der Technik" bezieht sich in diesem Zusammenhang, wenn nicht anders angegeben, auf die jeweils kritischste Deponieklasse in dem betreffenden Land

(Sonderabfalldeponien), wobei die z. Z. gängigsten Konzepte berücksichtigt werden. Natürlich gibt es in fast jedem Land über den im Abschnitt 2 wiedergegebenen Standard hinaus quasi beliebig aufwendigere einzelne Deponieprojekte für hochbrisante toxische Abfälle u.ä., welche aber nicht Gegenstand dieses Kapitels sein sollen.

### 2 Abdichtungssysteme im internationalen Vergleich

Die folgenden Unterabschnitte beginnen mit einigen Erläuterungen (Deponieklassen, für die der folgend dargestellte Abdichtungsstandard in dem jeweiligen Land gilt, ggf. weitere Informationen zum abfallwirtschaftlichen Kontext) sowie mit Literatur-Quellenangaben.

Den Hauptteil eines jeweiligen Unterabschnitts bilden tabellarische Darstellungen des Abdichtungsstandards

- für die Basisabdichtung sowie
- für die Oberflächenabdichtung (sofern den Verfassern Angaben hierüber bekannt geworden sind).

Darin bedeuten KDB = Kunststoffdichtungsbahn, mineral. = mineralisch, Rekult.-schicht = Rekultivierungsschicht, landw. = landwirtschaftlich, forstw. = forstwirtschaftlich.

#### 2.1 Deutschland

Die Praxis der Gestaltung von Deponieabdichtungssystemen in Deutschland lehnt sich im wesentlichen an die Anforderungen der maßgeblichen Regelwerke an.

Dieses sind: die TA Abfall (1991) für Sonderabfalldeponien; die TA Siedlungsabfall (1993) für Siedlungsabfalldeponien; Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen (BAM, 1992); die DIN 19 667 für die Gestaltung von Entwässerungssystemen und auf Länderebene die Runderlasse der Länder zur Durchführung des Abfallgesetzes (z. B. Niedersächsischer Minister für Umwelt, 1988). Damit der Abfall auf einer Siedlungsabfalldeponie deponiert werden kann, dürfen sein Gehalt an organischer Substanz und seine Eluatkonzentrationen für bestimmte Substanzen (Schwermetalle etc.) bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Nach diesem Kriterium werden die Siedlungsabfalldeponien noch einmal in 2 Klassen unterteilt (Klasse 2 beherbergt kritischere Abfälle als Klasse 1).

Der folgend wiedergegebene Aufbau bezieht sich auf Sonderabfalldeponien. Der Abdichtungsaufbau für Siedlungsabfälle weicht im wesentlichen in drei Punkten hiervon ab:

- 1) An den Untergrund werden weniger hohe Anforderungen gestellt.

- 2) Die mineralische Dichtung in der Basisabdichtung braucht nur 75 cm dick (3 Lagen; Deponieklasse 2) bzw. 50 cm dick (2 Lagen; Deponieklasse 1) zu sein.
- 3) Die mineralische Abdichtung an der Deponieoberfläche braucht nur einen k-Wert von höchstens  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s aufzuweisen; Dichtungsbahnen zur Oberflächenabdichtung können aus Recyclaten bestehen, sofern diese Bahnen eine Zulassung durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) haben.

<b>KDB</b>	PE-HD, Dicke = 2,5 mm, Zulassung erforderlich.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,5 m, in 2 Lagen verdichtet, $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s
<b>Ausgl.-schicht</b>	Grobsand, Schichtdicke = 0,5 m, gleichzeitig der Gasdränage dienend.

### Basisabdichtungssystem

<b>keine Filterschicht</b>	bzw. Trennlage zum Abfall hin.
<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, Kies 16–32 mm, $k \geq 10^{-3}$ m/s (langfristig), Quergefälle 3 %. Dränrohre: PE-HD, Durchmesser $\geq 250$ mm, perforiert, inspizierbar, mittig in Dränschicht, Längsgefälle 1 %, Abstand $\leq 30$ m.
<b>Schutzschicht</b>	genadeltes Vlies, um $2000 \text{ g/m}^2$ ("non-woven geotextile"). Trend zu teilmineralischen Schutzschichten (Sandmatten etc.), Zulassung durch die BAM in einigen Bundesländern erforderlich.
<b>KDB</b>	PE-HD, Dicke = 2,5 mm, Zulassung erforderlich.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 1,5 m, in 6 Lagen verdichtet, $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s.
<b>Untergrund</b>	Schichtdicke $\geq 3$ m, $k \leq 10^{-7}$ m/s, Entfernung Deponieplanum – höchster Grundwasserspiegel: $\geq 1$ m.

### Oberflächenabdichtungssystem

<b>Rekult.-schicht</b>	kulturfähiger Boden, Schichtdicke = 1 m
<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, $k \geq 10^{-3}$ m/s (langfristig), Hanggefälle 5 %. Dränrohre: PE-HD, Durchmesser $\geq 250$ mm, perforiert, inspizierbar, mittig in Dränschicht, in Längsrichtung, Abstand gemäß hydraulischer Bemessung.
<b>Schutzschicht</b>	kann entfallen, da Oberflächendränschicht für $k \geq 10^{-3}$ m/s (langfristig) nur einen wirksamen Korndurchmesser um 1 mm erfordert (Ramke, 1991).

## 2.2 Österreich

Der nachfolgend dargestellte Abdichtungsaufbau wird von Fischer & Schenkel (1990), Lechner (1990) sowie Lechner & Pawlick (1988) detailliert beschrieben, und bezieht sich auf die Deponieklassen Industriedeponien, Reststoffdeponien und Reaktordeponien (= Deponien für Siedlungsabfälle bzw. Abfälle mit biologisch abbaubaren organischen Bestandteilen). Nicht gefordert wird dieser Aufbau für Inertstoffdeponien. Die genannten Deponieklassen unterscheiden sich vor allem in den erlaubten Grenzwerten für Abfall-Eluat-Konzentrationen von CSB, Kohlenwasserstoffen, halogenierten Kohlenwasserstoffen, Schwermetallen etc. voneinander.

### Basisabdichtungssystem

<b>keine Filterschicht</b>	bzw. Trennlage zum Abfall hin.
<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, Kies, Quergefälle 3 %. Dränrohre: PE-HD, Durchmesser $\geq 200$ mm, perforiert, inspizierbar, mittig in Dränschicht, Längsgefälle 2 %, Abstand gemäß hydraulischer Bemessung.
<b>Schutzschicht</b>	genadeltes Vlies ("non-woven geotextile").
<b>KDB</b>	PE-HD, Dicke $\geq 2$ mm.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,6 m, in 3 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s, natürliche Abdichtungsböden bevorzugt.
<b>Untergrund</b>	anstehendes Gestein bzw. anstehende Tonböden, Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

### Oberflächenabdichtungssystem

<b>Rekult.-schicht</b>	kulturfähiger Boden, Schichtdicke = 2 m (landw. Nutzung), Schichtdicke = 3 m (forstw. Nutzung).
<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Flächenfilter, ansonsten keine Vorgaben.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,6 m, in 3 Lagen verdichtet, zum k-Wert keine Vorgaben.

## 2.3 Schweiz

Der im folgenden dargestellte Abdichtungsaufbau wird von Fischer & Schenkel (1990) sowie Steffen (1992) beschrieben und lehnt sich an die Technische Verordnung über Abfälle (1990), herausgegeben vom Schweizerischen Bundesrat, an. Er bezieht sich auf die Deponieklassen Reststoffdeponien und Reaktordeponien (= Deponien für Siedlungsabfälle und Abfälle mit biologisch abbaubaren organischen Bestandteilen; Übergangslösung). Nicht gefordert wird dieser Aufbau für Inertstoffdeponien. Die genannten Deponieklassen unterscheiden sich vor allem in den erlaubten Grenzwerten für Abfall-Eluat-Konzentrationen von CSB, Kohlenwasserstoffen, halogenierten Kohlenwasserstoffen, Schwermetallen etc. voneinander. Die Schweizer Technische Verordnung über Abfälle legt das Schwerkraft seiner Anforderungen auf die Barriere "Deponiekörper" (vgl. Stief, 1986), d. h. sie stellt hohe Anforderungen an die Abfallvorbehandlung (Wiederverwertung, Sortierung, Verbrennung, Kompostierung, Immobilisierung etc.). Diese Anforderungen schlagen sich in entsprechend niedrigen Eluat-Grenzwerten für den Abfall nieder; dafür braucht die Deponieabdichtung nicht so aufwendig gestaltet zu werden wie etwa in Deutschland.

### Basisabdichtungssystem

<b>Drän-system</b>	vgl. Abschnitte 2.1 und 2.2.
<b>KDB</b>	Dicke $\geq 2,5$ mm, freiwillige Option zusätzlich zur mineral. Dichtung, soll dieser direkt aufliegen.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,8 m, in 3 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s, = 0,5 m, wenn KDB darüberliegt
<b>Asphalt-dichtg.</b>	alternativ zur mineral. Dichtg. (+ KDB) einsetzbar, Schichtdicke $\geq 0,07$ m, Hohlraumgehalt $\leq 3$ %, auf bituminöser Tragschicht.
<b>Untergrund</b>	Schichtdicke $\geq 10$ m, $k \leq 10^{-7}$ m/s.

### Oberflächenabdichtungssystem

An die Oberflächenabdichtung werden vergleichsweise bescheidene Anforderungen gestellt; eine "Abdeckung" (Fischer & Schenkel, 1990), z. B. in Form einer Kunststoffdichtungsbahn, genügt.

## 2.4 Dänemark

Der nachfolgend dargestellte Abdichtungsaufbau lehnt sich an die Empfehlungen des Dansk Ingenioerforening (1991) an; vgl. auch Christensen (1990). Er bezieht sich auf die Deponiekategorie Siedlungsabfalldeponien. Nicht gefordert wird dieser Aufbau für Müllverbrennungs-

asche-, Flugaschedeponien sowie für Deponien anderer Inertstoffabfälle.

### Basisabdichtungssystem (häufigste Variante)

<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, Kies bzw. Sand ohne Schluffanteile, Quergefälle gemäß hydraulischer Bemessung. Dränrohre: perforiert, inspizierbar, mittig in Dränschicht, Längsgefälle gemäß hydraul. Bemessung, Abstand $\leq 20$ m. Anstelle v. Rohren auch Schotterrigolen.
<b>Schutz-schicht</b>	Geotextil hohen Flächengewichts oder Kiessandgemisch, Schichtdicke = 0,3 m, Körnung $\leq 20$ mm, Rundkorn.
<b>KDB</b>	nicht obligatorisch; keine allgemeingültigen Anford. an Dicke und Werkstoff.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,5 m, in 2 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-10}$ m/s. Bentonitbeimengung empfohlen, diese kann bei Tonboden als Untergrund, Schichtdicke $\geq 2$ m, entfallen.
<b>Untergrund</b>	keine allgemeingültige Anforderungen, Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

### Basisabdichtungssysteme (alternativ zulässig)

<b>Drän-system</b>	siehe Basisabdichtungssystem (häufigste Variante).
<b>Schutz-schicht</b>	Geotextil hohen Flächengewichts oder Kiessandgemisch, Schichtdicke = 0,3 m, Körnung $\leq 20$ mm, Rundkorn.
<b>KDB</b>	keine allgemeingült. Anforderungen an Dicke und Werkstoff.
<b>Schutz-schicht</b>	Geotextil hohen Flächengewichts oder Kiessandgemisch, Schichtdicke = 0,3 m, Körnung $\leq 20$ mm, Rundkorn.
<b>KDB</b>	keine allgemeingült. Anforderungen an Dicke und Werkstoff.
<b>Ausgl.-schicht</b>	Kiessandgemisch, Schichtdicke = 0,1 m, Körnung $\leq 25$ mm, Rundkorn.
<b>Untergrund</b>	keine allgemeingültige Anforderungen, Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

Zwischen oberer KDB und unterer Schutzschicht kann zusätzlich ein Kontrolldränsystem (vgl. Kapitel M, Abschnitt 2) angeordnet sein.

## Oberflächenabdichtungssystem

Ein Oberflächenabdichtungssystem wird von Dansk Ingenioerforening (1991) nur für endverfüllte Deponieabschnitte von Deponien mit gut kompaktierbaren Abfällen – beispielsweise von Monodeponien für Verbrennungsrückstände – empfohlen, da bei Hausmülldeponien die nach der Verfüllung weitergehenden Setzungen zuwenig abgeschätzt werden könnten. Entschließe sich der Betreiber einer Siedlungsabfalldeponie dennoch für die Anlage einer Oberflächenabdichtung, so sei folgender Aufbau zu empfehlen:

<b>Rekult.-schicht</b>	kulturfähiger Boden, Schichtdicke $\geq 1,7$ m (für landwirtschaftl. Nutzung).
<b>Drän-system</b>	Dränschicht, Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, Kies bzw. Sand, landwirtschaftliche Dränrohre, der Dichtung aufliegend, Abstand $\leq 20$ m.
<b>KDB</b>	nicht obligatorisch; keine allgemeingültigen Anford. an Dicke und Werkstoff, KDB kann mineralische Dichtung ersetzen.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,5 m, in 2 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-10}$ m/s.
<b>Ausgl.-schicht</b>	Grobsand, Schichtdicke = 0,5 m, gleichzeitig der Gasdränage dienend.

## 2.5 Großbritannien

Die folgende Darstellung des Abdichtungsaufbaus britischer Abfalldeponien basiert auf den "Guidelines on the Use of Landfill Liners" (North West Waste Disposal Officers, Landfill Liners Sub-Group, 1988) sowie auf den Veröffentlichungen von Rae (1989) und von Meggyes (1993). Der Bezug dieses Abdichtungsaufbaus auf bestimmte Deponieklassen kann nicht eindeutig hergestellt werden, da Deponiekategorien wie in Deutschland, Österreich oder Dänemark in Großbritannien nicht existieren: das "Co-Disposal", die gemeinsame Deponierung von Haus- und Gewerbeabfällen, ist dort eine verbreitete Praxis.

Die Mindestanforderungen an die Basisabdichtung spiegeln sich in der ersten der folgenden drei Tabellen wieder. Darüber hinaus haben aber die genehmigenden Behörden (hier sei vor allem die National Rivers Authority genannt) einen großen Spielraum, andersartige Dichtungssysteme als der "Grundvariante" gleichwertig anzuerkennen. In der zweiten und dritten Tabelle werden zwei der alternativen Dichtsysteme gezeigt, die ebenfalls zugelassen und in der Praxis bereits realisiert worden sind (Meggyes, 1993). Detaillierte Informationen, was die Gestaltung des Dränsystems betrifft,

konnten in diesem Zusammenhang nicht gewonnen werden.

### Basisabdichtungssystem (lt. Mindestanforderungen)

<b>Drän-system</b>	keine allgemeingültigen Anforderungen.
<b>Schutz-schicht</b>	Sand oder Sand mit Tonanteilen, Schichtdicke $\geq 0,1$ m.
<b>KDB</b>	Dicke $\geq 2$ mm, nicht obligatorisch, im Preßverbund mit:
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 1 m, in mehreren Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s, natürlicher Tonboden bevorzugt.
<b>Unter-ground</b>	möglichst schwachdurchlässiges Material, Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

### Basisabdichtungssystem (Alternativvariante)

<b>Drän-system</b>	keine allgemeingültigen Anforderungen.
<b>Schutz-schicht</b>	Geotextil hohen Flächengewichts.
<b>KDB</b>	Dicke $\geq 2$ mm.
<b>Schutz-schicht</b>	Geotextil hohen Flächengewichts.
<b>Drän-system</b>	zur Kontrolle und Leckdetektion (vgl. Kapitel M, Abschnitt 2).
<b>Schutz-schicht</b>	Geotextil hohen Flächengewichts.
<b>KDB</b>	Dicke $\geq 2$ mm.
<b>Ausgl.-schicht</b>	Sand (wenn kein glattes Planum hergestellt werden kann).
<b>Unter-ground</b>	möglichst schwachdurchlässiges Material, Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

### Basisabdichtungssystem (weitere Alternativvariante) siehe nächste Seite

## Oberflächenabdichtungssystem

Der Deponiebetrieb soll in kleinen, separat entwässerbaren Deponieabschnitten vorgenommen werden. Sowie ein Deponieabschnitt endverfüllt ist, muß er oberflächenabgedichtet werden. Die Mindestanforderung besteht darin, als Dichtschicht eine mineralische Dichtung, Schichthöhe = 1 m im verdichteten Zustand, verdichtet in mehreren Lagen, einzubauen, über welcher das Regenwasser zu fassen ist. Eine Rekultivierung ist erwünscht.

### Basisabdichtungssystem (weitere Alternativvariante)

<b>Drän-system</b>	keine allgemeingültigen Anforderungen.
<b>Schutz-schicht</b>	Sand oder Sand mit Tonanteilen, Schichtdicke $\geq 0,1$ m.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,5 m, in 2 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s, natürlicher Tonboden bevorzugt.
<b>Filter-schicht</b>	Geotextil.
<b>Drän-system</b>	zur Kontrolle und Leckdetektion (vgl. Kapitel M, Abschnitt 2).
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,5 m, in 2 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s, natürlicher Tonboden bevorzugt.
<b>Unter-grund</b>	keine allgemeingültige Anforderungen, Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

## 2.6 Vereinigte Staaten von Amerika

Zum Stand der Deponieabdichtungstechnik in den USA vgl. EPA (1987a, 1987b, 1988a, 1988b, 1989a, 1989b, 1991), Daniel & Koerner (1991), Carra (1990) sowie die Ausführungen im Abschnitt 2.2 des Kapitels C (Entwässerungssysteme).

In den USA werden Sonderabfalldeponien von Siedlungsabfalldeponien (Sanitary Landfills bzw. Municipal Solid Waste (MSW-) Landfills) unterschieden. Die Unterscheidungskriterien sind ähnlich, wie für Deutschland, Österreich, die Schweiz und Japan in diesem Zusammenhang beschrieben. Streng genommen bezieht sich der nachfolgend dargestellte Abdichtungsaufbau für Basis- und Oberflächenabdichtungen nur auf die Sonderabfalldeponien, welche noch einmal in Hazardous Waste Piles (im Sinne von Haldendeponien), Hazardous Waste Landfills (im Sinne von Grubendeponien) sowie in Hazardous Waste Surface Impoundments (Becken für flüssige Sonderabfälle) unterteilt werden. Inwieweit für Siedlungsabfalldeponien derselbe oder ein anderer Standard gefordert wird, ist von Bundesstaat zu Bundesstaat verschieden. Im Staate New York gilt beispielsweise derselbe Abdichtungsstandard für Siedlungsabfalldeponien und für Sonderabfalldeponien.

Es gibt auch keinen bundeseinheitlichen Standard für die Abdichtung von Sonderabfalldeponien. Die Environmental Protection Agency (EPA), die US-Umweltbehörde, gibt zwar in ihren Regelwerken einen technischen Mindeststandard vor, jeder Bundesstaat darf aber in seinen Anforderungen über den Standard der US-EPA hinausgehen, darf diesen jedoch nicht unterschreiten.

Die hier dargestellten Abdichtungssysteme für Basis und Oberfläche repräsentieren somit den Abdichtungsstandard dicht besiedelter, hochindustrialisierter Bundesstaaten wie New York.

Im folgenden bedeuten LCRS = (Primary) Leachate Collection and Removal System, S-LCRS = Secondary Leachate Collection and Removal System.

### Basisabdichtungssystem

<b>Filter-schicht</b>	Geotextil mit geringem Flächengewicht und relativ großer Öffnungsweite oder mineralischer, weitgestufter Filter, Schichtdicke = 0,15 m.
<b>oberes Drän-system (LCRS)</b>	mineralische Dränschicht, Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, $k \geq 10^{-2}$ m/s, Quergefälle 2 %, an der Böschung als Geonet. Dränrohre: PE-HD, Durchmesser $\geq 150$ mm, perforiert, inspizierbar, mittig in Dränschicht, Längsgefälle 2 %, Abstand gemäß hydraulischer Bemessung.
<b>Schutz-schicht</b>	genadeltes Vlies, ("non-woven geotextile") hohen Flächengewichts.
<b>Obere KDB</b>	PE-HD bevorzugt, Dicke = 1,5 oder 2 mm, "schlaffe" Verlegung unter teilweisem Verzicht auf den Preßverbund.
<b>Bentonit-matte</b>	10 mm dicke Bentonitschicht (gequollen), verpackt zwischen 2 Lagen genadeltem Vlies, häufig aufliegend auf einer 1,5 mm dicken PE-HD-Bahn, die das Eindringen von Bentonit in das Geonet (s. u.) verhindern soll.
<b>Kontroll-dränsyst. (S-LCRS)</b>	Geonet, Höhe des Fließquerschnitts 5–7,5 mm, Maschenweite um 10 mm, Quergefälle 2 %. Dränrohre in Drainagegräben mit Grobkies unterhalb der Geonet-Ebene, Rohreigenschaften siehe oberes Dränsystem.
<b>Untere KDB</b>	PE-HD bevorzugt, Dicke = 1,5 oder 2 mm (muß sich den Draingräben – s. o. – anpassen).
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,9 m (Mindeststärke; Drainagegräben sind zu berücksichtigen), in 6 Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s, überall in Kontakt zur KDB.
<b>Unter-grund</b>	schwachdurchlässig (Fels, Tonboden), Grundwasserspiegel immer unterhalb der Dichtung.

## Oberflächenabdichtungssystem

<b>Rekult.-schicht</b>	kulturfähiger Boden, Schichtdicke = 0,6 m, darunter Schottersteine, Schichtdicke = 0,3 m, als Dichtungsschutz.
<b>Filter-schicht</b>	Geotextil mit geringem Flächengewicht und relativ großer Öffnungsweite oder mineralischer, weitgestufter Filter, Schichtdicke = 0,1 m.
<b>Drän-system</b>	Sand-Dränschicht, Schichtdicke = 0,3 m, Flächenfilter, $k \geq 10^{-4}$ m/s, Hanggefälle 3–5 %, oder Geonet-Dränschicht.
<b>KDB</b>	Dicke $\geq 0,5$ mm, häufig Verwendung von Low-Density-PE's.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,6 m, in mehreren Lagen verdichtet, $k \leq 10^{-9}$ m/s.
<b>Filter-schicht</b>	Geotextil mit geringem Flächengewicht und relativ geringer Öffnungsweite.
<b>Ausgl.-schicht</b>	Kies, Schichtdicke = 0,3 m, gleichzeitig der Gasdrainage dienend.

## 2.7 Italien

In Italien werden die Deponiekategorien Siedlungsabfalldeponien (Klasse 1), Sonderabfalldeponien für Inertstoffe und für nicht oder schwach toxische Sonderabfälle (Klasse 2) und Sonderabfalldeponien für toxische Sonderabfälle (Klasse 3) unterschieden. Die gesetzlichen Mindestanforderungen an eine Basisabdichtung der Klassen 1 und 2 besteht darin, daß eine "impermeable" künstliche Dichtung, die den Austritt von Sickerwasser verhindert, auf einem Untergrund angelegt wird, der – angrenzend an die Dichtung – über eine Schichtdicke von mindestens einem Meter einen Durchlässigkeitsbeiwert von höchstens  $10^{-8}$  m/s aufweist. Der Grundwasserabstand zu Unterkante der Dichtung soll immer mindestens 1,5 m betragen. Über der künstlichen Dichtung ist ein Dränsystem anzulegen, dessen Dränschicht flächig aus Grobkies ausgebildet ist – mit perforierten Entwässerungsrohren aus Kunststoff oder Steinzeug in den Tiefenlinien des Profils. Vgl. hierzu Cossu & Urbini (1990) und Grimski (1988).

Die folgenden drei Tabellen zeigen zwei Ausführungsbeispiele für die Basisabdichtung der Deponieklassen 1 und 2, die nach Grimski (1988) häufiger genehmigt wurden.

Das Abdichtungssystem von Deponien der Klasse 3 (toxische Sonderabfalldeponien) wird sehr aufwendig gestaltet (siehe z. B. bei Bonvicini et al., 1989: dreifache Basisabdichtung mit 2 dazwischen angeordneten Kontrolldränsystemen) und ist nicht Gegenstand dieses Abschnitts.

## Basisabdichtungssystem (Variante 1)

<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,4–0,5 m, Flächenfilter, Grobkies. Dränrohre: PE-HD oder Steinzeug, perforiert.
<b>Schutz-schicht</b>	Sand, Schichtdicke = 0,1–0,2 m.
<b>KDB</b>	PE-HD, Dicke = 2,5 mm.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 1 m, $k \leq 10^{-8}$ m/s.
<b>Untergrund</b>	Mindestanforderung (siehe Text) gilt nicht; Grundwasserspiegel $\geq 0,5$ m unterhalb der Unterkante mineralischen Dichtung.

## Basisabdichtungssystem (Variante 2)

<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,4–0,5 m, Flächenfilter, Grobkies. Dränrohre: PE-HD oder Steinzeug, perforiert.
<b>Schutz-schicht</b>	Sand, Schichtdicke = 0,1–0,2 m.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke $\geq 2$ m, $k \leq 10^{-9}$ m/s.
<b>Untergrund</b>	Mindestanforderung (siehe Text) gilt nicht; Grundwasserspiegel $\geq 0,5$ m unterhalb der Unterkante mineralischen Dichtung.

## Basisabdichtungssystem (Variante 3)

<b>Drän-system</b>	Dränschicht: Schichtdicke = 0,4–0,5 m, Flächenfilter, Grobkies. Dränrohre: PE-HD oder Steinzeug, perforiert.
<b>Schutz-schicht</b>	Sand, Schichtdicke = 0,1–0,2 m.
<b>KDB</b>	PE-HD, Dicke = 2,5 mm.
<b>Zwischen-schicht</b>	Sand-Bentonit-Gemisch, Schichtstärke nicht spezifiziert.
<b>KDB</b>	PE-HD, Dicke = 2,5 mm.
<b>Untergrund</b>	Mindestanforderung (siehe Text) gilt nicht; Grundwasserspiegel $\geq 0,5$ m unterhalb der Unterkante mineralischen Dichtung.

## Oberflächenabdichtungssystem

Mazzetti et al. (1991) berichten detailliert über den Aufbau der Deponie Palastreto, welche 1989 den Betrieb



aufnahm. Die bisher endverfüllten Deponieabschnitte wurden mit folgender Oberflächenabdichtung versehen:

<b>Rekult.-schicht</b>	kulturfähiger Boden, Schichtdicke = 0,5 m.
<b>Drän-schicht</b>	Steinschüttung, Schichtdicke = 0,3 m (auch der Wurzelbefestigung dienend).
<b>Asphalt-schicht</b>	Schichtdicke $\geq 2$ mm, möglichst geringer Hohlraumgehalt, aufgesprüht auf leichtes Kunststoffasergewebe.
<b>Mineral. Dichtung</b>	Schichtdicke = 0,5 m, $k \leq 10^{-8}$ m/s.

## 2.8 Japan

Gotoh (1987), Grimski (1988) und Cossu (1990) geben einen Einblick in die gegenwärtige japanische Praxis der Deponieabdichtung. Es gibt in Japan drei klar abgegrenzte Deponiekategorien. Dazu gehören drei grundlegend verschiedene Abdichtungskonzepte:

- 1) Die Sonderabfalldeponie ("Isolated Type Landfill") beherbergt Abfälle (vornehmlich Industrieabfälle) mit Konzentrationen an Schwermetallverbindungen und toxischen organischen Verbindungen oberhalb der dafür festgelegten Grenzwerte. Sie entspricht einem überdachten Container, genauer gesagt: eine solche Deponie besteht aus mehreren einzelnen containerartigen Parzellen. Eine Parzelle ist bodenseitig und allseits wandseitig durch Betonwände abgegrenzt. Der Betonboden sowie die Außenwände der Parzellen am Deponierand müssen mindestens 0,15 m, die Innenwände zwischen den Parzellen mindestens 0,1 m Schichtdicke aufweisen. Der Abfall wird bereits unter Dach (ggf. nach vorhergehender Verfestigung) in die Container gefüllt, sodaß kein Sickerwasser anfällt und sich somit ein Dränsystem erübrigt. Ist eine Parzelle endverfüllt, wird sie mit einer Betonplatte der entsprechenden Mindeststärke ( $\geq 0,15$  m) abgedeckt. Die Innenwandungen der Container sind vor Korrosion zu schützen.
- 2) Der zweite Deponietyp ("Controlled Type Landfill") entspricht am ehesten einer Siedlungsabfalldeponie. Auf diese Deponie gelangen Siedlungsabfälle (mehr als 60 % davon nach vorheriger Verbrennung) und Industrie- sowie Gewerbeabfälle, deren Konzentrationen an Schwermetallverbindungen und toxischen organischen Verbindungen unterhalb der dafür festgelegten Grenzwerte liegen. Für diese Deponiekategorie ist eine "Schicht undurchlässigen Materials", d. h. aus Tonboden oder "Vergleichbarem", als Basisabdichtung festgeschrieben. Darüber muß ein flächenwirksames Dränsystem mit Entwässerungsrohren zur Sickerwasserfassung angeordnet werden. Das gefaßte Sickerwasser ist zu behandeln. Ein

endverfüllter Deponieabschnitt soll in einer Schichtstärke von 0,5 m mit Mutterboden abgedeckt werden.

- 3) Die Inertstoffdeponie ("Stable Type Landfill"), auf der nur chemisch sowie biologisch inerte Materialien (Glasabfälle etc.) abgelagert werden dürfen, erfordert keinerlei abdichtende Maßnahmen.

## 2.9 Ungarn

Der Stand der Technik auf dem Gebiet der Deponieabdichtungstechnik in den ehemaligen Ostblockländern soll am Beispiel Ungarns aufgezeigt werden. Zu bemerken ist, daß Ungarn zu den entwickelteren dieser Länder zählt.

Umweltrelevante Regelwerke, wie etwa

- der Erlaß 56/1981.(XI.18) des Ministerrates über das Entstehen, die Kontrolle und die Dekontamination gefährlicher Abfälle,
- dessen Modifizierung, der Erlaß 27/1992(I.30),
- das Wassergesetz IV./1964,
- dessen Durchführungserlaß 32/1964.(XII.13) sowie
- der Erlaß 1/1986.(II.21.) ÉVM-EüM über die Abfallwirtschaft

befassen sich lediglich mit der Oberflächenabdeckung. Hinsichtlich Basisabdichtungen existieren weder Vorschriften noch Richtlinien.

Hinsichtlich einer Oberflächenabdeckung verlangt der o. g. Erlaß 1/1986.(II.21.) ÉVM-EüM vom Deponiebetreiber eine stetige Abdeckung der Deponie während der Betriebsphase. Nach der vollständigen Verfüllung der Deponie muß der Deponiekörper so abgedeckt werden, daß eine Rekultivierung (Bepflanzung mit Gras, Buschwerk bzw. Bäumen) möglich ist. In der Praxis wird dieser Verordnung durch Auftragen einer 0,5 m dicken Schicht Mutterboden Genüge getan.

Für die Abdichtung der Deponiebasis werden in der Praxis – ungeachtet fehlender Vorschriften – folgende technische Maßnahmen getroffen:

Deponien werden in der Regel in offengelassenen Tongruben von Ziegeleien angelegt. Die als Deponiestandort vorgesehene Fläche wird geotechnisch untersucht, dabei werden die folgenden Kennwerte bzw. Daten am anstehenden Ton ermittelt:

- k-Wert,
- Bodenprofil,
- Korngrößenverteilung,
- maßgebender Korngrößendurchmesser,
- Plastizitätszahl,
- Wassergehalt.

Der Durchlässigkeitsbeiwert der Tonschicht darf  $10^{-7}$  m/s nicht überschreiten, und es wird eine minimale Mächtigkeit von 40 cm verlangt. Der Bodenaufschluß erfolgt z. B. auf einer Fläche von 100 x 200 m mittels drei bis vier Schürfbohrungen, der  $k$ -Wert wird durch Versickerungsversuch im Feld ermittelt, die restlichen bodenphysikalischen Parameter werden im Laboratorium bestimmt. Die Konstruktionspläne der Deponie müssen durch die zuständige Behörde (Stadt- oder Bezirksamt) genehmigt werden. Zur Genehmigung muß die Zustimmung folgender Institutionen eingeholt werden:

- geologisches Amt,
- Gesundheitsamt,
- Wasserbehörde,
- Wasser- und Kanalwerke,
- Grundbuchverwaltung.

In der Nähe von Kraftwerken, wenn die dort anfallende Flugasche abbindefähig ist, dient eine 0,5 m dicke Flugascheschicht als Basisabdichtung.

In den letzten 10 Jahren werden auch Kunststoffdichtungsbahnen aus Polyethylen als Basisabdichtung verwendet, wenn keine natürliche Tonschicht oder geeignete Flugasche verfügbar ist. Die Dicke der Kunststoffdichtungsbahn ist nicht vorgeschrieben, auf dem heimischen Markt wird nur ein Produkt der Firma Taurus angeboten. Oberhalb der Kunststoffdichtungsbahn dient eine 30 bis 40 cm dicke Grobsandschicht mit Dränrohren der Deponieentwässerung. Das gefaßte Sickerwasser wird entsorgt.

### 3 Literatur

BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin) (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten.

Bonvicini, A. C.; Manassero, M.; Street, A.; Viola, C. (1989): Lining, Leachate Collection and Monitoring of a Large Toxic Waste Landfill. Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium, 09.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. D.XI-1-11.

Carra, J. S. (1990): Municipal Solid Waste and Sanitary Landfilling in the United States of America. In: Carra, J. S.; Cossu, R. (Ed.): International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. San Diego, CA 92101: Academic Press Inc. S. 221-234.

Christensen, T. H. (1990): Sanitary Landfilling in Denmark. In: Carra, J. S.; Cossu, R. (Ed.): International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. San Diego, CA 92101: Academic Press Inc. S. 37-50.

Cossu, R. (1990): Sanitary Landfilling in Japan. In: Carra, J. S.; Cossu, R. (Ed.): International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. San Diego, CA 92101: Academic Press Inc. S. 110-138.

Cossu, R.; Urbini, G. (1990): Sanitary Landfilling in Italy. In: Carra, J. S.; Cossu, R. (Ed.): International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. San Diego, CA 92101: Academic Press Inc. S. 94-109.

Daniel, D. E.; Koerner, R. M. (1991): Landfill Liners from Top to Bottom. Civil Engineering, December 1991.

Dansk Ingenioerforening (1991): Recommendation DS/R 466 for Sanitary Landfill Liners, 1st Ed. Oct. 1989, transl. into English.

DIN 19 667 (1991): Dränung von Deponien, Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb.

EPA (1987a): Minimum Technology Guidance on Double Liner Systems for Landfills and Surface Impoundments - Design, Construction and Operation. EPA/530-SW-85-014, US EPA, Office of Solid Waste, Washington (D.C.), 71 pp.

EPA (1987b): Background Document on Bottom Liner Performance in Double-Lined Landfills and Surface Impoundments. EPA 530/SW-87-013, US EPA, Washington, D.C.

- EPA (1988a): Lining of Waste and Other Impoundment Facilities (by Matrecon, Inc., Alameda, CA). EPA/600/2-88/052, US EPA, Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1988b): Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities. In: EPA Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments, EPA/530-SW-88-047, US EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1989a): Technical Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments. EPA/530-SW-89-047, US EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1989b): Geosynthetic Leachate Collection Systems (by R. E. Landreth). EPA/600/D-91/019, US EPA, Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1991): Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers (by Eastern Research Group, Inc., Arlington, MA). Seminar Publication, EPA/625/4-91/025, US EPA, Center for Environmental Research Information, 26 West Martin Luther King Drive, Cincinnati (OH) 45268.
- Fischer, D.; Schenkel, W. (1990): Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland, der Schweiz und Österreich. Müll und Abfall 1, S. 2-13.
- Grimski, D. (1988): Dichtungssysteme für Deponien – die bundesdeutschen Ansätze im internationalen Vergleich. In: Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). 04.-05.02.1988. S. 209-233.
- Gotoh, S. (1987): The Japanese Concept and Standards for Waste Landfilling. Proceedings Sardinia 87, First International Landfill Symposium, October 1987, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy.
- Lechner, P. (1990): Sanitary Landfilling in Austria. In: Carra, J. S.; Cossu, R. (Ed.): International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. San Diego, CA 92101: Academic Press Inc. S. 15-25.
- Lechner, P.; Pawlick, R. (1988): Richtlinien für Mülldeponien. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft und für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
- Mazzetti, G.; Saetti, G.; Tirapani, M. (1991): Reclassification of a Sanitary Landfill. A Case Study at Palastreto. Proceedings Sardinia 91, Third International Landfill Symposium, 14.-18. October 1991, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy. S. 1355-1364.
- Meggyes, T. (1993): Über die Deponietechnik in Großbritannien. Müll und Abfall 3, S. 168-177.
- Niedersächsischer Minister für Umwelt (1988): Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle. RdErl. vom 24.6.1988 – 207 – 62812/21.
- North West Waste Disposal Officers, Landfill Liners Sub-Group (1988): Guidelines on the Use of Landfill Liners.
- Rae, G. (1989): The UK's Approach to Landfilling. Sardinia 89, Second International Landfill Symposium, Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. IV-1 - IV-14.
- Ramke, H.-G. (1991): Hydraulische Beurteilung und Dimensionierung der Basisentwässerung von Deponien fester Siedlungsabfälle – Wasserhaushalt, hydraulische Kennwerte, Berechnungsverfahren. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Steffen, H. (1992): Die Eignung von Asphalt zur Deponieabdichtung. In: Thomé-Kozmiansky, K. J.: Abdichtung von Deponien und Altlasten, Grundkursus. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH. S. 183-201.
- Stief, K. (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll und Abfall 1, S. 15-20.
- TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.
- Technische Verordnung über Abfälle (TVA; 1990). Herausgegeben vom Schweizerischen Bundesrat am 10.12.1990.



## C Entwässerungssysteme (M. Brune)

1	Einführung	19
2	Deponieentwässerung – Anforderungen und Praxis im Detail	20
2.1	Deponieentwässerung in Deutschland	20
2.1.1	Aufbau des Basis-Entwässerungssystems	20
2.1.2	Dränschicht	21
2.1.3	Entwässerungsröhre	23
2.1.4	Sickerwasserschächte	26
2.1.5	Dränung über der Oberflächenabdichtung	27
2.2	Deponieentwässerung in den USA	28
3	Schäden an den Entwässerungssystemen, langfristige Funktionsfähigkeit	32
4	Sanierungsmöglichkeiten für Dränrohrstränge	33
5	Literatur	35

### 1 Einführung

Die Entwässerungssysteme einer Abfalldeponie – im folgenden auch Dränsysteme genannt – sind für den Schutz des Grund- sowie Oberflächenwassers ebenso bedeutend wie die darunterliegenden Dichtungssysteme, da sie diese entscheidend entlasten. Dränsysteme sind zudem essentiell, um die Standsicherheit des Deponiekörpers langfristig zu erhalten (vgl. Ramke, 1986; Ramke & Brune, 1990; Brune, 1991; Bothmann, 1992; Schicketanz, 1991).

Im folgenden steht das Basisentwässerungssystem im Vordergrund der Betrachtungen; auf die Bedeutung sowie die Besonderheiten des Oberflächendränsystems wird unter Punkt 2.1.5 eingegangen.

Die Hauptfunktionen des Entwässerungssystems an der Deponiebasis sind

- 1) die Sammlung des Sickerwassers aus dem Deponiekörper und die Fassung dieses Wassers an definierten Stellen
- 2) die Vermeidung eines Sickerwasseraufstaus über der Basisabdichtung.

Die Sammlung des Sickerwassers aus dem Deponiekörper ist erforderlich, um es einer Behandlung zuzuleiten. Sickerwasserfassung und -behandlung sind neben der Abdichtung der zweite, ergänzende Weg, um kontaminiertes Müllsickerwasser vom Grund- und Oberflächenwasser fernzuhalten.

Ein Sickerwassereinstau auf der Deponiesohle führt zu

– einer erhöhten Auslaugung der Abfälle. Der Belastungsgrad des Sickerwassers steigt. Zudem können daraus erhöhte Differenzsetzungen im Abfallkörper resultieren, worunter wiederum die Oberflächenabdichtung leidet.

– Die Stabilität des Deponiekörpers ist nicht mehr gewährleistet, da der Reibungswinkel des eingestauten Abfalls deutlich geringer als der des nicht eingestauten Abfalls ist. Großräumige Rutschungen, Böschungsbrüche u.ä. können die Folge sein (Ramke, 1986).

– Das aufgestaute Sickerwasser umgeht das Dichtungssystem, indem es zur Böschung hin austritt. Solche Schäden wurden bei Hausmülldeponien schon häufig beobachtet (Ramke, 1986; Brune, 1991; Bass, 1985).

– Durch einen Sickerwasseraufstau wird die Basisabdichtung überlastet. Es kommt zu erhöhten Sickerwasseremissionen durch die Dichtung (Schicketanz, 1991; Bothmann, 1992).

Die Entlastung der Dichtung durch das Entwässerungssystem ist zudem ganz im Sinne des Multi-barrierenkonzeptes nach Stief (1986), welches breiten Eingang in verschiedene Deponieregelwerke innerhalb und außerhalb Deutschlands gefunden hat (in diesem Zusammenhang sei stellvertretend die TA Abfall genannt). Nach dem Multi-barrierenprinzip müssen mit der Deponiebasisabdichtung noch 5 andere "Barrieren" zusammenwirken (darunter eine geringe Eluierbarkeit der Abfälle und die Installation eines Oberflächenabdich-

tungssystems zu Betriebsende des jeweiligen Deponieabschnittes), damit die Emissionen einer Deponie langfristig prognostiziert, kontrolliert und minimiert werden können. Erst dann – bei Zusammenwirken aller Barrieren – kann eine Deponie lt. Stief als umweltverträglich bezeichnet werden. Das Entwässerungssystem hat nach Stief ebensolange zu funktionieren wie die Basisabdichtung, d. h. "bis die Sickerwasserbeschaffenheit auf das standortverträgliche Maß zurück-

gegangen ist". Stief gibt hierfür einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren nach Betriebsende an. (Dieser Wert kann jedoch nur als grober Anhaltswert verstanden werden, da es noch keine genügend langen Erfahrungen in der Nachsorge geordneter Deponien gibt; Dansk Ingenioerforening (1991) schätzt den Zeitraum, bis das Grundwasser unter einer Hausmülldeponie wieder als "Vorfluter" fungieren kann, auf 50–100 Jahre nach Betriebsende.)

## 2 Deponieentwässerung – Anforderungen und Praxis im Detail

Der Stand der Technik der Deponieentwässerung soll zunächst für Deutschland beschrieben werden; in Abschnitt 2.2 wird dann die Praxis der Deponieentwässerung in den USA zur Sprache kommen. Die vorgefundene Literatur zur Gestaltung von Deponie-Dränsystemen im europäischen Ausland repräsentiert einen Stand der Technik, der den deutschen bzw. amerikanischen Stand der Technik nicht übertrifft bzw. nicht grundlegend davon abweicht (vgl. Carra & Cossu (1990), Dansk Ingenioerforening (1991), Bonvicini et al. (1989), Cancelli & Rimoldi (1989), Netherlands Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment (1991)). Vielmehr werden im europäischen Ausland in Fragen der Deponieabdichtungstechnik bisher weniger strenge Maßstäbe angelegt als in Deutschland und in den USA. Im Kapitel "Abdichtungssysteme" wird im Zusammenhang mit dem gesamten Abdichtungsaufbau für jedes angesprochene Land auch die gängigste Grobgestaltung des Dränsystems aufgeführt, sofern den Verfassern bekannt.

### 2.1 Deponieentwässerung in Deutschland

#### 2.1.1 Aufbau des Basis-Entwässerungssystems

Für die Gestaltung und Unterhaltung von Deponieentwässerungssystemen in Deutschland sind zur Zeit die folgenden Regelwerke maßgebend: TA Abfall (1991), TA Siedlungsabfall (1993) (die beiden Regelwerke unterscheiden sich nicht in den Anforderungen an die Dränsysteme), DIN 19 667 in Verbindung mit DIN 19 666 und 4266 (letztere im Entwurf) sowie die Runderlasse der Länder zur Durchführung des AbfG (siehe z. B. Niedersächsischer Minister für Umwelt, 1988). Über den momentan realisierten Stand der Technik zur Gestaltung und Unterhaltung von Deponie-Dränsystemen berichten Ramke (1986), Ramke (1991), Ramke & Brune (1990), Brune (1991), Schicketanz (1991) und Bothmann (1992). Zunächst soll der Gesamtaufbau des Deponie-Basisentwässerungssystems, wie es am häufigsten realisiert wird, beschrieben werden. Die folgenden Abschnitte 2.1.2–2.1.4 befassen sich dann detaillierter mit den

einzelnen Bau- und Funktionselementen des Dränsystems.

Das Basis-Entwässerungssystem besteht aus drei Elementen:

- 1) der Dränschicht, in flächiger Ausbreitung auch als Flächenfilter bezeichnet
- 2) den Entwässerungsrohren, auch Dränrohre genannt
- 3) den Sickerwasserschächten.

Sickerwassersammler, die in der Regel außerhalb des Deponiekörpers angeordnet sind, Speicherbecken und Behandlungsanlagen gehören in diesem Sinne nicht zum Entwässerungssystem.

In den meisten Fällen ist der Deponiekörper als Halde aufgebaut. Die Halde wird fischgrätenartig durch regelmäßig angeordnete Entwässerungsrohre von der mittleren Längsachse weg nach 2 Seiten entwässert. Das Sickerwasser soll die Deponie im freien Gefälle verlassen. Dafür ist die Oberfläche der Basisabdichtung dachprofilartig ausgebildet. Der First bildet gleichzeitig die mittlere Längsachse des Deponiekörpers. Die beiden Dachseiten sind zusätzlich faltblattartig querprofiliert. In den Tiefstlinien der Faltblattstruktur liegen die Entwässerungsrohre. Das Quergefälle zu den Rohren hin soll unter Berücksichtigung der rechnerisch abgeschätzten Setzungen, also langfristig  $\geq 3\%$ , das Längsgefälle der Rohre dementsprechend  $\geq 1\%$  betragen (auf Länderebene sind teilweise  $\geq 1,5\%$  gefordert, siehe z. B. Niedersächsischer Minister für Umwelt, 1988). Der Abstand der Dränrohre ist gemäß DIN 19 667 so bemessen, daß bei einem angenommenen Spitzenabfluß von  $6 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , einem langfristigen Durchlässigkeitsbeiwert von  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , einer Dränschichtdicke von 300 mm und den genannten Mindestgefällewerten ein Sickerwassereinstau in die Abfälle hinein nicht auftritt (siehe auch Abschnitt 2.1.2 in diesem Kapitel). Grundsätzlich (ohne hydraulischen Nachweis) ist ein kürzester Seitenabstand zwischen den Dränrohren von 30 m, also eine Zulauf-länge von 15 m, nicht zu überschreiten. Dieser Wert wird in der Bauausführung teilweise auch unterschritten (vgl. z. B. Steinkamp, 1987).

Das Sickerwasser aus dem Deponiekörper wird den Rohren über eine flächig ausgebreitete Schicht mineralischen Dränmaterials (Flächenfilter) zugeleitet.

An den Tiefpunkten der Dränrohrstränge, bevorzugt am äußeren Böschungsrand der Deponie, sind Sickerwasserschächte angeordnet, die den Zugang zu den Dränrohren gewährleisten und somit Kontroll- sowie Wartungsarbeiten ermöglichen.

### 2.1.2 Dränschicht

In diesem Abschnitt sollen zunächst die Anforderungen der TA Abfall (1991) (die Anforderungen der TA Siedlungsabfall sind im Hinblick auf die Entwässerungssysteme identisch), der DIN 19 667 und des Niedersächsischen Ministers für Umwelt (1988) (exemplarisch für die Runderlasse der Länder zur Durchführung des AbfG) an die Gestaltung sowie den Einbau von Dränschichten zur Basisentwässerung systematisch beschrieben werden. Anschließend wird auf die Thematik der hydraulischen Bemessung von Dränschichten eingegangen; der letzte Teil des Abschnitts widmet sich gesondert der Filterstabilität der Dränschicht gegenüber dem Abfall.

Die Dränschicht soll flächig aus mineralischem Dränmaterial bestehen, spezifiziert als Rundkorn mit der Körnung 16–32 mm (Sieblinie nach DIN 4226 Teil 1), erforderlichenfalls der Körnung 8–16 mm (TA Abfall). Unter diesem Gesichtspunkt sind die kritischen Körner gemäß DIN 4226 Teil 1 mehr als dreimal so lang wie dick (nicht breit). Bei der Formulierung der Obergrenze für den Gewichtsanteil solcher Körner halten sich TA Abfall, DIN 19 667 und der Nds. RdErl. (Niedersächsischer Minister für Umwelt, 1988) zurück; im Entwurf des LAGA-Merkblattes M3 (1990) ist der Vorschlag von 25 Gew.-% zu finden.

Auch wenn der Porenvolumenanteil dieses Materials nach rein hydraulischen Gesichtspunkten für die Deponieentwässerung überdimensioniert sein mag (s. u.), so leiten sich die Anforderungen an die Körnung aus der Erkenntnis ab, daß in Entwässerungssystemen von Hausmülldeponien ein hohes Potential für die Bildung von Inkrustationen existiert; d. h. durch mikrobiologisch bedingte Ausfällungsprozesse verringert sich häufig binnen kurzer Zeiten nicht nur der freie Querschnitt der Entwässerungsrohre drastisch, sondern auch der Porenraum in der Dränschicht kann durch diese Vorgänge in bedenklichem Maße reduziert werden (siehe Abschnitt 3 in diesem Kapitel). Ramke und Brune (1990) zeigten im Zuge ihrer Untersuchungen des Inkrustationsphänomens, daß das Dränmaterial der Körnung 16–32 mm sowie in eingeschränktem Maße das der Körnung 8–16 mm unter stark inkrustationsfördernden Bedingungen auch langfristig Porenraumreserven für die Dränung behält, während feinere sowie weitgestufte Materialien ihre Durchlässigkeit unter kritischen Bedingungen nach einem Zeitraum der Größenordnung ein Jahr völlig verlieren können. Die z. Z. maßgeblichen Regelwerke

fordern aber explizit eine langfristig verbleibende Restdurchlässigkeit der Dränschicht mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von mindestens  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s; dieses unterstreicht die Bedeutung der Wahl der genannten groben Dränmaterialien.

Die Forderung von Rundkorn wird dem Umstand gerecht, daß die einzelnen Kieskörner bei hoher Müllaufast mit ihren Kontaktflächen äußerst hohe Drücke auf die darunterliegende Kunststoffdichtungsbahn ausüben und diese dadurch zu perforieren drohen. Um diese Gefahr zu bannen, wird eine Schutzschicht über der KDB angeordnet. Je geringer jedoch die Kontaktflächen des Dränmaterials sind, desto höhere Spitzendrücke treten auf. Rundkorn schont also das System Schutzschicht-KDB.

Das Material soll ausreichend fest sein (DIN 4226 Teil 1), gewaschen sein und einen maximalen Karbonatanteil von 20 Gew.-% (TA Abfall) bzw. 10 Gew.-% (Nds. RdErl.) aufweisen. Die Grenzwerte beziehen sich auf kristallin gebundenes  $\text{CaCO}_3$ . Nicht kristallin vorliegendes  $\text{CaCO}_3$  ist gänzlich unerwünscht (Nds. RdErl.). Die Grenzwerte sind erforderlich, da während der Phase der sauren Gärung im Deponiekörper und auch an der Deponiebasis Karbonate zu löslichem Hydrogencarbonat und zu  $\text{CO}_2$  umgesetzt werden. Kalkschotter, der als Dränmaterial bei einer Hausmülldeponie eingebaut worden war, ließ im Zuge von Aufgrabungen hochgradige Auflösungserscheinungen nach nur wenigen Betriebsjahren erkennen (Ramke & Brune, 1990). Die Gegenwart von Hydrogencarbonat und  $\text{CO}_2$  ist aber eine wesentliche Voraussetzung für die Inkrustationsbildung, welche es zu vermeiden gilt (Brune, 1991).

Das Dränmaterial ist vor seinem Einsatz in der Deponie zu prüfen, indem es klassifiziert wird. Die folgenden Laboruntersuchungen zur Klassifikation müssen an einer repräsentativen Zahl von Proben aus verschiedenen Entnahmestellen in dem auszuschöpfenden Vorkommen vorgenommen werden: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Bestimmung des Gehalts an organischen Bestandteilen, Bestimmung des Karbonatgehaltes sowie mineralogische Klassifizierung (vgl. TA Abfall, 1991; Niedersächsischer Minister für Umwelt, 1988).

Als Mindestdicke für die Dränschicht sind 300 mm gefordert (TA Abfall, DIN 19 667). Die Forderung nach einer Mindestdicke von 500 mm (Entwurf LAGA-Merkblatt M3, 1990) konnte sich bundesweit nicht durchsetzen, ist aber teilweise auf Länderebene bindend geworden (z. B. Nds. RdErl.). Der Wert "500 mm" kam aus der Sorge heraus auf, die Dränschicht könne gegenüber dem Abfall nicht filterstabil sein, und man brauche eine "Opferschicht", die langfristig eine hinreichend dicke Schicht an genügend durchlässigem Dränmaterial gewährleistet (diese Diskussion wird weiter unten in diesem Abschnitt gesondert geführt). Im Bereich einer Rohrleitungszone ist die Dränschicht zu überhöhen (Ausführung siehe DIN 19 667).

Beim Einbau der Dränschicht ist darauf zu achten, daß Beschädigungen des Systems Schutzschicht-Kunststoffdichtungsbahn vermieden werden. Die geforderte Mindestschichtdicke muß überall auf der Fläche eingehalten werden; ebenso gilt, daß die Überhöhungen im Rohrbereich korrekt ausgestaltet werden müssen. Eine Entmischung des Korngemisches während des Einbaus ist zu vermeiden.

Gemäß TA Abfall muß bei der Qualitätsprüfung des eingebauten Dränsystems lediglich der Zustand und die Höhenlage der Entwässerungsrohre geprüft werden. Zur Qualitätsprüfung gehören – ebenso wie zur Qualitätsprüfung fertiger Dichtungskomponenten – die Eigenprüfung (Eigenüberwachung) durch die Bau- bzw. Verlegfirma, die Fremdprüfung (Fremdüberwachung) durch einen unabhängigen Gutachter sowie die behördliche Überwachung seitens der für den Deponiebau zuständigen Behörde.

Auf die Profilierung der Oberfläche der Dichtung (Längsgefälle, Quergefälle) sowie auf den Abstand der Entwässerungsrohre wurde bereits im Abschnitt 2.1.1 eingegangen.

Im Gegensatz zu den Entwässerungsrohren läßt sich die Dränschicht bei diesem Aufbau der Deponiebasis weder inspizieren noch warten bzw. pflegen. Allenfalls einige Dezimeter rohrumgebenden Kieses lassen sich bislang bei Hochdruck-Wasserspülungen vom Entwässerungsrohr aus erreichen (vgl. Abschnitt 2.1.3 in diesem Kapitel).

#### Hydraulische Bemessung von Entwässerungssystemen

Eine hydraulische Bemessung des Entwässerungssystems ist gleichbedeutend mit dem rechnerischen Nachweis, daß bei einem bestimmten angenommenen Aufbau des Entwässerungssystems unter extremem Sickerwasseranfall ein Sickerwassereinstau in die Abfälle hinein nicht auftritt. Die DIN 19 667 nennt solche Eingangsparameter für einen rechnerischen Funktionsnachweis (Abflußereignis von  $6 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)} = 50 \text{ mm/d}$ , Durchlässigkeitsbeiwert der Dränschicht  $1\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , Dränschichtdicke  $\geq 300 \text{ mm}$ , Längsgefälle  $\geq 1 \%$ , Quergefälle  $\geq 3 \%$ ), gibt aber keine Hinweise darauf, wie der hydraulische Nachweis geführt werden kann.

Ramke (1991) zeigt Berechnungsverfahren für ein Standard-Entwässerungssystem gemäß TA Abfall/DIN 19 667 mit und ohne Schutzschicht sowie für ein alternatives Entwässerungssystem mit Rigolen auf, mit denen sich die hydraulische Funktionsfähigkeit dieser Entwässerungssysteme nachweisen läßt. Im Zusammenhang hiermit erfaßte Ramke den Einfluß der Variation maßgeblicher Entwurfsparameter (Dränrohrabstand, Haltungslänge, Längsgefälle, Quergefälle, Dicke der Dränschicht, Sieblinie des Dränmaterials, Durchlässigkeitsbeiwert der Dränschicht) auf die Höhe des resultierenden Sickerwasseraufstaus unter bewußt ungünstig angenom-

menen Abflußereignissen. Die aus den Untersuchungen von Ramke (1991) resultierenden Empfehlungen für die hydraulische Bemessung von Entwässerungssystemen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ein Standardentwässerungssystem nach TA Abfall und DIN 19 667 (ohne darunterliegende mineralische Schutzschicht) mit maximalen Haltungslängen von 200 m, einem Dränrohrabstand von 30 m und einem langfristigen Durchlässigkeitsbeiwert der Dränschicht von  $\geq 1\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  (gewährleistet durch Einsatz von Dränmaterial der Körnung 16–32 mm) erfordert keinen hydraulischen Nachweis mehr. Selbst aus der von DIN 19 667 zugrundegelegten Sickerwasserspende von  $6 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$  ( $= 50 \text{ mm/d}$ ) resultiert bei sauberem Dränmaterial der Körnung 16–32 mm nur ein maximaler Sickerwasseraufstau auf der Dichtung von einigen mm. Bei Annahme eines langfristigen  $k$ -Wertes desselben Dränmaterials von  $1\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , was einer hochgradigen Porenvolumenreduktion durch Inkrustationen entspräche, beträgt der resultierende Aufstau auf der Dichtung bei der angesprochenen Sickerwasserspende maximal 200 mm. Letzterer Wert liegt immer noch weit unter der Mindestanforderung an die Schichtdicke der Dränschicht von 300 mm. Ramke unterstreicht, daß die Schichtstärke von 300 mm zur Entwässerung von Siedlungsabfalldéponien in Mitteleuropa in aller Regel voll ausreicht.
- Den weitaus größten Einfluß auf die resultierenden Einstauhöhen hat der Durchlässigkeitsbeiwert der Dränschicht. Dagegen tritt die Bedeutung des Quergefalles (vorausgesetzt:  $\geq 2 \%$ ) und des Längsgefälles (vorausgesetzt:  $\geq 1 \%$ ) stark in den Hintergrund. Daher muß die Inkrustationsintensität im Entwässerungssystem durch geeignete Betriebsführung so gering wie möglich gehalten werden (vgl. Abschnitt 3 in diesem Kapitel).
- Für die hydraulische Bemessung des Entwässerungssystems genügt es, sich auf die Gestaltung der Dränschicht und die Dränrohrabstände zu beschränken, da der Durchmesser der Dränrohre, die nach dem Stand der Technik eingesetzt werden, nach hydraulischen Gesichtspunkten stark überdimensioniert sind. Die großen Rohrquerschnitte werden gewählt, um bei Inkrustationsvorgängen hinreichend Querschnittsreserven zu behalten und um Wartungs- sowie Kontrollmaßnahmen vornehmen zu können.
- Ist die Dränschicht direkt über einer 15 cm dicken Schutzschicht aus Sand (Breckkorn 0–8 mm) angeordnet, versechsfachen sich die genannten Aufstauhöhen über der Dichtung, so daß unter ungünstigen Bedingungen ( $k$ -Wert der Dränschicht  $1\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , Spitzen-Sickerwasserspenden von  $6 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ ) bei diesem System ein (zeitweiliger) Sickerwassereinstau in die Abfälle hinein in Kauf genommen werden muß.



- Kies der Körnung 16–32 mm wird zunehmend knapp. Daher muß in Zukunft erwogen werden, auch mit feineren Materialien in der Dränschicht auszukommen. Voraussetzung ist allerdings, daß die Inkrustationsneigung durch geeignete Betriebsführung gering gehalten wird (vgl. Abschnitt 3 in diesem Kapitel). Kann auf diese Weise die Anfangsdurchlässigkeit auf ähnlichem Niveau gehalten werden, so genügt ein wirksamer Korndurchmesser von 1 mm (Grobsand), um auf längere Sicht einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s in der Dränschicht zu erzielen. Ramke nahm auch einen hydraulischen Nachweis an einer "alternativen" Dränschicht mit nur einer Durchlässigkeit von  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s vor (Mittelsand mit dem wirksamen Korndurchmesser von ca. 0,35 mm). Er zeigte, daß man selbst mit diesem Material den Anforderungen der DIN 19 667 genüge tun kann, wenn man in der Dränschicht aus dem angesprochenen Mittelsand rechtwinklig zu den Entwässerungsröhen alle 15 m Rigolen aus Kies oder Grobschotter ( $k \geq 1 \cdot 10^{-3}$  m/s) mit der Breite 1,5 m und einem Vertikalwinkel zum Dränrohr von  $63^\circ$  anordnet.

#### **Filterstabilität der Dränschicht gegenüber dem Abfall**

In der Forderung nach einer langfristigen Mindest-Durchlässigkeit der Dränschicht drückt sich nicht nur die Notwendigkeit aus, die Inkrustationsbildung in Grenzen zu halten. Ebenso ist vor diesem Hintergrund eine Einwaschung von Feinpartikeln aus dem Abfall in die Dränschicht zu vermeiden. Die DIN 19 667 verlangt daher, daß die Dränschicht filterstabil gegenüber den angrenzenden Abfallschichten auszubilden ist, geht aber davon aus, daß eine Dränschicht aus Kies 16–32 mm unmittelbar unter dem Abfall dieses Kriterium erfüllt. Die TA Abfall verlangt salomonisch, bis zu einer Überdeckungshöhe von 2 m müsse die Abfallablagerung so "gesteuert" werden, daß das Entwässerungssystem in seiner Funktionsfähigkeit nicht nachhaltig "beeinträchtigt" wird. Dementsprechend fordert der Niedersächsische Minister für Umwelt (1988), die ersten Abfallschichten nach dem Gesichtspunkt der Filterstabilität auszuwählen.

In der Forderung nach einer 500 mm dicken Dränschicht (Entwurf des LAGA-Merkblattes M3, 1990; Nds. RdErl.) ist die Befürchtung zu erkennen, Kies 16–32 mm könne gegenüber dem Siedlungsabfall nicht filterstabil sein. Ramke & Brune (1990) sowie Düllmann (1988) konnten aber im Zuge verschiedener Aufgrabungen von Siedlungsabfalldeponien, deren Basis mit Hilfe von Kies 16–32 mm entwässert wird, in keinem Fall eine nennenswerte Intrusion von Feinbestandteilen des Abfalls in die Dränschicht beobachten.

Dennoch ist zu empfehlen, für die ersten 2 m Abfallüberdeckung Abfälle mit Feinstanteilen zu vermeiden; dieses betrifft bei Siedlungsabfalldeponien vor allem organische Abfälle. Auch Müllkompost sowie vorgerotete Siedlungsabfälle sind in diesem Zusammenhang als

kritisch anzusehen. Die Verwendung der letztgenannten Materialien als unterste Abfallschicht in einer hochverdichteten Siedlungsabfalldeponie ohne entsprechende Abfallvorbehandlung wirkt sich nach Ramke & Brune (1990) äußerst nachteilig aus, da sich dann intensive Inkrustationsprozesse aus dem Entwässerungssystem in die untersten Abfallschichten hineinverlagern; der Abfall über dem Dränsystem setzt sich zu.

Ein weiterer Ansatz, das Eindringen von Abfällen in die Dränschicht zu vermeiden, sind Filter in Form von mineralischen Dränschichten, die mit ihrer Körnung zwischen der Körnung der Abfallfeinbestandteile und der des Drängrobkieses vermitteln, oder Filter in Form von Kunststoffvliesen in einer Dicke von wenigen mm (siehe Abschnitt 2.2 in diesem Kapitel). Von dem Einsatz solcher Filter an der Basis von Siedlungsabfalldeponien müssen die Verfasser eindringlich abraten: Im Zuge von Inkrustationsprozessen, die in der Dränschicht vom Abfall her beginnen, setzen sich zuallererst diese Filter zu. Aufgrund des vergleichsweise geringen Porenraumanteils ist dieses binnen überschaubarer Zeiträume möglich. Verschiedene genadelte PE-HD-Vliese eines renommierten Vliesherstellers entwickelten sich binnen nur ca. 12 Monaten in Säulenversuchen von Ramke & Brune (1990), eingebaut zwischen Abfall- und Dränschicht (unter Einwirkung von Sickerwasser der Phase der sauren Gärung) zu steinharten Blöcken, auf denen sich das Sickerwasser staute. Bei den so betroffenen Versuchssäulen war kein Abfluß mehr zu messen (vgl. Abschnitt 3 in diesem Kapitel). Cazzuffi et al. (1991) kamen bei Durchlässigkeitsuntersuchungen an einer großen Bandbreite genadelter und thermisch verfestigter Vliese sowie von Gewebe-Geotextilien, mit Flächen gewichten zwischen 140 und 800 g/m<sup>2</sup> und Dicken zwischen 2 und 9 mm, zu ähnlich ernüchternden Ergebnissen: In ihrer Durchfluß-Versuchsapparatur (Permeameter), kreislaufbetrieben mit Sickerwasser der Phase der sauren Gärung von der Deponie Como, fiel der Durchlässigkeitsbeiwert fabrikneuer Gewebe-Geotextilien um mindestens 2 Zehnerpotenzen – binnen einer Versuchszeit von nur 100 Stunden. Die Abnahmeraten des *k*-Wertes für Vliese sowie für vorher in Sickerwasser eingelagerte Geotextilien nahmen sich noch weitaus ungünstiger aus. Cazzuffi et al. können aufgrund dieser Ergebnisse generell keine Geotextilien für den Einsatz als Filter für Dränsysteme empfehlen.

#### **2.1.3 Entwässerungsröhre**

Maßgebliche Regelwerke für Ausbildung, Prüfung, Leitungszone, Standsicherheitsnachweise, Wartungsmaßnahmen und Überwachungsmaßnahmen von Deponieentwässerungsröhren sind zur Zeit die DIN 19 667 in Verbindung mit der DIN 4266 Teil 1 sowie die TA Abfall.

##### **Ausbildung der Röhre**

Als Werkstoffe für Deponieentwässerungsröhre sind in Deutschland Polyethylen hoher Dichte (PE-HD),

Polypropylen und weichmacherfreies Polyvinylchlorid gemäß DIN 4266 Teil 1 zugelassen, wovon PE-HD am häufigsten verwendet wird. Die chemische und biologische Beständigkeit der drei Werkstoffe gilt als gegeben.

Die Verwendung von Steinzeug als Rohrwerkstoff zur Deponieentwässerung gehört weitgehend der Vergangenheit an. Ein großer Anteil der beobachteten mechanischen Schäden an Deponiedränrohren (insbesondere Brüche) war auf die Verwendung von Steinzeugrohren zur Entwässerung zurückzuführen (vgl. Abschnitt 3 in diesem Kapitel).

Die Rohre haben eine Mindestnennweite von 250 mm (DIN 19 667, DIN 4266 Teil 1) bzw. 300 mm (TA Abfall) aufzuweisen. Innen sowie außen glattwandige Rohre und Rohre mit profilierter Außenwandung (Innenseite glatt) sind gleichermaßen zugelassen. Im Auflagerbereich, d. h. auf den unteren 120° des Rohrquerschnitts, müssen die Rohre eine geschlossene Wandung aufweisen; dieser Bereich dient als Fließsohle zur Ableitung des Sickerwassers. Auf den oberen 240° des Rohrquerschnitts hat die Rohrwandung perforiert zu sein, mit einer Mindest-Wassereintrittsfläche von 100 cm<sup>2</sup>/m Rohrlänge. Dieser hohe Sollwert für den Drainageflächenanteil entsprang aus der Diskussion um die Inkrustationsproblematik (vgl. Abschnitt 3 in diesem Kapitel). Die Drainageöffnungen werden bisher mittels Schlitz- oder Bohrmaschinen in den geschlossenen Rohrkörper eingebracht, wobei es dem Deponiebauherren bzw. Deponiebetreiber freigestellt ist, welche Geometrien diese Drainageöffnungen aufweisen. Werden Schlitz- als Drainageöffnungen gewählt, müssen diese radial, d. h. senkrecht zur Rohrachse verlaufen, und müssen dabei eine Mindestbreite von 5 mm und eine Mindestlänge von 25 mm aufweisen, gemessen an der Rohrrinnenwandung. Bei gelochten Rohren soll der Lochdurchmesser mindestens 12 mm betragen. Die Wassereintrittsöffnungen sind scheidelsymmetrisch anzuordnen. Die Entwässerungsrohre müssen auf ihrer gesamten Länge für Wartungsarbeiten, Kamerainspektionen und andere erforderliche Untersuchungen (s. u. in diesem Abschnitt) zugänglich sein, d. h. die Haltung muß gerade geführt sein, und die maximale vertretbare Haltungslänge beträgt vor diesem Hintergrund ca. 200 m (Ramke, 1991; Schicketanz, 1991).

### Prüfungen

Folgende Eigenschaften sollen an neu hergestellten Dränrohren gemäß DIN 4266 Teil 1 in festgelegten Zeitrhythmen durch Eigenüberwachung und Fremdüberwachung geprüft werden: Masse, Maße, Sohlgleichheit (gefordert:  $\leq 2\%$  des Nenndurchmessers), Beschaffenheit (Produktionsfehler), Zeitbeanspruchung (Quotient Langzeitringsteifigkeit durch Kurzzeitringsteifigkeit), Schlagfestigkeit (Kugelfallversuch), Flächensumme/Größe/Lage der Wassereintrittsöffnungen und Ausbildung der Rohrverbindungen.

### Rohrleitungszone

Der Stand der Technik für die Gestaltung der Rohrleitungszone ist detailliert in DIN 19 667 wiedergegeben. Für das Rohraufleger soll "schwachdurchlässiges, standfestes Material, z. B. Sand der Korngruppe 0/2a nach DIN 4226" verwendet werden, um Unterläufigkeiten des Sickerwassers weitgehend zu vermeiden. Bentonitbeimengungen im Rohrauflegermaterial haben sich nach den Erfahrungen von Schicketanz (1991) nicht bewährt. Der Auflagerwinkel für das Rohr bei der Bauausführung beträgt  $2\alpha = 120^\circ$ , der rechnerische für den Standsicherheitsnachweis jedoch nur  $2\alpha = 90^\circ$ .

### Standsicherheitsnachweis

Zum Standsicherheitsnachweis von Deponieentwässerungsrohren sagen die maßgeblichen Regelwerke (TA Abfall, DIN 19 667) in erster Linie, daß er erfolgen muß, aber nicht, wie er durchgeführt werden kann. Die bisher in der Praxis vorgenommenen Standsicherheitsnachweise sind als eher behelfsmäßig anzusehen und basieren auf der Richtlinie ATV A 127 (vgl. Schicketanz, 1991; Hoch, 1991 sowie Hoch, 1992). Diese ATV-Richtlinie wurde aber für geschlossene Kanalisationsrohre konzipiert und kann bei willkürlicher Anwendung zu falschen Ergebnissen führen. Hoch (1991 und 1992) macht detaillierte und praktische Vorschläge, wie der Standsicherheitsnachweis für perforierte Deponieentwässerungsrohre geführt werden kann. Dabei wird die Visko-Elastizität von Rohren aus polymeren Werkstoffen mit Hilfe materialspezifischer Kriechmodule ( $E_c$ ) erfaßt. Ziel ist es, die maximal möglichen Auflastbeanspruchungen (häufig für einen Zeitraum von 50 Jahren) abzuschätzen, die gerade noch nicht zu kritischen Dehnungswerten (Dehngrenzwerten) im Rohr führen. In die Anforderungen an den Standsicherheitsnachweis ist mittlerweile eingegangen, daß im Zusammenhang mit dem Kurzzeitkriechmodul  $E_{kurz}$  Abminderungsfaktoren für die Zeit ( $A_1$ ), für den Medieneinfluß ( $A_2$ ) sowie für die Temperatur ( $A_3$ ) anzugeben sind, wobei gilt:

$$E_{c(eff)} = \text{effektives Langzeitkriechmodul} \\ = E_{kurz} \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$$

Neben diesen Abminderungsfaktoren, für die neuerdings in der DIN 4266 Teil 1 konkrete Zahlen genannt sind, müssen die erforderlichen Rohrmaterial-Kennwerte, die bodenmechanischen Kenngrößen des Rohrauflegers und die zu erwartenden Auflasten im Vorfeld der statischen Berechnungen bekannt sein. Zu beachten ist ferner, daß – anders als im Abwasserkanalbau – die Auflast im Verlaufe der Zeit stetig zunimmt. Weitere zu beachtende Randbedingungen für den Standsicherheitsnachweis sind (DIN 19 667):

- rechnerischer Auflagerwinkel für das Rohr:  $2\alpha = 90^\circ$

- die Belastung aus dem Abfallkörper entspricht einer "schlaffen" Auflast mit der Dichte von  $1500 \text{ kg/m}^3$  (Hausmüll)
- die Kurz- und Langzeitringsteifigkeit ist um den Verschwächungswert, resultierend aus der aktuellen Art der Rohrperforation, abzumindern (hierauf wird gleich noch weiter eingegangen).

Schicketanz (1991) verweist auf das PC-Programm "DEPOROHR", mit welchem sich die umfangreichen Berechnungen unter den genannten Gesichtspunkten durchführen lassen.

### Offene Fragen zur langfristigen Standsicherheit

Probleme bereiten beim Standsicherheitsnachweis – wie bei vielen anderen Rechenmodellen – weniger der eigentliche Rechenvorgang als die Notwendigkeit, realistische Eingangskenngrößen zu verwenden. Das gilt vor allem für den angesprochenen Verschwächungswert infolge der Rohrperforation:

Der Verschwächungswert ist für Standsicherheitsnachweise ein unverzichtbarer Eingangsparameter, weil die Ringsteifigkeit der verwendeten PE-HD-Rohre durch den geforderten hohen Drainageöffnungsanteil signifikant verringert wird. Eine rechnerische Erfassung dieser Kenngröße ist bisher nicht möglich. Schicketanz (1991) beschreibt, wie sich der Verschwächungswert eines bestimmten Dränagerohres experimentell bestimmen läßt: Im Scheiteldruckversuch werden zum Vergleich das perforierte und das unperforierte Rohr geprüft. Von der Stauchung des Rohres bei einer bestimmten Scheiteldruckkraft läßt sich rechnerisch auf den Ringmodul schließen. Der Verschwächungswert, nach dieser Methode ermittelt, entspricht dem Quotienten aus den Ringmodulen  $E$  der verglichenen Rohre:

$$\text{Verschwächungswert} = \frac{E_{\text{Ring(perforiert)}}}{E_{\text{Ring(ohne Perforation)}}$$

Wichtig ist festzustellen, daß man aus Kurzzeit-Scheiteldruckversuchen solcher Art natürlich nur Kurzzeit-Verschwächungswerte erhält; fundierte Langzeit-Verschwächungswerte erfordern entsprechende Langzeitversuche, gekoppelt mit Extrapolationsbetrachtungen.

Hierzu soll ein Forschungsvorhaben innerhalb des BMFT-Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme" weitere Aufschlüsse geben (Schulz & Schicketanz, 1991; Schulz & Schicketanz, 1993).

### Wartung, Überwachung

Die TA Abfall verlangt eine jährliche Kamerainspektion der Entwässerungsröhre während der Betriebsphase der Deponie. Bei einer Abfallüberdeckung von weniger als 2 m soll diese Inspektion sogar vierteljährlich erfolgen. Dabei ist vor allem auf Setzungen, Rohrschäden und

Inkrustationen zu achten. Die Kamerainspektionen sind für die gesamte Haltungslänge vorzunehmen und zu dokumentieren. Bei Bedarf sind die Rohre dann fachmännisch zu reinigen.

In der Praxis ist es schon seit einigen Jahren verbreitet und mittlerweile Stand der Technik, die Entwässerungsröhre an der Deponiebasis jährlich zu spülen und zu inspizieren. Dieses ist vor allem bei Siedlungsabfalldeponien aufgrund der Inkrustationsbildung im Entwässerungssystem eine strikte Notwendigkeit geworden (vgl. Abschnitt 3 in diesem Kapitel). Bei Siedlungsabfalldeponien mit schnellem Aufbaufortschritt kann die zeitliche Bildungsrate dieser Inkrustationen so hoch sein, daß bei einjährigem Pflegerhythmus die übliche Spültechnik (s. u.) nicht mehr ausreicht, um die Rohre ganz frei zu bekommen (Brune, 1991).

Die übliche Art der Reinigung von Deponieentwässerungsröhren ist die Hochdruck-Wasserspülung. Diese wird zumeist von Kanalreinigungs- und -inspektionsfirmen durchgeführt, die vom Deponiebetreiber beauftragt werden. Die eingesetzten Spülwagen können Wasserdrücke bis 200 bar erzeugen. Bei einem Spülvorgang fährt der Spülwagen zunächst den Spülkopf, der sich am Vorderende des nachzuführenden Wasser-schlauchs befindet, bis an das obere Haltungsende in das Dränrohr ein. Dieses ist möglich durch den Rückstoß des aus dem Spülkopf austretenden Wassers. Das Einfahren des Spülkopfes erfolgte unter eingeschränktem Wasserdruck. Nun folgt der eigentliche Spülvorgang, indem der Spülschlauch und der Spülkopf langsam unter höchstem Wasserdruck (bis 200 bar) wieder herausgezogen werden.

Bei hartnäckigen Inkrustationen muß der Spülvorgang im Wechsel mit Kamerainspektionen (s.u.) mehrmals wiederholt werden. Führt auch dies nicht mehr zu einer vollständigen Reinigung des Rohrrinneren, verwenden Spültrupps häufig einen Fräskopf anstelle des Spülkopfes. Dieser arbeitet ebenfalls mittels Wasserdruck, schlägt dabei aber rotierend mit Kettenenden (ähnlich Stücken einer Fahrradkette) auf die "belegte" Rohrwandung ein. Die Fräsung schädigt jedoch langfristig gesehen die PE-HD-Rohre und sollte durch häufigeres Spülen vermieden werden.

Untersuchungen von Schicketanz zur Wirksamkeit der Hochdruck-Wasserstrahl-Reinigung in Deponieentwässerungsröhren zeigten, daß bei dünnwandigen Rohren generell als auch bei umfangsgeschlitzten Rohren ein größerer Nahbereich der umgebenden Entwässerungsschicht durch die Spülung erreicht wird als bei dickwandigen und gelochten Rohren (Schicketanz, 1991).

In der Praxis werden Spüldurchgänge im Wechsel mit Kamerainspektionen vorgenommen, um den Erfolg der Spülung unmittelbar zu kontrollieren und zu dokumentieren. Die Spülung ist so oft zu wiederholen, bis das betreffende Rohr frei von Inkrustationen erscheint. Für

die Kamerainspektionen werden selbstfahrende Videokameras eingesetzt, die sich in der Regel mit Hilfe von Gummiketten fortbewegen und über Scheinwerfer sowie schwenkbares Objektiv verfügen. Die technische Ausrüstung zur Auswertung und Dokumentation ist in einem Fahrzeug installiert.

Weitere geforderte Überwachungsmaßnahmen des Entwässerungssystems für die Betriebsphase sind nach TA Abfall

- Setzungsmessungen in den Entwässerungsrohren: jährlich (zur Methodik der kontinuierlichen Höhenvermessung siehe Kölsch & Collins, 1992)
- Temperaturprofile in den Entwässerungsrohren: jährlich (zur Methodik siehe Lhotzky, 1987, sowie Ramke & Lhotzky, 1988). Ramke und Brune (1990) nahmen bei mehreren Siedlungsabfalldeponien Temperaturprofile auf.

#### 2.1.4 Sickerwasserschächte

Wie bereits im Abschnitt 2.1.1 erwähnt, ist die Anlage von Sickerwasserschächten erforderlich, um einen Zugang zu der Mündung der Entwässerungsrohre zu ermöglichen, damit Kontrollmaßnahmen (Messungen, Kamerainspektionen) sowie Wartungsarbeiten (Hochdruck-Wasserspülungen) am Dränrohr vorgenommen werden können.

##### Forderungen namhafter Deponie-Regelwerke

Zur Zeit maßgebliche Regelwerke (TA Abfall, 1991; TA Siedlungsabfall, 1993; DIN 19 667; Runderlässe der Bundesländer zur Durchführung des Abfallgesetzes) sagen sehr wenig über die Gestaltung und Bemessung von Sickerwasserschächten:

Ein Sickerwasserschacht pro Dränstrang am unteren Ende des Stranges ist obligatorisch. Schächte innerhalb des Deponiekörpers sind zu vermeiden (Begründung s. u. in diesem Abschnitt). Wenn sie nicht zu vermeiden sind, so sind sie im Hinblick auf die zu erwartenden horizontalen und vertikalen Belastungen zu bemessen. Sie dürfen die Basisabdichtung nicht durchdringen. Das Setzungsverhalten des Schachtbauwerkes muß dem des Abfalls in unmittelbarer Umgebung entsprechen. Durch konstruktive Maßnahmen müssen Mantelreibungskräfte vermindert werden, die sich aus unterschiedlichem Setzungsverhalten im Abfall sowie zwischen Abfall und Schacht ergeben und die die Dichtung gefährden; desgleichen müssen horizontale Kräfte, bedingt durch setzungsbedingte Abfallumlagerungen, minimiert werden (vgl. unten in diesem Abschnitt). Sickerwasserschächte müssen so geräumig sein, daß Kontrollmaßnahmen (Messungen im Dränrohr, Kamerainspektion) und Wartungsarbeiten (Hochdruckwasserspülungen) ohne weiteres möglich sind.

Die LAGA-Informationsschrift "Sickerwasser aus Hausmüll- und Schlackendeponien" (1984) betont zusätzlich die Wichtigkeit des gasdichten Verschlusses von Dränrohrmündungen in Sickerwasserschächten – völlig zu Recht nach Ansicht der Verfasser: Denn es gilt, zusätzlich zu der an sich schon problematischen Bildung von Inkrustationen in den Entwässerungssystemen (siehe Abschnitt 3 in diesem Kapitel) weitere heftige Ausfällungsprozesse zu vermeiden, die sich daraus ergeben, daß der eindringende Luftsauerstoff im Sickerwasser reduziertes Eisen, Mangan, Magnesium etc. oxidiert. Denn diese oxidierten Substanzen bilden dann unlösliche Karbonate und Hydroxide. Die Dränschicht soll daher anaerob bleiben; das kommt auch dem mechanischen Langzeitverhalten von PE-HD-Rohren sowie -schächten zugute.

Zwei Ausführungsbeispiele für das Schachtinnere werden in der besagten LAGA-Informationsschrift gegeben:

Das eine Ausführungsbeispiel sieht an der Dränrohrmündung im Schachtinneren einen Syphon vor, vergleichbar einem Toilettenabfluß-Knie. Das frontale Ende des Entwässerungsrohres ist gasdicht verschlossen (mit einem Deckel, dieser wird für Kontroll- und Wartungsarbeiten entfernt); das Sickerwasser kann nur nach unten durch den Syphon abfließen. In dem anderen Ausführungsbeispiel ist das frontale Ende des Entwässerungsrohres ebenfalls gasdicht verschlossen; in der gleichen Weise fließt das Sickerwasser zunächst in einen Senkrecht-Stutzen, den es aber sofort nach unten verläßt – wobei der Stutzen unter Sickerwasser endet, welches durch eine Stauwand über einer Teilfläche des Schachtbodens gestaut wird. Das Sickerwasser aus dem Syphon- bzw. Stauwand-Überlauf fließt auf dem Schachtboden in freiem Gefälle in die Sammelleitung, die im Schachtinneren als offene Halbschale ausgeführt ist. Die Schachtinnenflächen, die mit Sickerwasser und Deponiegas in Berührung kommen, müssen gegen chemische Veränderung resistent sein. Die Schächte sind auf standfesten Untergrund zu gründen. Die Rohrdurchgänge durch die Schachtwände sind beweglich auszuführen. Die Schächte sind abzudecken (Betonschächte mit geschlossenen Betondeckeln, PE-HD-Schächte mit aufgeschraubten PE-HD-Dächern). Der Schacht muß einen Mindestdurchmesser aufweisen, der Wartungs- und Kontrollarbeiten, aber auch ggf. das Einsteigen ermöglicht (wenn die Dränrohrmündung deutlich unter der Geländeoberkante des Deponierands liegt). In diesem Fall muß der Schacht mit Steigbügeln ausgerüstet sein.

##### Materialien für Sickerwasserschächte

Als Baumaterialien für Schächte außerhalb des Deponiekörpers werden z. Z. bevorzugt Beton oder PE-HD in Fertigteilen eingesetzt, Schächte innerhalb des Deponiekörpers werden im Hinblick auf den Kontakt mit Sickerwasser und auf sehr ungleichmäßig einwirkende Kräfte (s. u.) bevorzugt aus PE-HD und nicht aus Beton

gebaut. In den Betonschächten werden zumindest die Flächen, die mit Sickerwasser in Berührung kommen, durch Keramikplatten oder PE-Auskleidungen oder dergl. vor Korrosion geschützt. Da aber auch das Deponiegas zusammen mit Wasser sauer reagiert, empfiehlt es sich, das gesamte Schachtinnere auszukleiden.

#### **Bemessung von Sickerwasserschächten außerhalb des Deponiekörpers**

Für die statische Bemessung von Schächten außerhalb des Deponiekörpers existieren zwei DIN-Normen (DIN 19 549 mit allgemeinen Anforderungen an Schächte für Abwasserkanäle, DIN 4034 Teil 1 für Schachtbauwerke aus Beton- bzw. Stahlbetonfertigteilen im Bereich von Abwasserkanälen) sowie der Entwurf der DIN 19 537 Teil 3 für entsprechende PE-HD-Schachtbauwerke.

#### **Bemessung von Schächten innerhalb des Deponiekörpers**

Daß alle maßgeblichen Regelwerke sowie diverse Fachleute (s. u., zur Bemessung) von Schachtbauwerken im Deponiekörper abraten, hat eine eindeutige Bewandnis: Im Abfallkörper treten sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung lokal stark unterschiedliche Setzungen auf, bedingt durch die lokal höchst unterschiedliche Komprimierbarkeit der Abfälle. Diese komplizierten Setzungsmuster führen zu kaum abschätzbaren Mantelreibungskräften, die obendrein über die Vertikalachse des Schachtes differieren. Daneben kommt es differenzsetzungsbedingt zu Scher- sowie Stauchkräften, die in horizontaler Richtung auf das Schachtbauwerk wirken (Ney, 1988). Die Berechnungsansätze für Schachtbauwerke im Erdreich lassen sich nicht auf diese Situation übertragen.

Vor diesem Hintergrund verwundert es nicht, daß häufig folgende Schäden an Schächten im Deponiekörper beobachtet wurden: Abscheren einzelner Elemente, Lotabweichung, Stauchung, Beulen, Durchstanzen der Bodenplatte sowie Korrosion bei Einsatz von Beton als Baumaterial (Ney, 1988; Prühs, 1988).

Hoch (1991 und 1992), Ney & Hug (1990), Ney (1988) sowie Gartung et al. (1989) zeigen Berechnungsmethoden zur statischen Bemessung von Schächten im Deponiekörper auf. Aus diesen Untersuchungen kristallisieren sich folgende allgemeingültigen Empfehlungen heraus:

- Einsatz von viskoelastischen Kunststoffen als Baumaterial, die resistent gegen chemische Veränderungen durch Sickerwasser sowie Deponiegas sind, die dabei ihre mechanischen Kennwerte behalten und die auch in gewissem Grade Stauchungen aufnehmen können – wie etwa PE-HD.

- Einsatz von Teleskop-Schachtkonstruktionen, die höhenunterschiedliche Mantelreibungskräfte ausgleichen (vgl. auch Dahm, 1989).
- Einsatz sogenannter Schwebeschächte. Diese sind Fertigteilkonstruktionen aus Betonschachtringen und dazwischen angeordneten Konstruktionselementen aus PE-HD, welche sowohl vertikale Mantelreibungskräfte als auch Horizontalkräfte aus dem umgebenden Abfall durch Verformung aufnehmen können (Sasse, 1992).
- Einbettung des Schachts in eine mineralische Ummantelung, damit Mantelreibungskräfte sowie Horizontalkräfte auf den Schacht abgeschwächt werden.
- Die einwirkenden Mantelreibungskräfte lassen sich nach heutigem Kenntnisstand nicht rechnerisch abschätzen. Diese muß man bis auf weiteres experimentell ermitteln – in einer Versuchsanordnung wie beispielsweise nach Ney (1988).

#### **2.1.5 Dränung über der Oberflächenabdichtung**

Dieser Abschnitt ist als Ergänzung zum Kapitel "Oberflächenabdichtungssysteme" zu betrachten.

Das Entwässerungssystem über der Oberflächenabdichtung soll während der Nachsorgephase der Deponie gemeinsam mit der Oberflächenabdichtung das Basisentwässerungssystem sowie die Basisabdichtung entlasten. Die Dauer der sogenannten Nachsorgephase ist nicht allgemein festgesetzt; letztere beginnt mit der Stilllegung eines Deponieabschnitts bzw. einer Deponie und endet, "wenn die zuständige Behörde den Deponiebetreiber aus der Nachsorgepflicht entläßt" (TA Abfall, 1991). Im Sinne von Stief (1986) sollte die Dränage über der Oberflächenabdichtung mindestens so lange funktionieren wie das Basisentwässerungssystem (vgl. Abschnitt 1 in diesem Kapitel).

Die TA Abfall überträgt im wesentlichen die Anforderungen an das Basisentwässerungssystem auf das Entwässerungssystem über der Oberflächenabdichtung. Abweichend ist das Längsgefälle des Oberflächen-dränsystems, welches sich aus der Anforderung an die Hangneigung der Oberflächenabdichtung ergibt ( $\geq 5\%$  nach Abklingen der Setzungen des Abfalls und des Dichtungsaufagers). Für die zu installierende Oberflächen-dränage muß im Vorfeld der rechnerische Nachweis der hydraulischen Funktionsfähigkeit geführt werden (analog zur hydraulischen Bemessung des Basisentwässerungssystems – siehe Abschnitt 2.1.2 in diesem Kapitel). Hierfür muß mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells zunächst der in die Drän-schicht gelangende Teil des Niederschlagswassers abgeschätzt

werden. Während der Nachsorgephase sind regelmäßig die Mengen an Niederschlägen, die Verdunstung sowie die Abflüsse aus den Dränrohren zu messen und zu bilanzieren.

Die DIN 19 667 macht keinerlei Unterschied zwischen Basis- und Oberflächenentwässerungssystem, sondern bezieht sich auf "das Dränsystem im Ablagerungsbereich von Deponien".

## 2.2 Deponieentwässerung in den USA

### Einführung

Zu Beginn dieses Abschnitts sei betont, daß neben dem Gesamtaufbau der Deponiedränsysteme nach amerikanischer Praxis im einzelnen nur Abweichungen von dem deutschen Stand der Technik zur Sprache kommen sollen. Themenbereiche, die hier nicht ausgeführt werden – wie Standsicherheitsnachweise für Entwässerungsrohre bzw. hydraulische Bemessung der Dränsysteme – sind im Abschnitt 2.1 dieses Kapitels staatsübergreifend abgehandelt worden.

Die gesetzliche Grundlage für Abfallwirtschaft und Deponietechnik in den USA bildet das Gesetz "Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)", welches 1976 in Kraft getreten ist. 1984 wurden Ergänzungen zum RCRA erlassen, die "Hazardous and Solid Waste Amendments". Die US-Umweltbehörde "Environmental Protection Agency (EPA)" hat in diesem Zusammenhang die Aufgabe, die gesetzlichen Bestimmungen aus dem RCRA/HSWA in Richtlinien umzusetzen, die den einzelnen Bundesstaaten die praktische Realisierung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen, von Deponiebau sowie von Deponiebetrieb gemäß RCRA/HSWA ermöglichen. Jeder Staat hat das Recht, eigene Deponierichtlinien zu erlassen. Der kleinste gemeinsame Nenner zwischen den Bundesstaaten ist dabei der Mindeststandard entsprechend den EPA-Richtlinien, die im folgenden genannt werden. Ein Bundesstaat darf einen höheren Deponiestandard fordern als gemäß EPA-Richtlinien, aber keinen niedrigeren. Einzelne Bundesstaaten – wie etwa New York – gehen in ihren Deponierungsanforderungen über den EPA-Standard hinaus.

Im Zusammenhang mit der Abdichtungstechnik spielen vor allem folgende Richtlinien eine wichtige Rolle:

- Lining of Waste Containment and Other Impoundment Facilities (EPA, 1988a)
- Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities (EPA, 1988b)
- Minimum Technology Guidance on Double Liner Systems for Landfills and Surface Impoundments (EPA, 1987a)
- Technical Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments (EPA, 1989a)

- Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers (EPA, 1991) sowie
- Geosynthetic Leachate Collection Systems (EPA, 1989b).

Obligatorisch ist die Anlage einer doppelten Basisabdichtung mit dazwischenliegender Kontrolldränage (vgl. auch Kapitel B). Dieses gilt für

- "hazardous waste piles" (EPA, 1988a), d. h. Sonderabfalldeponien in Haldenform
- "hazardous waste landfills" (EPA, 1988a), d. h. Sonderabfalldeponien in Grubenform
- "hazardous waste surface impoundments" (EPA, 1988a), d. h. Sonderabfalldeponien für flüssige Abfälle.

Nur für die dritte Kategorie ist kein Dränsystem über der oberen Basisabdichtung gefordert; die Anforderungen an die ersten beiden Kategorien entsprechen einander.

Hinsichtlich entsprechender Anforderungen an Siedlungsabfalldeponien bestehen nach Kenntnisstand der Verfasser bisher keine bundeseinheitlichen Regelungen. Der Bundesstaat New York beispielsweise stellt an Siedlungsabfalldeponien hinsichtlich der Abdichtungstechnik dieselben Anforderungen wie an Sonderabfalldeponien.

Das Basisabdichtungssystem gemäß aktuellem Stand der Technik besteht aus folgenden Komponenten (von oben nach unten; vgl. Kapitel B sowie Daniel und Koerner, 1991):

- 1) Filterschicht zwischen Abfall und Dränsystem
- 2) oberes Dränsystem
- 3) Schutzschicht über der oberen Dichtung
- 4) obere Dichtung (Kunststoffdichtungsbahn, ggf. mit dünner Bentonitschicht unterlegt)
- 5) Filterschicht
- 6) Kontrolldränsystem
- 7) untere Dichtung (Kombinationsdichtung aus mineralischer Dichtung und aufliegender KDB)
- 8) anstehender Untergrund

### Geosynthetische Dränschichten

Bevor weiter auf das Kontrolldränsystem sowie das obere Dränsystem eingegangen wird, ist es erforderlich, die geosynthetischen Dränschichten anzusprechen, welche sich in den USA zum Einsatz für die Deponiedränung zunehmender Beliebtheit erfreuen: Jeder renommierte Hersteller von Geotextilien bietet mittlerweile auch Geonets an: Gitter aus zwei gekreuzten Lagen parallellaufender Kunststoffstreben, welche (in ungestörtem Zustand) eine sehr hohe Wasserdurchlässigkeit entlang

der Gitterebene aufweisen. Die Herstellung erfolgt dergestalt, daß die annähernd rechteckigen Kunststoffstreben (zumeist PE-HD und PE-MD) des Geonets aus Düsen extrudiert werden, die in zwei dicht übereinanderliegenden Ebenen liegen und immer gleiche Abstände aufweisen. Die Düsen der oberen Ebene sind alle parallel zueinander ausgerichtet und bilden mit der Extrusionsrichtung der Düsen der unteren Ebene, welche mit denselben Abständen ebenfalls parallel ausgerichtet sind, einen spitzen Winkel. So entsteht bereits bei der Extrusion ein zweilagiges Netz; die oberen und unteren Streben verschmelzen an ihren Berührungspunkten. Vor dem Aushärten wird dieses Netz noch einmal seitlich (= quer zur Extrusionsrichtung) gestreckt, sodaß (in der Aufsicht) rautenförmige Zwischenräume entstehen, deren kleinere Winkel 60–70° betragen. Der Streckungsprozeß hat aber zur Folge, daß die zumeist rechteckigen Kunststoffstreben an den Kreuzungsstellen nicht mehr senkrecht aufeinanderstehen, sondern geneigt sind.

Die Strangquerschnittsfläche und die Maschenweite bestimmen unmittelbar den Fließquerschnitt des Geonets. Für die Basisdränagen von Deponien werden zumeist Geonets mit einer Strangdicke von 5–7,5 mm und einer Maschenweite um 10 mm eingesetzt.

Für die Bemessung eines Geonets muß zunächst die maximal auftretende Sickerwasserspende in die Drän-schicht mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells abgeschätzt werden oder, wenn dieses nicht möglich ist, aus Dränrohr-Abflußwerten bestimmt werden (vgl. Ramke, 1991; zur Verwendung eines Wasserhaushaltsmodells vgl. Kapitel O). Dieses ergibt  $q_{anfallend}$ , also die zu erwartende maximale Durchflußrate durch das Geonet.

Zweitens wird zum Vergleich  $q_{max (min.Dr.)}$ , d. h. die theoretische Durchflußkapazität einer mineralischen Drän-schicht, wie sie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben worden ist, für die horizontale Fließrichtung nach Darcy berechnet:

$$q_{max (min.Dr.)} = k \cdot i \cdot A.$$

Dabei entspricht  $k$  dem Durchlässigkeitsbeiwert der Drän-schicht in horizontaler Richtung,  $i$  deren Gefälle und  $A$  deren Querschnittsfläche.

Drittens bestimmt man experimentell den  $q_{akt(Geonet)}$ , d. h. die aktuelle Durchflußkapazität des Geonet, mittels des ASTM D4716-Tests. In diesem Test ist das zu prüfende Geonet zwischen flache Platten eingespannt, welche die Müllaufplast simulieren. Der Durchfluß erfolgt in der Gitterebene des Geonet. Ein Versuchsdurchgang dauert 30 Minuten (15 min Vorlauf unter Last, 15 min Durchfluß unter Messung), in welchem bei gegebenem hydraulischem Gradienten und gegebener Auflast  $q_{akt(Geonet)}$  ermittelt wird. Variiert werden der hydraulische Gradient (im Bereich 0,05–1) und die Auflast.

Letztlich muß  $q_{akt(Geonet)}$ , ermittelt unter hoher Auflast und mit hohem hydraulischen Gradienten, signifikant

über  $q_{anfallend}$  liegen und über die Versuchszeit möglichst konstant bleiben (die EPA schlägt einen Sicherheitsfaktor vor, um den  $q_{akt(Geonet)}$  höher liegen muß als  $q_{anfallend}$ ; s. u.). Gleichzeitig sollte der Wert von  $q_{akt(Geonet)}$  den entsprechenden Wert von  $q_{max (min.Dr.)}$  zumindest annähernd erreichen (EPA, 1989b).

Hinsichtlich der mechanischen Beständigkeit von Geonets zeigte dieser Test, daß die stabilsten untersuchten Geonets einer Auflast entsprechend 250 m Müllhöhe standhielten, ohne daß der Durchfluß während der Versuchszeit signifikant abnahm. Bei noch höheren Auflasten "klappten" alle untersuchten Geonets "zusammen", d. h. die an den Kreuzungspunkten nicht senkrecht stehenden Streben des Geonets gaben nach ("lay-over-effect"), was sich in einer rapiden Abnahme von  $q_{akt}$  während der Versuchszeit äußerte.

Das absolut Problematische an der Verwendung von Geonets zur Dränung an der Deponiebasis ist die Anfälligkeit gegen das Eindringen von Partikeln aus benachbarten Schichten. Dieses kann auch der genannte ASTM-Test nicht erfassen. Aus diesem Grund sind auch die aus diesem Test resultierenden  $q$ -Werte zu hoch. Das Geonet muß durch eine Trennlage (zumeist wird dafür ein Geotextil eingesetzt) gegen die darüberliegende mineralische Dichtung (bzw. gegen den Abfall bei Verwendung als obere Drän-schicht) geschützt werden. Die Verfasser rechnen fest damit, daß sich das nachgiebige Geotextil unter der Wirkung der Müllaufplast bereits mittelfristig völlig in die Maschen des äußerst flachen Geonets einpaßt und daher dann kaum noch einen Fließquerschnitt übrigläßt. In der Tat sind die Untersuchungsergebnisse zum Thema "intrusion into geonets" besorgniserregend (EPA, 1988a). Im Zuge von ASTM-D4716-Durchflußtests, in denen ein Geonet mit der Gesamtdicke von ca. 5 mm mit direkt aufliegendem genadeltem Vlies (130–520 g/m<sup>2</sup>) und darüberliegender Ton- bzw. Sandschicht (25 cm Dicke) getestet wurden, zeigte sich, daß das Geonet bei aufgetragenen Drücken von nur 1,05 bar (= 6,8 m Abfallüberdeckung) im Durchflußtest (mit hydraulischen Gradienten um 1) binnen einer Stunde 65 % seiner Durchlässigkeit bei aufliegendem Sand und 75 % seiner Durchlässigkeit bei aufliegendem Ton einbüßte (Hwu & Koerner, 1990). Ungeachtet dieser katastrophalen Ergebnisse werden in den USA weiterhin Geonets für die Dränung an der Deponiebasis propagiert (Daniel & Koerner, 1991). Die EPA behilft sich in dieser Frage einfach damit, reichliche Sicherheitsfaktoren zu fordern, um die der aktuelle Durchfluß durch das Geonet (lt. ASTM-Test D4716) höher liegen muß als  $q_{anfallend}$  (s. o.).

Die chemische und biologische Beständigkeit der Geonets, die in der Regel aus PE-HD und PE-MD gefertigt werden, gilt grundsätzlich als gegeben. Die EPA fordert jedoch zur Absicherung für alle diese Materialien, die mit Sickerwasser in Kontakt kommen können, eine Prüfserie in Anlehnung an die EPA-Methode 9090 (Compatibility Test for Wastes and

Membrane Liners; EPA, 1986). Diese Prüferie sieht zunächst eine Einlagerung der Prüflinge in demjenigen Original-Sickerwasser vor, welchem sie später ausgesetzt sein werden. Nach Einlagerungsdauern von bis zu 120 Tagen bei 23 °C und 50 °C unter Rührung und Luftabschluß werden die Prüflinge im Vergleich zu unbeanspruchten Prüflingen folgenden Prüfungen unterzogen: Stempeldurchdruckversuch, spez. Gewicht, Querzugversuch, Streifenzugversuch, Reißdehnung, Elastizitätsmodulbestimmung sowie Headspace-Analytik. (Die EPA-Methode 9090 ist ursprünglich für die Prüfung von Kunststoffdichtungsbahnen konzipiert worden.)

Die Verlegung der Geonets im Zuge des Deponiebaus ist denkbar einfach: Sie werden von Rollen abgerollt, in derselben Weise wie bei der Grobverlegung der Kunststoffdichtungsbahn, und dann so zurechtgerückt, daß die Bahnen um ca. 10 cm überlappen. Die Überlappungen werden anschließend per Warmgasschweißgerät unter Zuhilfenahme einer Andruckrolle manuell fixiert.

Geocomposites sind verklebte, fertig im Handel erhältliche "Sandwiches" aus Geonet und aufliegendem Vlies oder aus Geonet plus darüberliegendem Vlies (Filterschicht) plus darunterliegendem Vlies (Schutzschicht). Auch andere Kombinationen sind denkbar.

#### **Basis-Kontrolldränssystem (Secondary Leachate Collection and Removal System (S-LCRS))**

Dieses zusätzliche untere Dränssystem soll in der Lage sein, Leckagen in der oberen Dichtung innerhalb eines Tages nach ihrem Auftreten des Lecks anzuzeigen (EPA, 1987a; EPA, 1988a). In ihren "Proposed regulations for hazardous waste disposal", US Federal Register Vol 52 No 103 vom 29.05.1987 empfiehlt die EPA, bei der Beurteilung der Abflußraten aus dem S-LCRS ein Grundrauschen (action leakage rate) von 50–200 l/(ha·d) in Rechnung zu stellen. Überstiegen die Abflüsse diesen "threshold value", müsse der Deponiebetreiber einen Plan mit Abhilfemaßnahmen vorlegen. Bonaparte & Gross (1990) untersuchten die Ansprechempfindlichkeit der Kontrolldränagen von 23 doppelt gedichteten Deponien. Darunter waren solche mit einer einzelnen Kunststoffdichtungsbahn als "top liner" und andere mit einer Kombinationsdichtung als oberem Dichtsystem. Mit Hilfe der Kontrolldränageabflüsse konnte gezeigt werden, worauf das Grundrauschen zurückzuführen ist, und daß man eher von einem "threshold value" von 200 l/(ha·d) als von 50 l/(ha·d) ausgehen müsse. Ansonsten arbeiteten die Kontrolldränagen nach Bonaparte & Gross zuverlässig, wobei die aus den Abflüssen ermittelten Leckageraten pro Flächeneinheit in der Regel unter den Leckage-Berechnungen von Giroud & Bonaparte (1989 a und b) für Kunststoffdichtungsbahnen und Kombinationsdichtungen blieben.

Die Kontrolldränenschicht kann mineralisch sein oder als Geonet ausgeführt werden. Im ersteren Falle muß sie mindestens 30 cm dick sein. Das Quergefälle zu den Dränrohren sowie das Längsgefälle müssen mindestens

2 % betragen. Die Forderung nach einem mineralischen Dränmaterial mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von mindestens  $1 \cdot 10^{-2}$  m/s hat sich durchgesetzt. Kalkhaltiges Gestein soll vermieden werden. Liegt über der Kontrolldränenschicht eine mineralische Dichtschicht, fungiert in der Regel ein Geotextil (Vlies mit einem Flächengewicht unter  $500 \text{ g/m}^2$ ) oder eine dünne Kunststoffdichtungsbahn als Trennschicht, die ein Zuschlämmen der Kontrolldränage mit Feinbestandteilen aus der mineralischen Dichtschicht verhindern soll. Die unter der Kontrolldränage befindliche untere Dichtungsbahn wird durch eine Schutzschicht gegen die mechanische Einwirkung des mineralischen Dränmaterials geschützt, in aller Regel durch ein Geotextil höheren Flächengewichts.

In den Tiefpunkten des faltblattförmigen Oberflächenprofils der mineralischen Kontrolldränenschicht liegen die Entwässerungsröhre – ohne gesondert beschaffene Rohrumhüllung. Röhre aus PE-HD und noch vereinzelt aus PVC werden bevorzugt. Der verwendete Mindestdurchmesser beträgt 150 mm, um Kontroll- und Wartungsarbeiten zu ermöglichen. Standsicherheitsnachweise werden für die thermoplastischen Röhre ebenso wie in Deutschland gefordert (Einzelheiten siehe in dortigem Zusammenhang). Die Röhre sind perforiert, wobei hinsichtlich der Lochgeometrie, der Lochanteilfläche und der Anordnung der Löcher keine genauen Vorschriften gemacht werden. Jedoch darf das Tragverhalten des Rohres durch die Art der Perforation nicht signifikant beeinträchtigt werden (dieses berührt auch den Standsicherheitsnachweis); außerdem darf kein Dränmaterial durch die Dränageöffnungen durchtreten können. Sieben ASTM-(American Society for Testing and Materials-)Kurzzeitprüfungen sind für neuhergestellte Dränrohre vorgeschrieben: spez. Gewicht (ASTM D1505), Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul (ASTM D638), Stauchung unter verschiedenen Auflasten (ASTM D2412), Dehnungskoeffizient (1dimensional; ASTM D696), Wärmeleitfähigkeit (ASTM C177) sowie Entwässerungsverhalten unter verschiedenen hydraulischen Gradienten (ASTM D2837). Für die Dränrohrabstände gibt es keine klaren Vorgaben, da im Gegensatz zur oberen Dränenschicht keine eindeutigen Abflußwerte angegeben werden können. Jeder Dränstrang soll in seiner gesamten Haltungslänge zugänglich sein.

Die EPA sieht die Anlage von Sickerwasserschächten an den unteren Dränrohrmündungen, die außerhalb der Böschung liegen, als problematisch an, da hierfür die untere Dichtung durchbrochen werden müsse. Die EPA empfiehlt daher (wenn möglich), die Dränrohre von ihren oberen Enden her zugänglich zu halten und nur einen unteren Sickerwassersammelschacht für den gemeinsamen Sickerwassersammler außerhalb der Böschung anzulegen – oder einen Pumpensumpf am tiefsten Punkt eines jeden Deponieabschnittes innerhalb der Deponieböschung anzulegen. Die Pumpe müsse so angeordnet sein, daß sie die obere und die untere Dichtung nicht durchdringt, und müsse so gesteuert



werden, daß ein Sickerwasserstand von 30 cm im Sumpf nicht überschritten wird (genauerer siehe EPA, 1988a).

Wird eine mineralische Kontrolldränschicht gewählt, so empfehlen die EPA sowie Daniel & Koerner (1991) im Hinblick auf die Standsicherheit der Böschung eine kombinierte Lösung: den Einsatz eines Geonets als Kontrolldränschicht im Böschungsverlauf, welches frei übergeht in die mineralische Dränschicht an der Basis.

In dem Falle, in dem ein Geonet als Dränschicht des unteren Kontrolldränsystems fungieren soll, müssen bei der Konstruktion des Dränsystems zwei grundlegende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Das Geonet muß in jedem Fall durch eine Trennlage von der darüberliegenden mineralischen Dichtung gegen eindringende Feinpartikel geschützt werden. Die Problematik bei der Verwendung von Geotextilien als obere Trennlage für Geonets in Basisdränsystemen wurde bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Aus diesen Gründen halten die Verfasser die Verwendung einer Kunststoffdichtungsbahn als obere Trennlage für Geonets in Kontrolldränsystemen (S-LCRS) für angebrachter (vgl. auch Daniel & Koerner, 1991).
- Die Entwässerungsrohre können nicht, wie bei mineralischem Dränmaterial, an den Tiefenlinien des Oberflächenprofils der Dränschicht einfach in die Dränschicht eingebettet werden. Sie müssen konstruktiv aufwendig unterhalb der Dränschicht angeordnet werden. Die EPA (1988a) macht hierzu einen Ausführungsvorschlag. Im Bereich jedes Dränstrangs liegt das Dränrohr in einem Graben unterhalb der Geonet-Ebene. Dieser Graben liegt mit seiner gesamten Höhe in der unteren Dichtung und muß den mehrfachen Durchmesser des Dränrohrs aufweisen. Er ist mit Grobkies gefüllt; das Rohr ist mittig darin gebettet. Problematisch an dieser Lösung ist zum einen, daß die mineralische Dichtschicht der unteren Kombinationsdichtung deswegen um die Grabentiefe, mindestens aber um 50 cm dicker ausgeführt werden muß. Zum anderen muß die Kunststoffdichtungsbahn der unteren Kombinationsdichtung dem Verlauf des seitlichen und unteren Grabenrandes folgen; dadurch entstehen Knicks und Bögen in der Kunststoffdichtungsbahn, an welchen der Preßverbund der Kombinationsdichtung in Frage gestellt ist. Drittens macht die EPA den Vorschlag, das Geotextil, welches innerhalb der unteren und seitlichen Grabenränder als Schutzschicht für die KDB fungiert, auch oberhalb der Rohrleitungszone auszulegen, um diese gegen das Geonet zu filtern. Vom Einsatz einer solchen Filtertrennlage müssen die Verfasser eindringlich abraten (vgl. Abschnitt 2.1.2 in diesem Kapitel).

### Oberes Basis-Dränsystem (Primary Leachate Collection and Removal System – LCRS)

Das obere Basisdränsystem ist in seiner Funktion völlig vergleichbar mit dem Dränsystem in einem Dichtungsaufbau ohne zusätzliche Kontrolldränage, wie es in Abschnitt 2.1 beschrieben worden ist. Die Anforderungen an die Gestaltung des LCRS stimmen außerdem im wesentlichen mit den Anforderungen an das Kontrolldränsystem (S-LCRS) überein – bis auf folgende Besonderheiten:

- Im Gegensatz zum Kontrolldränsystem wird hinsichtlich der Bemessung des oberen Entwässerungssystems gefordert, daß die Sickerwassertinstauhöhe über der oberen Basisabdichtung langfristig bei jedem Abflußereignis unter 30 cm bleiben muß. Dieser Grenzwert entspricht der Höhe der Dränschicht; ein Einstau von Sickerwasser in die Abfälle hinein ist somit unzulässig.
- Im Gegensatz zum Kontrolldränsystem lassen sich die Sickerwasserspenden in das obere Dränsystem konkret abschätzen bzw. messen. Infolgedessen müssen der Durchmesser der Entwässerungsrohre und die Rohrabstände mittels einer hydraulischen Bemessung des Dränsystems bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.1.2 in diesem Kapitel).
- Die EPA und Daniel & Koerner (1991) empfehlen, die obere Dränschicht im Gegensatz zur Kontrolldränschicht in jedem Fall aus mineralischem Dränmaterial auszubilden. An den Böschungen sollte nach diesen Empfehlungen ein Geonet als Dränschicht fungieren. In allen vorliegenden Publikationen wird es für essentiell gehalten, die obere Dränschicht gegen den Abfall mit einem weitgestuften Sand oder mit einem Geotextil zu filtern, um Feinbestandteile des Abfalls aus der Dränschicht und den Entwässerungsrohren weitgehend herauszuhalten. Vor dem Einsatz solcher Filter an der Basis von Siedlungsabfalldeponien müssen die Verfasser eindringlich warnen: Im Zuge von Inkrustationsprozessen, die in der Dränschicht vom Abfall her beginnen, setzen sich zuallererst diese Filter zu. Aufgrund des vergleichsweise geringen Porenraumanteils ist dieses binnen kurzer Zeiträume möglich. (Vgl. die Ausführungen zur Filterstabilität im Abschnitt 2.1.2 sowie die Ausführungen im Abschnitt 3 in diesem Kapitel.)

### Dränsystem über der Oberflächenabdichtung

Der Gesamtaufbau der Oberflächenabdichtung gemäß EPA (1989a und 1991) ist im Kapitel B beschrieben. Die folgenden Gestaltungsregeln für das Dränsystem über der Oberflächenabdichtung entstammen den genannten Regelwerken.

Die Dränschicht über der Oberflächen-Kombinationsdichtung kann mineralisch sein oder auch aus einem Geonet bestehen. In jedem Fall muß das Hanggefälle unter Berücksichtigung der zu erwartenden Setzungen langfristig  $\geq 2\%$  betragen; empfohlen wird ein Bereich zwischen  $3\%$  und  $5\%$ . Die Dränschicht muß gegen die darüberliegende Vegetationsschicht durch einen mineralischen Filter (weitgestufter Sand) oder ein Geotextil gefiltert werden, um ein Eindringen von Bodenpartikeln in die Dränschicht zu verhindern. Das

mineralische Dränmaterial soll einen Mindest-Durchlässigkeitsbeiwert von  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s aufweisen und eine Schichtdicke von mindestens 30 cm bilden. Das alternativ einzusetzende Geonet muß in seiner Durchlässigkeit vergleichbar sein und dementsprechend bemessen werden (s. o.). Am unteren Hangende muß quer zur Hangfließrichtung ein (perforiertes) Entwässerungsrohr vorhanden sein, welches das Oberflächenwasser sammelt, faßt und einem Sammelschacht zuleitet.

### 3 Schäden an den Entwässerungssystemen, langfristige Funktionsfähigkeit

Erst seit ca. 1988 ist es Stand der Technik, regelmäßig (jährlich) Kamerainspektionen an den Entwässerungsrohren des Basisentwässerungssystems vorzunehmen. Bis dahin wurde die Funktionsfähigkeit von Deponieentwässerungssystemen wenig, unregelmäßig und nicht systematisch untersucht. Dennoch wurden seit Beginn der 80er Jahre zunehmend Schäden an Entwässerungssystemen bekannt. In einem deutlich kleineren Teil der Fälle handelte es sich um mechanisch bedingte Schäden wie Muffenversätze und Rohrbrüche, die durch die Verwendung statisch unterdimensionierter Rohre, vornehmlich aus Steinzeug, sowie durch unsachgemäßen Deponiebetrieb (Überfahren der Rohre mit Betriebsfahrzeugen bei zu geringer Abfallüberdeckung) verursacht worden waren. Der weitaus größte Teil der Schäden bestand in der Verstopfung von Entwässerungssystemen durch ausfällungsartige, schlammige bzw. feste Ablagerungen, auch Inkrustationen genannt, die die Entwässerungsrohre oder auch das Dränmaterial der umgebenden Entwässerungsschicht massiv zusetzen konnten (vgl. Essig et al., 1981; Bass et al., 1984; Bass, 1985 sowie Ramke, 1986). Diese Beobachtungen konnten durch neuere Untersuchungen bestätigt werden (Ramke & Brune, 1990). Die Bildung solcher Inkrustationen erweist sich somit als das Hauptproblem für die langfristige Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems.

Der BMFT förderte daher 1987–1989 ein Forschungsvorhaben, in dem das weitverbreitete Phänomen der Inkrustationsbildung näher untersucht wurde. Die beteiligten Institute – ein Wasserbau- und ein Mikrobiologie-Institut – konnten die Ursachen für die Bildung dieser Ablagerungen ermitteln und Lösungsansätze zur Bekämpfung sowie Vermeidung der Inkrustationsbildung aufzeigen (Ramke & Brune, 1990; Brune, 1991; Brune et al., 1991 sowie Brune & Ramke, 1992). Aus den systematischen Untersuchungen an den Entwässerungssystemen von ca. 10 Siedlungsabfalldeponien (Beteiligung an Aufgrabungen, Kamerainspektionen der Dränrohre, Sickerwasseranalysen, Deponiegasanalysen, Analysen der Inkrustationen, mikrobiologische In-situ-Versuche) sowie aus praxisnahen Säulenversuchen ergaben sich folgende wesentliche Aussagen:

Die Inkrustationen sind ein Netzwerk dichter Ansammlungen von anaerob (ohne Sauerstoff) lebenden Bakterien, die auch im Abfallkörper vorkommen und für den Abbau der organischen Substanz des Abfalls verantwortlich sind. An diese Bakterien sind Kalziumkarbonat, Eisenkarbonat und Eisensulfid angelagert, welche den überwiegenden Anteil an der Trockenmasse der Ablagerungen ausmachen. Im frischgebildeten Zustand sind die Ablagerungen schlammig, dann härten sie aus und können hart werden wie Beton. Welche Ausmaße diese Inkrustationen in der Entwässerungsschicht annehmen können, zeigte die Aufgrabung von vier Testfeldern auf der Deponie Geldern-Pont, die neun Jahre lang wie die restliche Deponie betrieben worden waren: Auf bis zu  $60\%$  der Fläche war die Dränschicht dieser Testfelder regelrecht zementiert und damit wasserundurchlässig geworden (Düllmann, 1988 sowie Düllmann & Eisele, 1989). Die Inkrustation der Dränschicht ist als besonders problematisch anzusehen, da derart betroffene Dränschichten nicht mehr repariert werden können. Aber auch die Bildungsrate von Dränrohrinkrustationen erwies sich bei Deponien mit schnellem Aufbaufortschritt als besorgniserregend. Ursachen für die Bildung der Inkrustationen sind im wesentlichen (vgl. Brune, 1991)

- die Stoffwechselaktivität von fünf Gruppen anaerob lebender Bakterien aus dem Hausmüll, die organische Substanz zum Leben benötigen
- die gemeinsame (gemischte) Deponierung von anorganischen und organischen Abfällen sowie
- eine ausgeprägte Phase der sauren Gärung, bedingt durch schnellen Deponieaufbaufortschritt und sofortiges Kompaktieren des Abfalls beim Einbau.

Dränmaterial der Körnung 16–32 mm behielt während 16 Monaten in Säulenversuchen unter organisch schwerbelastetem (kritischem) Sickerwasser sein Porenvolumen weitgehend, während feine Dränmaterialien (2–4 mm, 2–8 mm) und weitgestufte Dränmaterialien (1–32 mm) schon nach wesentlich kürzerer Zeit (um 1 Jahr nach Versuchsbeginn) unter denselben Randbedingungen un-

durchlässig geworden waren. Eine Übertragung dieser Standzeiten auf Deponien ist nicht möglich.

Aus diesen Ergebnissen konnten folgende Vorschläge abgeleitet werden, wie man die Inkrustationsbildung eindämmen bzw. verhindern kann, um die Funktionsfähigkeit von Deponieentwässerungssystemen langfristig zu erhalten:

- 1) Wahl und Einsatz möglichst grober Dränmaterialien (zur Filterstabilität von Materialien mit einer Körnung > 32 mm gegen hausmüllartige Abfälle kann nichts gesagt werden; Kies 16–32 mm erwies sich aber als filterstabil gegenüber der untersten Abfallschicht (Ramke & Brune, 1990; Düllmann, 1988).
- 2) Betriebstechnische Maßnahmen zur Abschwächung der Phase der sauren Gärung wie:

2a) aerobe Vorbehandlung der Abfälle (Rotte; vgl. Jordan et al., 1982 sowie Spillmann & Collins, 1981)

2b) langsamer Deponieaufbau

(zu 2a) und 2b) vgl. auch Ehrig, 1982)

- 3) Abfallwirtschaftliche Maßnahmen, die zu einer getrennten Deponierung von Organika und Anorganika führen (möglichst unter Verwertung der beiden Abfallkomponenten)
- 4) Bekämpfung der inkrustationsbildenden Bakterien im Entwässerungssystem (auch in der Dränschicht) durch Desinfektionsmaßnahmen in Verbindung mit üblichen Wartungsarbeiten (Spülung).

In einem Forschungsvorhaben innerhalb des BMFT-Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme" werden die genannten Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit hin untersucht. Wo erforderlich, werden dafür Methoden entwickelt (Turk et al., 1991 sowie Collins et al., 1993).

## 4 Sanierungsmöglichkeiten für Dränrohrstränge

### Bedeutung der Sanierung von Entwässerungsrohren

Durch die seit einigen Jahren mögliche und regelmäßig durchgeführte Inspektion der Entwässerungsrohre werden immer wieder schwere Schäden an Entwässerungsrohren entdeckt. Dieses betrifft insbesondere alte Deponie-Bauabschnitte, die bei Erscheinen dieses Berichtes 5 Jahre alt oder älter waren. Ursachen sind Fehler bei der Planung (z. B. Fehleinschätzung des Rohrwerkstoffs Steinzeug hinsichtlich seines Tragverhaltens unter Betriebsfahrzeugen bzw. unter Müllauflast), Fehler in der Bauausführung sowie ein unsachgemäßer Deponiebetrieb (z. B. Überfahung der Dränrohre mit Betriebsfahrzeugen bei zu geringer Abfallüberdeckung; massive Bildung von Inkrustationen). Die Folge ist häufig, daß Dränrohrleitungen auf Teilabschnitten solcher Stränge völlig eingestürzt bzw. derart mit Inkrustationen angefüllt sind, daß der betreffende Dränstrang das anfallende Sickerwasser nicht mehr abführen kann. Ein derart geschädigtes Dränsystem ist (auf einer Teilfläche) völlig funktionsunfähig und muß umgehend repariert werden, damit die Deponiebarriere "Dränsystem" wieder funktionieren kann.

### Bisher entwickelte Verfahren der Dränstrangsanierung

Nun ist die Lösung, den schadhafte Dränrohrstrang bei *offener Bauweise*, also im Zuge von sukzessiven Aufgrabungen des Deponiekörpers bis herunter auf die Deponiebasis zu ersetzen, eine sehr teure Lösung. Mit zunehmender Abfallüberdeckung – gerade bei den alten Bauabschnitten mit den vergleichsweise häufiger auftretenden Rohrschäden hat man es mit hohen Abfallüberdeckungen zu tun – wird eine solche Baumaßnahme auch technisch immer schwerer realisierbar. Bereits eine strangweite Aufgrabung bei einer Abfallüberdeckung von

15 m ist nach den Erfahrungen der Verfasser schon zu arbeitsaufwendig und hinsichtlich der Arbeitssicherheit äußerst bedenklich; eine Reihe von Zentraldeponien in Deutschland hat aber die mehrfache Abfallüberdeckungshöhe.

Diese Schwierigkeiten haben in den letzten Jahren dazu geführt, Überlegungen anzustellen, wie man Dränrohre in *geschlossener Bauweise* sanieren kann, d. h. ohne aufgraben zu müssen. Gegenwärtig werden hierzu von Baufirmen diverse Sanierungsverfahren angeboten. Fast alle wurden aber für die Instandsetzung von Abwasserkanälen entwickelt.

Die Relining- und Berstlining-Verfahren, bei denen das alte Kanal- bzw. Dränrohr durch ein neues, dem Stand der Deponietechnik entsprechendes PE-HD-Rohr ersetzt wird, werden im Anschluß eingehender diskutiert. Daneben gibt es auf dem Gebiet der Abwassertechnik noch etliche weitere, von Firmen angebotene Rohr-Sanierungsverfahren wie das Schlauchrelining (Firmenprospekte Hans Brochier GmbH & Co, Kanal-Müller-Gruppe), das Rib-Loc-Relining (John, 1987), die Robotersanierung des alten Rohres von innen durch Verpressung und Injektion von Kunststoffen (Firmenprospekte Kanaltechnik Brüst GmbH, A. Kunz GmbH), sowie nicht zuletzt Harzinjektionen an undichten Stellen des Rohrmantels vom Rohrinternen aus (Firmenprospekte Janßen GmbH, Fa. Schmidt und Tiefbau Union GmbH & Co KG). Da aber bei der Sanierung von Deponiedränrohren

- die einzubringenden Sanierungsmaterialien ebenso langzeitbeständig wie die dem Stand der Technik entsprechenden Dränrohre sein müssen (in Tragverhalten und Sickerwasserresistenz)

- die Dränstränge im Vergleich zu den Abwasserkanälen erheblich schlechter zugänglich sind
- die Dränwirkung der neueingebrachten Rohre mindestens so groß sein muß wie die der vorher eingebauten Rohre im Neuzustand, und da
- auch die neueingebrachten Rohre kamerabefahrbar sein müssen,

eignen sich für den Einsatz auf Deponien nur das Relining- sowie das Berstlining-Verfahren unter Verwendung neuer Rohre, die dem Stand der Technik gerecht werden (vgl. Bothmann, 1989).

### Relining-Verfahren

Im Zuge des Relining wird in das zu sanierende Altrohr ein neues Rohr mit kleinerem Durchmesser eingezogen (vgl. Firmenprospekte Boden- und Deponie-Sanierungs GmbH, Kanal-Müller-Gruppe, Panse Wetzlar Tiefbau GmbH, Stehmeyer & Bischoff GmbH sowie Wiik und Höglund GmbH). Das Verfahren erfordert die Anlage zweier Arbeitsschächte, eines Start- und eines Ziel-schachtes. Letzterer Umstand gilt auch für das Berstlining-Verfahren. Ist der Einbringeschacht sehr gut zugänglich, d. h. zu ebener Erde außerhalb der Depo-nieböschung gelegen, so kann das Langrohrrelining angewandt werden, wobei längere, schon vorher verschweißte bzw. verschraubte Rohrabschnitte über den Startschacht eingeführt werden. Begrenzt aber der Arbeitsschachtdurchmesser die Länge der einzuführenden Rohrabschnitte, so muß das Kurzrohrrelinig angewandt werden, wobei die Rohrabschnitte im Schacht im Wechsel mit streckenweisem Einführen miteinander verbunden werden müssen. Die Verfahrensanbieter geben an, daß das Relining bis zu einer Länge von 700 m möglich sei. Das Altrohr könne dabei einen Durchmesser zwischen 200 und 600 mm aufweisen.

Problematisch an diesen Verfahren hinsichtlich der Anwendung auf Deponien ist,

- daß das Relining einen weitgehend erhaltenen, quasi kreisförmigen Querschnitt des alten Rohres erfordert, was bei schweren Rohrschäden eben nicht gegeben ist,
- daß nur wenige zu sanierende Alt-Dränleitungen die Voraussetzung mitbringen, einen Durchmesser von mindestens 200 mm zu haben, und
- daß der Rohrquerschnitt und somit auch die Wassereintrittsfläche des neuen, eingezogenen Rohres geringer ist als der des alten.

### Berstlining-Verfahren

Das Berstlining-Verfahren wurde 1985 zum ersten Mal von British Gas in England zum Sanieren von Kanalrohren eingesetzt (als sog. "pipe bursting"; Clark, 1989). Mittlerweile bieten mehrere Firmen dieses Verfahren an, vornehmlich zur Sanierung von Abwas-

serleitungen (vgl. Firmenprospekte Boden- und Deponie-Sanierungs-GmbH, Kanal-Müller-Gruppe, Tiefbau Union GmbH & Co KG; vgl. ferner Beyert & Pohle, 1988). Von der Boden- und Deponie-Sanierungs GmbH ist bekannt, daß ihr Berstlining-Verfahren auf einer Siedlungsabfalldeponie zum Einsatz kam (Burkhardt & Theurer, 1990). Das Berstlining-Verfahren unterscheidet sich vom Relining dadurch, daß der alte Rohrquerschnitt vor dem Einziehen des neuen Rohres mit einem Verdrängungskörper aufgeweitet wird. Diese Aufweitung kann statisch erfolgen (mittels Hydraulik-Berstkörper nach den Erfindern Carruthers, 1988 und Weisenseel, 1989) oder dynamisch (mittels rhythmisch arbeitendem Bodenverdrängungshammer nach den Erfindern Jenne & Jenne, 1988 und Zimmermann, 1989). Daß der Querschnitt des einzuziehenden neuen Rohres ebensogroß und sogar größer sein kann als der des alten Rohres, macht dieses Verfahren sehr interessant für den Einsatz auf Deponien. Nach Angaben der Verfahrensanbieter lassen sich Altrohre mit 100–400 mm Durchmesser dynamisch aufweiten; statisches Aufweiten ist angeblich bei Rohrdurchmessern von 200–800 mm möglich. Die maximale bisher erzielbare Arbeitslänge beträgt ca. 120 m. Die Kosten pro lfd. Meter sind etwa doppelt so hoch wie beim Relining-Verfahren anzusetzen, betragen aber nur 1/5 der Kosten pro lfd. Meter Aufgrabung (wenn überhaupt machbar; vgl. Burkhardt & Theurer, 1990).

Wie das Relining setzt auch das Berstlining weitgehend erhaltene Rohrquerschnitte voraus. Zudem muß das zu verdrängende Altrohr biegesteif sein: Rohre aus Steinzeug etc. und auch PVC im kalten Zustand lassen sich aufweiten, nicht jedoch PE-HD Rohre. Einschränkend kommt hinzu, daß das alte Rohr im zu sanierenden Bereich gemäß DIN 19 667 gebettet sein muß, ansonsten darf die Basisabdichtung hier keine Kunststoffdichtungsbahn aufweisen, da diese in unmittelbarer Nachbarschaft zum Verdrängungskörper bei dem "Berst-Schritt" zerstört würde.

Insgesamt läßt sich festhalten, daß dieses Verfahren durchaus interessant ist für alte Deponieabschnitte bzw. Deponien, deren Entwässerungssystem nicht nach dem heutigen Stand der Technik angelegt wurde (keine PE-HD-Dränrohre, Basisabdichtung rein mineralisch). Entwicklungsarbeit muß dahingehend geleistet werden, daß

- auch streckenweise kollabierte Rohrstränge saniert werden können
- das neue einzuziehende Dränrohr vor den Scherben des verdrängten Altrohres geschützt wird
- das neue Dränrohr in statischer Hinsicht annähernd so gut gebettet ist wie in einem vollständig neu angelegten Entwässerungssystem.

Den genannten Aufgabenstellungen soll im Rahmen des BMFT-Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme" verstärkt nachgegangen werden (Rudat, 1991; Rudat, 1993).

## 5 Literatur

- ASTM – American Society of Testing and Materials (jährlich): Annual book of ASTM standards. Philadelphia, PA. (Hieraus sind die folgend genannten ASTM-Standards zu entnehmen).
- ASTM C177: Test Method for Thermal Conductivity.
- ASTM D638: Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- ASTM D696: Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics.
- ASTM D1505: Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique.
- ASTM D2412: Test Method for External Loading Properties of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading.
- ASTM D2837: Method for Obtaining Hydrostatic Design Basis for Thermoplastic Pipe Materials.
- ASTM D4716: Standard Test Method for Constant Head Hydraulic Transmissivity (In-Plane-Flow of Geotextiles and Geotextile Related Products).
- ATV-Arbeitsblatt A 127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen. Ein Regelwerk der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV). - Vertrieb: Ges. z. Förderung d. Abwassertechnik e. V., Markt 71, W-5205 St. Augustin 1.
- Bass, J. M.; Ehrenfeld, J. R.; Valentine, J. N. (1984): Potential Clogging of Landfill Drainage Systems. Project Summary EPA/600/S2-83/109.
- Bass, J. M. (1985): Avoiding Failure of Leachate Collection Systems. Waste Management and Research Nr. 3, S. 233-243.
- Beyert, J.; Pohle, G. (1988): Erneuerung von Kanälen in geschlossener Bauweise. Straßen- und Tiefbau 42, Nr. 12, S. 9-19.
- Bonaparte, R.; Gross, B. A. (1990): Field Behaviour of Double-Liner Systems. In: Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance. Geotechnical Special Publication No. 26, ASCE, S. 52-83.
- Bonvicini, A. C.; Manassero, M.; Street, A.; Viola, C. (1989): Lining, Leachate Collection and Monitoring of a Large Toxic Waste Landfill. Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium, 09.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. D.XI-1-11.
- Bothmann, P. (1989): Anforderungen an die Sanierung von Schadensfällen an Entwässerungssystemen von Deponien – Übersicht über Sanierungsverfahren. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1989. Berlin: Erich Schmidt. S. 49-64
- Bothmann, P. (1992): Anforderungen an die Sickerwasserdrainung unter besonderer Berücksichtigung ihrer Langzeitwirksamkeit. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten, Grundkursus. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH. S. 417-430
- Brömstrup, H. (1989): Statische Berechnung von Sickerrohren aus PE-HD in Mülldeponien. bbr 7.
- Burkhardt, G.; Theurer, H. (1990): Sanierung des Drainagesystems der Hausmülldeponie Sinsheim, Rhein-Neckar-Kreis. Müll und Abfall 1, S. 22-28.
- Brune, M. (1991): Ursachen für die Bildung fester und schlammiger Sedimente in Entwässerungssystemen von Hausmülldeponien. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Brune, M.; Ramke, H.-G.; Collins, H.-J.; Hanert, H. H. (1991): Incrustation Processes in Drainage Systems of Sanitary Landfills. Proceedings Sardinia 91, Third International Landfill Symposium, 14.-18. Oktober 1991. S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy. S. 999-1035.
- Brune, M.; Ramke, H.-G. (1992): Mikrobiologisch bedingte Ausfällungsprozesse in Deponieentwässerungssystemen. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Abdichtung von Deponien und Altlasten, Grundkursus. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH. S. 431-452.
- Cadwallader, M. (1986): A Look at Geonetting. Waste Age 17, No. 5, S. 87-88.
- Cancelli, A.; Rimoldi, P. (1989): Design Criteria for Geosynthetic Drainage System in Waste Disposal. Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium, 09.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. XXXIII-1-27.
- Carra, J. S.; Cossu, R. (1990)(Ed.): International Perspectives on Municipal Solid Wastes and Sanitary Landfilling. San Diego, CA 92101: Academic Press Inc.
- Carruthers, A. R. (1988): Pipe burster. European Patent Application, Publication Number 0 324 287 A1. Europäisches Patentamt.

- Cazzuffi, D.; Cossu, R.; Ferruti, L.; Lavagnolo, C. (1991): Efficiency of Geotextiles and Geocomposites in Landfill Drainage Systems. Proceedings Sardinia 91, Third International Landfill Symposium, 14.-18. Oktober 1991, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy. S. 759-780.
- Clark, J. R. G. (1989): Britische Erfahrungen mit der Entwicklung und der Anwendung des Rohrberst-Verfahrens (pipe bursting). 2. Internationaler Kongreß – Leitungsbau, 10, Hamburg.
- Collins, H.-J.; Turk, M.; Hanert, H. H.; Harborth, P.; Wittmaier, M. (1993): Erhaltung der Funktionsfähigkeit von Deponieentwässerungssystemen – abfallwirtschaftliche und betriebstechnische Maßnahmen. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 2. Arbeitstagung 17.-19.03.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 317-329.
- Dahm, K. (1989): Deponie-Entwässerungssysteme aus PE-HD, erprobt – bewährt – anerkannt. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Deponie 3. Ablagerung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH.
- Daniel, D. E.; Koerner, R. M. (1991): Landfill Liners from Top to Bottom. Civil Engineering, Dezember.
- Dansk Ingenioerforening (1991): Recommendation DS/R 466 for Sanitary Landfill Liners, 1st Ed. Oct. 1989, transl. into English.
- "DEPOROHR" (1989): Ein PC-Programm der Hochhuth-Software, Kassel.
- DIN 4034 Teil 1: Schächte aus Beton- und Stahlbetonfertigteilen für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; Maße, technische Lieferbedingungen.
- DIN 4226 Teil 1: Zuschlag für Beton – Zuschlag mit dichtem Gefüge.
- DIN 4266 Teil 1: Sickerrohre für Deponien.
- DIN 19 537 Teil 3 (Entwurf): Rohre, Formstücke und Schächte aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) für Abwasserkanäle und -leitungen; Fertigschächte; Maße, technische Lieferbedingungen.
- DIN 19 549: Schächte für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen; Allgemeine Anforderungen und Prüfungen.
- DIN 19 666: Sickerrohr- und Versickerrohrleitungen; Allgemeine Anforderungen.
- DIN 19 667 (1991): Dränung von Deponien, Technische Regeln für Planung, Bauausführung und Betrieb.
- Düllmann, H. (1988): Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. In: Gartung, E. (Hrsg.): Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien. Nürnberg: Eigenverlag der Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA).
- Düllmann, H.; Eisele, B. (1989): Schadensanalyse von Deponiebasisabdichtungssystemen aus Kunststoffdichtungsbahnen, Abschlußbericht. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. F+E-Vorhaben 103 02 225.
- Ehrig, H.-J. (1980): Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 26, 2. erweiterte Auflage.
- Ehrig, H.-J. (1982): Auswirkungen der Deponietechnik auf die Umsetzungsprozesse im Deponiekörper – Einführung in die Thematik sowie Untersuchungen auf der Deponie Venneberg/Lingen. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen der TU Braunschweig. Heft 33.
- EPA (US Environmental Protection Agency; 1986): EPA Method 9090, Compatibility Test for Wastes and Membrane Liners. In: Test Methods for Evaluating Solid Waste. Vol. 1a: Laboratory Manual, Physical/Chemical Methods. 3rd Ed. SW-846, US EPA, Washington (D.C.), September 30, 1986.
- EPA (1987a): Minimum Technology Guidance on Double Liner Systems for Landfills and Surface Impoundments – Design, Construction and Operation. EPA/530-SW-85-014, US EPA, Office of Solid Waste, Washington (D.C.), 71 pp.
- EPA (1987b): Background Document on Bottom Liner Performance in Double-Lined Landfills and Surface Impoundments. EPA 530/SW-87-013, US EPA, Washington, D.C.
- EPA (1988a): Lining of Waste and Other Impoundment Facilities (by Matrecon, Inc., Alameda, CA). EPA/600/2-88/052, US EPA, Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1988b): Guide to Technical Resources for the Design of Land Disposal Facilities. In: EPA Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments, EPA/530-SW-88-047, US EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1989a): Technical Guidance Document: Final Covers on Hazardous Waste Landfills and Surface Impoundments. EPA/530-SW-89-047, US EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.

- EPA (1989b): Geosynthetic Leachate Collection Systems (by R. E. Landreth). EPA/600/D-91/019, US EPA, Office of Research and Development. Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati (OH) 45268.
- EPA (1991): Design and Construction of RCRA/CERCLA Final Covers (by Eastern Research Group, Inc., Arlington, MA). Seminar Publication, EPA/625/4-91/025, US EPA, Center for Environmental Research Information, 26 West Martin Luther King Drive, Cincinnati (OH) 45268.
- Essig, G.; Köhlhoff, D.; Laber, R.-A.; Limbach, W.; Schickel, L. (1981): Untersuchung von Wirkung und Langzeitverhalten von Basisabdichtungen aus tonigem Erdmaterial und von Sickerwasserdrainagen zur Sohlentwässerung bei Hausmülldeponien. Teilbericht 2: Sickerwasserdrainagen. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Inneres, Forschungsbericht 103 02 210.
- Firmenprospekt der Boden- und Deponie-Sanierungs GmbH, Carl-Zeiss-Ring 13, 85737 Ismaning bei München: Stichwort "Relining und Berstlining an Deponie-Entwässerungsrohren".
- Firmenprospekt der Hans Brochier GmbH & Co, Marthastr. 16, 90482 Nürnberg: Stichwort "Insituform-Schlauchrelining".
- Firmenprospekt der Firma Janßen GmbH, 47546 Kalkar: Stichwort "Kanalsanierung mit Hilfe von Harzinjektionen".
- Firmenprospekt der Kanal-Müller-Gruppe, 32816 Schieder-Schwalenberg: Stichwort "Schlauchrelining, Kurzrohrrelining sowie Berstlining mit hydraulischer Aufweitung an Abwasserkanälen".
- Firmenprospekt der Kanaltechnik Brüst GmbH, 55743 Idar-Oberstein: Stichwort "Kanalsanierung mit Sanierungsroboter".
- Firmenprospekt der A. Kunz GmbH, Bavariaring 26, 80336 München: Stichwort "Kanalsanierung mit Sanierungsroboter".
- Firmenprospekt der Panse Wetzlar Tiefbau GmbH, Wetzlar: Stichwort "Kurzrohrrelining".
- Firmenprospekt der Firma Schmidt, 24226 Heikendorf: Stichwort "Roditec-Kanalsanierung mit Hilfe von Harzinjektionen".
- Firmenprospekt der Stehmeyer und Bischoff GmbH & Co KG, Bremen: Stichwort "robotergestütztes Kurzrohrrelining".
- Firmenprospekte der Tiefbau Union GmbH & Co KG, Dortmund: Stichworte "Renoform Berstlining" sowie "Kanalsanierung mit Hilfe von Harzinjektionen".
- Firmenprospekt der Wiik und Höglund GmbH, Lübeck: Stichwort "Kurzrohrrelining".
- Fleißner, M. (1987): Langsames Rißwachstum und Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyethylen. Kunststoffe 77, Heft 1, S. 45-50.
- Gartung, E.; Prühs, H.; Hoch, A. (1989): Design of Vertical Shafts in Landfills. Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium, 09.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. C.XI 1-8.
- Giroud, J. P.; Bonaparte, R. (1989a): Leakage through Liners Constructed with Geomembranes - Part I "Geomembrane Liners". Geotextiles and Geomembranes, Vol. 8, Nr. 2, S. 27-67.
- Giroud, J. P.; Bonaparte, R. (1989b): Leakage through Liners Constructed with Geomembranes - Part II "Composite Liners". Geotextiles and Geomembranes, Vol. 8, Nr. 2, S. 78-111.
- Henkhaus, R.; Rau, W. (1985): Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen gegenüber aggressiven Medien - Einfluß der Morphologie am Beispiel von Polyethylen hoher Dichte. Werkstoffe und Korrosion 36, S. 8-16.
- Hoch, A. (1991): Statische Berechnung von Rohren und Schächten aus PE-HD. In: 7. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 185-206.
- Hoch, A. (1992): Vorgabe für den Einbau - Standsicherheitsnachweise von Rohrwerken aus PE-HD in Deponien. In: 8. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 147-167.
- Hwu, B.-L.; Koerner, R. M. (1990): Geotextile Intrusion into Geonets. In: Den Hoedt, G. (Hrsg.): Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Rotterdam: Balkema.
- Jenne, G.; Jenne, D. (1988): Rammbohrgerät. Patentschrift DE 3708763 C2, Dt. Patentamt.
- John, H.-J. (1987): Neuartige Systeme zur unterirdischen Sanierung defekter Abwasserleitungen. In: 3R international, Heft 1/87. Essen: Vulkan-Verlag.
- Jourdan, B.; Spillmann, P.; Münz, H.; Britzius, E.; Stritzke, J.; Koch, H.; Holch, G.; Rothmund, A. (1982): Hausmülldeponie Schwäbisch Hall - Homogenisierung und Verrottung des Mülls vor der Ablagerung. Forschungsbericht T 82-180. Bundesminister für Forschung und Technologie.
- Kölsch, F.; Collins, H.-J. (1992): Kontinuierliche Höhenvermessung von nicht begehbaren Rohren. Untersuchungen auf Deponien und in Abwasserleitungen. Bauingenieur 67, Heft 6, S. 303-305.

- Kotte, G. (1988): Die aktuellen Einsatzspektren der Erd-raketen. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau 4, S. 179-186.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; 1979): Merkblatt M3 - Die geordnete Ablagerung von Abfällen. Deponiemerkblatt. In: Müll-Handbuch. Band 3, 4690. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-41.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; 1984): Sickerwasser aus Hausmüll- und Schlackendeponien. Informationsschrift. In: Müll-Handbuch. Band 3, 4725. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-42.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; 1990): Merkblatt M3 - Die geordnete Ablagerung von Abfällen. Deponiemerkblatt, Neufassung des gleichnamigen LAGA-Merkblattes von 1979. Entwurf, Stand Februar 1990.
- Lhotzky, K. (1987): Gas- und Temperaturmessung in Deponien. In: Möglichkeiten der Überwachung und Kontrolle von Deponien und Altablagerungen. Fachseminar. Zentrum für Abfallforschung, TU Braunschweig.
- Möllers, K. (1989): Erddruckmessungen bei der Anwendung von Verdrängungsverfahren. 2. Internationaler Kongreß - Leitungsbau, 10/1989, Hamburg.
- Müller, W. (1987): Erfahrungen mit vollautomatisch gesteuertem Vortrieb. Tunnel I, S. 26-29.
- Netherlands Ministry of Housing, Physical Planning and the Environment (1991): Guidelines for the Construction of impervious Final Covers for Waste-Product Storing Sites and Landfills. Document No. 634/EA 91/D006/16895, Juli 1991.
- Neumann, H.-G. (1990): Sanierung von erdverlegten Ver- und Entsorgungseinrichtungen - Sicherheitstechnische Anforderungen bei den gängigen Sanierungsverfahren. Tiefbau-BG 2, S. 80-90.
- Ney, P. (1988): Schäden an Schächten in Deponien, Konsequenzen für die Bemessung. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Deponie 2. Ablagerung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH.
- Ney, P.; Hug, F. W. (1990): Berechnung von Schächten in Deponien; Neue Erkenntnisse. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 31.
- Niedersächsischer Minister für Umwelt (1988): Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle. RdErl. vom 24.6.88 - 207 - 62812/21.
- Prühs, H. (1988): Schächte in Deponien. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Deponie 2. Ablagerung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH.
- Ramke, H.-G. (1986): Überlegungen zur Gestaltung und Unterhaltung von Entwässerungssystemen bei Hausmülldeponien. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1986. Berlin: Erich Schmidt.
- Ramke, H.-G.; Lhotzky, K. (1988): Neues Meßsystem zur Profilaufnahme von chemisch/physikalischen Parametern in situ. In: Altlastensanierung 1988. Bd. 1. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Ramke, H.-G.; Brune, M. (1990): Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit von Entwässerungsschichten in Deponiebasisabdichtungssystemen. Ergebnisse des F+E-Vorhabens 145 0457 3 der Technischen Universität Braunschweig. Der Bundesminister für Forschung und Technologie. Projektträger: Umweltbundesamt.
- Ramke, H.-G. (1991): Hydraulische Beurteilung und Dimensionierung der Basisentwässerung von Deponien fester Siedlungsabfälle - Wasserhaushalt, hydraulische Kennwerte, Berechnungsverfahren. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- Rudat, D. (1991): Pilotversuch zur Sanierung von Sickerwasserleitungen in Deponien durch Einbau neuer Rohre bei geschlossener Bauweise. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 51-58.
- Rudat, D. (1993): Pilotversuch zur Sanierung von Sickerwasserleitungen in Deponien durch Einbau neuer Rohre in geschlossener Bauweise. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 2. Arbeitstagung 17.-19.03.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 271-283.
- Sasse, T. (1992): Neubau und Sanierung von Schächten in Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 197-224.
- Schicketanz, R. (1991): Sickerwasserrohre zur Deponieentwässerung - Systeme und praktisches Betriebsverhalten. In: Umweltschutz durch sichere Deponien. Fachtagung, Oktober 1991 in Halle (Saale).



Schulz, W.; Schicketanz, R. (1991): Untersuchung über den Einfluß von Drainageöffnungen an Sickerwasserrohren aus Kunststoff mit dem Ziel einer Optimierung ihrer Langzeit-Standfestigkeit im Einbauzustand. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 43-49.

Schulz, W.; Schicketanz, R. (1993): Untersuchung über den Einfluß von Drainageöffnungen an Sickerwasserrohren aus Kunststoff mit dem Ziel einer Optimierung ihrer Langzeit-Standfestigkeit im Einbauzustand. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 2. Arbeitstagung 17.-19.03.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 331-339.

Spillmann, P.; Collins, H.-J. (1981): Das Kaminzugverfahren. Forum Städte-Hygiene, Heft Jan/Febr.

Steinkamp, S. (1987): Untersuchungsergebnisse des Entwässerungssystems der Zentraldeponie Hannover. In: Möglichkeiten der Überwachung und Kontrolle von Deponien und Altablagerungen. Fachseminar. Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 2.

Stief, K. (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll und Abfall 1, S. 15-20.

TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.

TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.

Turk, M.; Wittmaier, M.; Collins, H.-J.; Hanert, H. H. (1991): Erhaltung der Funktionsfähigkeit von Deponieentwässerungssystemen – abfallwirtschaftliche und betriebstechnische Maßnahmen. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 31-41.

Weisenseel, G. (1989): Einstellbare, hydraulische Aufweitvorrichtung zum Sanieren bzw. Erneuern von unterirdischen Abwasserkanälen, durch Aufweiten mit möglichst kleinem Ringraum, zum Nachführen von Spezialkurzrohren. Offenlegungsschrift DE 3740306 A1, Dt. Patentamt.

Zimmermann, H. (1989): Rohraufweitungsgerät. Europäische Patentanmeldung. Veröffentlichungsnummer 0 324 463 A1, Europäisches Patentamt.



# D Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen

(U. Müller)

1	Einleitung	41
2	Schutzsysteme	41
2.1	Schutzfunktion überwiegend durch polymere Werkstoffe	42
2.2	Schutzfunktion überwiegend durch mineralische Werkstoffe	42
3	Prüfverfahren	43
3.1	Prüfung der mechanischen Schutzfunktion	43
3.2	Prüfung der chemischen Beständigkeit	44
3.3	Prüfung der Erosionsstabilität	44
4	Schutzschichten in anderen Ländern	44
5	Offene Fragen, Wissenslücken	45
6	Literatur	45

## 1 Einleitung

Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) aus Polyethylen sind eine wesentliche Komponente in der Deponiebasisabdichtung, um eine Kontamination von Erdreich und Grundwasser durch Sickerwasseraustritt zu verhindern. Diese Aufgabe kann von der KDB jedoch nur erfüllt werden, wenn sie vor Beschädigungen während Einbau und Betrieb der Deponie zuverlässig geschützt wird.

Der Regelaufbau der Basisabdichtung nach der TA Abfall (1991) und der TA Siedlungsabfall (1993) sieht über der Kunststoffdichtungsbahn eine Flächendränage vor, für die sehr oft Rundkorn oder doppelt gebrochener Splitt der Körnung 16-32 mm verwendet wird. Zwischen KDB und Dränschicht ist daher eine Schutzschicht

einzufügen, auf deren Aufbau jedoch in den genannten Regelwerken nicht weiter eingegangen wird.

In den derzeit vorliegenden Entwürfen zu Deponierichtlinien der Bundesländer Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen sowie dem Entwurf zum LAGA-Merkblatt M3 (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, 1990) werden erste Schritte zu einer Konkretisierung und Vereinheitlichung getan. Die im Regelfall einzubauende Schutzschicht – eine Kombination aus Geotextil und mineralischem Material – wird beschrieben und ein Qualitätsnachweis in Form einer Zulassung durch eine Bundesprüfstelle gefordert. Für andere Schutzsysteme wird der Nachweis der Gleichwertigkeit verlangt.

## 2 Schutzsysteme

Als Folge der in der Einleitung angesprochenen Richtlinienentwürfe mit ihren Forderungen nach zugelassenen Schutzsystemen befindet sich der Markt derzeit in einer stürmischen Entwicklung, viele sehr unterschiedliche Systeme werden von Herstellern angedacht oder sind bereits marktreif. Eine Beurteilung der verschiedenen Systeme ist nicht einfach. Der in den Richtlinien erhobene Anspruch auf ausreichende Schutzwirkung über die mutmaßliche Lebensdauer der Kunststoffdichtungsbahn, einen Zeitraum von Jahrzehnten bis Jahrhunderten, erfährt dort keine konkrete meßtechnische Umsetzung.

Erste Kriterien zur Bewertung von Schutzsystemen wurden im Workshop 'Quo vadis Schutzschichten'

erarbeitet, einem Arbeitskreis von Fachfirmen und Ingenieurbüros, einschlägig beschäftigten Behörden und Forschungsinstituten. Dazu wurde ein Lastplattendruckversuch für den Nachweis der mechanischen Schutzwirkung konzipiert (Knipschild et al., 1988; Steffen, 1987; Sehrbrock, 1989). Hier wird bei Dellen in der KDB mit einer Dehnung  $> 0,25\%$  nach einem 1000 h-Lastplattendruckversuch von einem ungeeigneten Schutzsystem gesprochen.

Die derzeit bekannten Schutzsysteme lassen sich grob nach der Art ihres wichtigsten Werkstoffes – Polymere oder Mineralstoffe – unterscheiden. Nachfolgend sollen einige Systeme vorgestellt werden.

## 2.1 Schutzfunktion überwiegend durch polymere Werkstoffe

Eine ausführliche Darstellung zu Produktarten, Anwendungen und Prüfungen von Geotextilien aus polymeren Werkstoffen findet sich bei Kisskalt (1992).

Polymere Schutzsysteme haben als Grundlage in der Regel mechanisch verfestigte Spinnfaservliese, die entweder alleine oder in Kombination verwendet werden. Die Vliese werden aus 10–15 cm langen Stapelfasern oder aus Endlosfasern hergestellt, die flächig übereinander ausgelegt und durch Vernadelung verfestigt werden. Als Faserrohstoff findet entweder Polyethylen (PE-HD) oder Polypropylen (PP) Verwendung, wobei Endlosfaservliese in der Regel aus Polypropylen bestehen.

Die Klassifizierung der Vliese erfolgt über das Flächengewicht, das wesentlich die Festigkeit eines Vlieses bestimmt. Die ersten in den achtziger Jahren verwendeten Schutzvliese waren Materialien aus dem Straßenbau mit einem Flächengewicht von 400 g/m<sup>2</sup>, die Geotextilien wurden mit zunehmender Erfahrung jedoch sehr schnell stärker. Derzeit beträgt das übliche Flächengewicht 2.000 g/m<sup>2</sup>, es werden allerdings auch Schutzvliese bis zu 3.000 g/m<sup>2</sup> eingebaut.

Neuere Untersuchungen an Prüfständen oder auf Probefeldern mit statischer und dynamischer Belastung lassen die Eignung von Vliesen als alleiniges Schutzsystem jedoch fraglich erscheinen (Heerten, 1989; Sehrbrock, 1991 und 1993). Es gibt daher verschiedene Ansätze zur Verstärkung der Vliese.

In der einfachsten Variante wird über dem Schutzvlies noch ein Geogitter angeordnet, das die großflächige Lastverteilung übernimmt. Die Geogitter mit Maschenweiten von 1–5 cm bestehen ebenfalls aus PE-HD oder PP.

Eine Weiterentwicklung dieses Prinzips stellt eine Vlies-Gewebe-Kombination dar, bei der die Verstärkung, ein Bändchengewebe, zwischen zwei Vliese eingenadelt wird. Die Vliese sind im allgemeinen aus PP, während das Gewebe aus PE-HD besteht. Das Flächengewicht liegt ebenfalls um 2.000 g/m<sup>2</sup>. Die Zugfestigkeit wird durch das Gewebe bestimmt und ist deutlich höher als bei reinen Vliesen.

Eine ausschließlich aus synthetischem Material hergestellte Schutzschicht wird jedoch unter Last immer eine Neigung zum 'Kriechen' aufweisen. Bei konstanter Spannung über einen längeren Zeitraum erfolgt durch Fließen im Material ein Spannungsausgleich. In einer Arbeit zum Kriechverhalten von Geotextilien, in der u. a. auch zwei vernadelte PP-Stapelfaservliese untersucht wurden, ist bei allen Materialien unter konstanter Last eine kontinuierlich ansteigende Dehnung beobachtet worden (Shrestha & Bell, 1982).

Um hier eine grundlegende Verbesserung zu erzielen, wird in einer weiteren Variante, der sogenannten 'Bentonitmatte', zusätzlich ein mineralischer Werkstoff verwendet. Die Matte ist aus mehreren Schichten in der Reihenfolge Vlies, Bentonit, Gewebe und Vlies aufgebaut. Der bei der Herstellung der Matte pulverige Bentonit quillt bei Kontakt mit Wasser stark auf und es entsteht eine faserarmierte mineralische Schicht von ca. 2 cm Dicke. Das Gewebe sorgt dafür, daß der Bentonit unter Last nicht durch die Poren des Vlieses aus der Matte herausgedrückt wird. Die Vernadelung der Vliese bedingt die Scherfestigkeit der Matte. Für die dauerhafte Schutzwirkung sind daher Vlies, Gewebe und Bentonit gleich wichtig. Untersuchungen zeigen im Vergleich mit Schutzvliesen eine verbesserte Schutzwirkung sowohl bei kurzzeitiger dynamischer Beanspruchung als auch bei Langzeitversuchen (Biedermann, 1989). Gegenüber reinen Polymersystemen wird die Problematik des polymerspezifischen 'Kriechens' unter konstanter Last deutlich verringert sowie Chemikalien- und Temperaturempfindlichkeit positiv beeinflusst, andererseits stellt sich jedoch zusätzlich die Frage nach der Langzeitstabilität des Bentonit.

Der Einbau der Vliese bzw. modifizierten Vliese auf der Deponiebasis und im Böschungsbereich ist unkompliziert. Die in der Regel 5 m breiten Bahnen werden vom Hersteller als Rollen angeliefert und überlappend auf der Kunststoffdichtungsbahn ausgerollt. Die Stöße können vernäht oder thermisch verklebt werden. Die Bentonitmatte muß zusätzlich nach dem Verlegen gewässert werden, um die Quellung des Bentonits zu bewirken.

Eine mit Sicherheit langfristig ausreichende Schutzwirkung läßt sich bei einer Dränschicht aus Grobkies wohl nur durch mineralische Schutzschichten erzielen, die jedoch in jüngster Zeit mit Geotextilien als 'Verpackungsmaterial' so kombiniert werden, daß ein einfacher Einbau möglich wird (vgl. Abschnitt 2.2).

## 2.2 Schutzfunktion überwiegend durch mineralische Werkstoffe

Die ersten mineralischen Schutzschichten bestanden aus kalziumkarbonatarmem Sand mit einem Korndurchmesser von 0–2 mm (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., 1986) oder aus bindigem Boden. Diese Materialien wurden aus bautechnischen Gründen in einer Mächtigkeit von 10 bzw. 30 cm eingebaut. Trotz der unzweifelhaft guten Schutzwirkung und chemischen Beständigkeit ergaben sich jedoch unerwartete Probleme. Bei den Sandschutzschichten entstanden bald Zweifel an einer ausreichenden Filterstabilität des Materials, während bei einem bindigen Boden Standsicherheitsprobleme insbesondere im Hangbereich aufgrund der geringen Haftreibung zwischen Boden und Kunststoffdichtungsbahn auftraten.

In einer Weiterentwicklung wurde daher der Sand durch eine gleichstarke Schicht aus 0/8er Brechkorn mit einer definierten Körnungslinie ersetzt, das gegenüber einem 16/32er Dränkies filterstabil sein soll (Drescher, 1990). Da auch ein so feinkörniges Material Spuren auf der KDB hinterläßt, wird darunter noch ein 1.200 g/m<sup>2</sup> schweres Vlies aus PE-HD oder PP angeordnet. Ein derartiges Schutzsystem ist im Entwurf des LAGA-Merkblattes M3 von 1990 als Regelsystem beschrieben. In Ringversuchen des Workshops 'Quo vadis Schutzschichten' wurde eine ausreichende Schutzwirkung bis zu einer Auflast von 1000 kN/m<sup>2</sup> nachgewiesen (Witte, 1990; Protokoll des 3. Workshops). Bei der Berücksichtigung von Abminderungsfaktoren zur Zeitraffung und für die in der Deponie erhöhte Temperatur würde das einer Deponiehöhe von 30 m entsprechen.

Im Böschungsbereich ist es erforderlich, das Vlies zu verstärken, da es sonst durch sein Eigengewicht und das Gewicht des Brechkorns so stark verstreckt wird, daß es seine Kissenfunktion nicht mehr erfüllen kann oder sogar an der Böschungskante reißt. Hierzu kann entweder zusätzlich ein Geogitter verwendet werden oder von vornherein eine der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Vlies-Gewebe-Kombinationen mit einem Mindestflächengewicht > 1.200 g/m<sup>2</sup> gewählt werden.

Da der Einbau des oben beschriebenen Zweikomponentensystems relativ aufwendig ist, werden viele Varianten vorgeschlagen, die teilweise bereits bis zur Anwendungsreife entwickelt sind. Hierbei handelt es sich

vornehmlich um Schutzschichten nach dem Kissenprinzip. In mehr oder weniger große Hüllen aus Polymergewebe werden verschiedene mineralische Materialien wie Sand, Bentonit, Brechkorn, Beton usw. eingefüllt. Die Spannweite geht dabei vom wenige Quadratmeter großen Kissen über bis zu 150 m langen Schläuchen zum Extremfall einer Endlosmatte in der Größe der Deponiefläche. Bis auf die relativ kleinen Kissen, die bereits in der Fabrik fertiggestellt werden, erfolgt die Füllung auf der Deponie durch Einschlämmen oder Einblasen des mineralischen Materials. Neben der einfacheren Handhabung im Vergleich zu den rein mineralischen Schutzschichten liegt ein weiterer Vorteil darin, daß die allein aus einbautechnischen Gründen mind. 10 cm starke mineralische Schicht reduziert werden kann, da sich durch Abstandhalter in den Matten sehr gleichmäßige Füllungen erreichen lassen. Als weiteres System wird eine geotextile Schutzmatte angeboten, die vor Ort ausgerollt, mit Sand gefüllt und mit einem Trennvlies abgedeckt wird.

Bei den Schutzmatten ist eine einwandfreie Ausbildung der Stöße besonders wichtig. Lücken oder unplanmäßige Überlappungen zwischen den Matten sind kritische Bereiche, in denen eindringendes Dränagekorn Beschädigungen verursachen kann oder die Matten selber der Kunststoffdichtungsbahn eine Deformation aufzwingen. Übliche Methoden zum nahtlosen Anschluß der Matten sind Klett- oder Reißverschlüsse bzw. eine großflächiges Überlappen der entsprechend ausgebildeten Mattenränder.

### 3 Prüfverfahren

Wie die obigen Ausführungen zeigen, ist die Vielfalt der eingesetzten Schutzsysteme groß, sowohl was die verwendeten Werkstoffe (mineralische und polymere Materialien) als auch die Art des Systems (Vliese, Gewebe, Sandschicht, Beton usw.) betrifft. Einheitliche Anforderungskriterien und Prüfverfahren sind derzeit noch in der Entwicklung. Ein optimales Prüfverfahren sollte die Bewertung der langzeitigen mechanischen, chemischen und der Erosionsstabilität des geprüften Systems ermöglichen.

#### 3.1 Prüfung der mechanischen Schutzfunktion

Aus der anfänglichen Vielfalt mechanischer Prüfverfahren (vgl. Kirschner & Witte, 1991) wurde im Workshop 'Quo vadis Schutzschichten' in einem ersten Schritt zur Vereinheitlichung das nachstehend beschriebene Verfahren erarbeitet, das die Prüfung der mechanischen Schutzwirkung fast aller bekannten Schutzsysteme gestattet (Knipschild et al., 1988; Steffen, 1987; Sehrbrock, 1989; Pape & Huang, 1990; Witte, 1990; AK "Geotechnik der Deponien und Altlasten",

1991). Eine ausführliche Diskussion des mechanischen Schutzwirkungsnachweises findet sich bei Sehrbrock (1993).

In einem zylindrischen Stahlbehälter von mindestens 30 cm Durchmesser wird auf einer Elastomerplatte ein Weichblech und darüber die in der Deponie verwendete Kunststoffdichtungsbahn angeordnet. Auf der KDB wird das zu prüfende Schutzsystem eingebaut, welches abschließend mit dem Dränmaterial, in der Regel 16/32er Rundkorn, überschüttet wird. Der Prüfaufbau wird für 1000 h mit einer konstanten Auflast von 1000 kN/m<sup>2</sup> beansprucht. Nach Abschluß der Prüfung wird die KDB auf Beschädigungen (Kratzer, Kerben, Eindellungen) untersucht sowie an dem Weichblech die maximal aufgetretenen lokalen Dehnungen auf der Rückseite der KDB bestimmt. Eine Eignung des Schutzsystems wird angenommen, wenn die KDB unbeschädigt ist und die lokalen Dehnungen 0,25 % nicht überschreiten. Zur Untersuchung des Zeiteinflusses auf die Schutzwirkung kann dieser Versuch zusätzlich noch bei 10 und 100 h Belastungsdauer durchgeführt werden, so daß eine Extrapolation auf längere Zeiträume möglich wird.

Ergänzend zu dem Lastplattenversuch als 'performance test' wurden auch Punktlastversuche durchgeführt (Knipschild et al., 1988; Saathoff, 1989; Saathoff et al., 1990).

### 3.2 Prüfung der chemischen Beständigkeit

Der Nachweis der Langzeitbeständigkeit bei chemischem Angriff ist besonders wichtig für Schutzsysteme, die ganz oder teilweise aus polymeren Werkstoffen bestehen. Eine Prüfung der Beständigkeit gegenüber Sickerwasser, wie z. B. in der amerikanischen EPA-Richtlinie 9090 (U. S. Environmental Protection Agency, 1986) beschrieben (Prüfmedium Sickerwasser, Einlagerungszeit max. 1 Jahr, Temperatur 23 und 50 °C), hat den Nachteil, daß keine zeitraffenden Maßnahmen möglich sind und daß aufgrund einer naturgemäß nicht definierten Sickerwasserzusammensetzung Prüfergebnisse nicht ohne weiteres vergleichbar sind.

In Deutschland wird der Nachweis der chemischen Beständigkeit derzeit durch eine Indexprüfung in Anlehnung an das in der NRW-Richtlinie für Kunststoffdichtungsbahnen (Landesamt für Wasser und Abfall NRW, 1985) beschriebene Verfahren geführt. Das Ergebnis erlaubt keine absoluten Angaben über die Lebensdauer der Geotextilien in der Deponie, stellt aber sicher, daß qualitativ hochwertige Materialien verwendet werden. Die chemische Beständigkeit wird gegenüber 11 flüssigen Medien geprüft, wobei diese hochkonzentriert sowie als 10 %ige wäßrige Lösungen verwendet werden. Die Einlagerungszeiten der Proben betragen 7 und 28 Tage sowie 3 Monate bei einer Temperatur von 23 °C. Eine eventuell eingetretene Veränderung der mechanischen Eigenschaften wird mit einem Streifenzugversuch nach DIN 53857, Teil 2, festgestellt. Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung der eingelagerten Proben dürfen nicht mehr als  $\pm 25\%$  von den Referenzwerten abweichen.

Da die Durchführungsvorschriften der chemischen Prüfung der NRW-Richtlinie jedoch für Kunststoffdichtungsbahnen, d. h. massive Prüfkörper, erarbeitet wurden, müssen sie für die Geotextilprüfung modifiziert werden. In Ermangelung einheitlicher

Vorschriften werden daher je nach Prüfinstitut leicht unterschiedliche Verfahren bei Einlagerung, Entnahme und einer eventuellen Rücktrocknung der Proben angewendet. Als Folge sind die Prüfergebnisse nicht ohne weiteres vergleichbar.

Vom AK 'Geotechnik der Deponien und Altlasten' wurde 1991 eine Empfehlung zur Prüfung der chemischen Beständigkeit von Geotextilien publiziert, die auf der NRW-Richtlinie basiert (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., 1991). Die wichtigsten Änderungen sind die Verringerung der Prüfmedien auf acht, die Erhöhung der Prüftemperatur auf 40 °C und eine siebentägige Rücktrocknung der Vliesproben nach Entnahme aus dem Prüfmedium.

Weder die Prüfvorschriften der NRW-Richtlinie noch die Empfehlungen des Arbeitskreises erlauben jedoch die Prüfung anders aufgebauter polymerer Schutzsysteme wie zum Beispiel Vlies-Gewebe-Kombinationen oder Bentonitmatten. Das Problem der Spannungsrißbildung und generell der Auswirkungen gleichzeitigen mechanischen und chemischen Angriffs werden mit diesen Prüfungen ebenfalls nicht erfaßt. Eine Prüfmethode, welche die mechanischen und chemischen Belastungen in ihrem Zusammenwirken berücksichtigt, wird derzeit im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens 'Deponieabdichtungssysteme' erarbeitet (August & Müller, 1993).

### 3.3 Prüfung der Erosionsstabilität

Erst in jüngster Zeit wird die Frage der Erosionsstabilität bei mineralischen Schutzschichten wie Sand oder Bentonit bearbeitet. Erfahrungen und Bemessungskriterien aus dem Brunnen- oder Straßenbau sind nur mit Einschränkungen übertragbar, da dort entweder eine horizontale Durchströmung einer vertikalen Schichtabfolge oder eine vertikale Durchströmung einer horizontalen Schichtabfolge betrachtet wird. In der Deponie erfolgt jedoch die Strömung des Sickerwassers parallel zu den mineralischen Schichten. Die Brechkornschicht der Körnung 0-8 mm, die im Dichtungsaufbau entsprechend dem Entwurf des LAGA-Merkblattes M3 (LAGA, 1990) vorgesehen ist, ist jedoch schon nach geometrischen Filterkriterien erosionsstabil. Für die vertikalen Strömungsverhältnisse können die Filterkriterien nach Brauns (1985) verwendet werden.

## 4 Schutzschichten in anderen Ländern

Eine Vorbedingung bei der Verwendung von Schutzschichten ist der Einsatz einer zu schützenden Kunststoffdichtungsbahn in der Deponiebasis. Diese in Deutschland als Stand der Technik angesehene Bauweise wird bisher erst in wenigen anderen hochindustrialisierten Staaten angewendet.

In Österreich werden Deponien in 6 Deponiebauklassen eingeteilt, wobei Klasse 1 gleichbedeutend mit der ein-

fachsten Deponieausführung ist. Ab Deponiebauklasse 3 wird eine Kunststoffdichtungsbahn in der Deponiebasis vorgeschrieben. Obwohl als Drainagekies ein 16/45er Rundkorn verwendet wird, wird in der ÖNORM S 2071 der Einbau einer Schutzschicht nicht gefordert. Mit der ÖNORM S 2076 werden Anforderungen an geotextile Schutzlagen gestellt. Dabei kommen sowohl der Lastplattendruckversuch als auch der Pyramidendruckversuch zur Anwendung. Für die Pyramidendruckkraft

werden Mindestwerte in Abhängigkeit von dem vorgeesehenen Größtkorn der Dränschicht und in Abhängigkeit von der Auflast angegeben. Die Bewertung des Lastplattendruckversuchs unterliegt der gutachterlichen Stellungnahme.

In England werden Deponien häufig als Reaktordeponien mit dem Ziel der Gasproduktion angelegt. Um das Gas nicht unkontrolliert entweichen zu lassen, wird in einigen Fällen sogar eine doppelte Kombinationsdichtung eingebaut. Als Schutzschicht für die Kunststoffdichtungsbahn fordert eine Richtlinie der 'North West Waste Disposal Officers' von 1988 eine mindestens 30 cm starke Sand- oder Tonschicht, es werden jedoch auch geotextile Schutzlagen verwendet (z. B. Deponie Chadderton, Großraum Manchester).

US-amerikanische Deponiedichtungssysteme sind aus zahlreichen, relativ dünnen Schichten in einer doppelten

Kombinationsdichtung aufgebaut. Ein Überblick über die Anwendung von Geotextilien im Deponiebau in den USA wird in Koerner (1990) gegeben. Aus Platzgründen werden Kunststoffdichtungsbahnen durch die vergleichsweise dünnen polymeren Systeme vor Beschädigungen geschützt. Es werden sehr häufig, in Verbindung mit relativ feinkörnigen Dränmaterialien, Schutzvliese mit vergleichsweise geringen Flächengewichten bis zu 600 g/m<sup>2</sup> verwendet (Menoff et al., 1991). Neue Systeme wie Polymerschäume, fein zerkleinerte Altreifen oder zwischen zwei Vliese eingebrachte wiederverwendete Polymerfasern sind in der Entwicklung (Daniel & Koerner, 1991).

Einen Überblick über die Gestaltung von Schutzschichten im europäischen Ausland sowie in den USA gibt auch Kapitel B.

## 5 Offene Fragen, Wissenslücken

Die Unsicherheiten im Bereich der Schutzsysteme sind noch recht groß, und Forschungsbedarf ist in vielen Fragen gegeben:

- Schutzschicht am Hang  
Hier sind grundsätzliche Fragen zur Schutzschichtausbildung am Hang, zu Reibungsbeiwerten und zur Standsicherheitsproblematik zu klären (zu Standsicherheitsfragen siehe auch Kapitel M).
- Erosionsstabilität  
Es sind bisher keine Untersuchungen zur Erosionsstabilität mineralischer Schichten unter den in der Deponie vermuteten Strömungsbedingungen bekannt. Bekannte Rechenmethoden sind nur begrenzt anwendbar.
- Verhalten bei Setzungen  
Es ist bisher nicht untersucht, wie sich Setzungen auf die Wirksamkeit von Schutzsystemen auswirken.
- Prüfung der chemischen Beständigkeit von Geotextilien  
Hier sind einheitliche Durchführungsvorschriften zu

erarbeiten sowie am Werkstoff und an Sickerwasseranalysen orientierte Prüfmedien zu entwickeln.

- Einheitliches Prüfverfahren  
Es steht bisher kein Prüfverfahren zur Verfügung, das eine Bewertung und einen Vergleich verschiedener Schutzsysteme unter möglichst deponienahen Bedingungen erlaubt (Stichworte: hohe Auflast, chemische Einwirkung, erhöhte Temperatur, Sickerwasseranströmung, Langzeitverhalten).

Die beiden zuletzt genannten Problemkreise werden im Rahmen eines vom BMFT geförderten Verbundforschungsvorhabens bearbeitet. In der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung werden Untersuchungen zur chemischen Beständigkeit von Geotextilien durchgeführt und auf der Basis der erhaltenen Ergebnisse ein Prüfverfahren sowie Prüfmedien entwickelt. In Zusammenarbeit mit der Universität Hannover und der AMPA Hannover wird ein standardisiertes Prüfverfahren entwickelt, welches in Zukunft Aussagen zur Langzeit-Schutzwirksamkeit verschiedenster Schutzsysteme ermöglichen soll (August & Müller, 1993).

## 6 Literatur

August, H.; Müller, U. (1993): Untersuchung der Langzeitbeständigkeit von Schutzmaterialien für Kunststoffdichtungsbahnen von Deponiebasisabdichtungen. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 2. Arbeitstagung 17.-19.3.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 295-306.

Biedermann, B. (1989): Das Zusammenwirken von mineralischer Basisabdichtung, Schutzvlies und Filter-

schicht am Beispiel der Kombinationsdichtung für die Reststoffdeponie Hopferstadt. 5. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 247-264.

Brauns, J. (1985): Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchströmung. Wasserwirtschaft 75, S. 448.

Daniel, D.; Koerner, R. (1991): Landfill Liners from Top to Bottom. Civil Engineering, Dec. ASCE. S. 46-49

- Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (1986): Empfehlungen des Arbeitskreises 14. Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erdbau und Wasserbau. DVWK-Schriften 76.
- Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (1991): Empfehlungen des Arbeitskreises Geotechnik der Deponien und Altlasten. Bautechnik 68, Heft 9.
- DIN 53 857 Teil 2 (1979): Einfacher Streifenzugversuch an textilen Flächengebilden. Sept.
- Drescher, J. (1990): Anforderungen an Dichtungssysteme für Deponien. 6. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 23-45.
- Heerten, G. (1989): Geotextilien. 5. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 59-77.
- Kirschner, R.; Witte, R. (1991): Geotextiles for the Protection of Geomembranes in Landfills. Proceedings Sardinia 91. Third International Landfill Symposium. 14.-18. October 1991. S. Margherita di Pula (Cagliari), Italy. 14-18 Oct. 1991. S. 797-806.
- Kisskalt, J. (1992): Kunststoffe in der Geotechnik, Deponiebau mit Geotextilien. Nürnberg: Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der LGA Bayern. Heft 68.
- Knipschild, F. W.; Saathoff, F.; Bassen, R. (1988): Kunststoffdichtungsbahnen mit und ohne Schutzvliesstoffe unter Punktlasten. 1. Kongreß "Kunststoffe in der Geotechnik" K-GEO 88, Hamburg.
- Koerner, R. (1990): Design with Geosynthetics. London: Prentice Hall.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (1990): LAGA-Merkblatt M3. Die geordnete Ablagerung von Abfällen. Entwurf vom Febr.
- Landesamt für Wasser und Abfall NRW (1985): Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen. (Hrsg.): Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- Menoff, S.; Stenborg, J.; Rodgers, M. (1991): The Use of Geotextiles in Waste Containment Facilities. High-Tech Fibrous Materials. S. 351-357.
- North West Waste Disposal Officers (1988): Landfill Liners Sub-Group. Guidelines on the Use of Landfill Liners. Oct. 1988.
- ÖNORM S 2071. Deponien, Deponiebauklassen. Österreichisches Normungsinstitut. Wien.
- ÖNORM S 2076. Deponien, Dichtungsbahnen aus Kunststoff, Verlegung. Österreichisches Normungsinstitut. Wien.
- Pape, J. T.; Huang, L. (1990): Large-Scale Testing of Waste Containment Sealing under Point Loading in High Pressure Testing Device. Proceedings 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Rotterdam/Brookfield: Balkema. S. 585-587.
- Saathoff, F. (1989): Kunststoffdichtungsbahnen mit und ohne Schutzvliese unter Punktlasten. 5. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 121-136.
- Saathoff, F.; Kohlhase, S.; Zitscher, F.-F. (1990): Sealing Systems – Tests on Friction and Punctiform Loading. Proceedings 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. Rotterdam/Brookfield: Balkema. S. 567-572.
- Sehrbrock, U. (1989): Schutzwirkung von Geotextilien im Deponiebau. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig. Heft 30.
- Sehrbrock, U. (1991): Untersuchungen zur Dimensionierung geotextiler Schutzlagen. 7. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 155-170.
- Sehrbrock, U. (1993): Prüfung von Schutzlagen für Deponieabdichtungen aus Kunststoff. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig. Heft 40.
- Shrestha, S.; Bell, J. (1982): Creep Behaviour of Geotextiles under Sustained Loads. Proceedings 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas. S. 769-774.
- Steffen, H. (1987): Geotextilien in der Deponietechnik. Haus der Technik e. V. Februar.
- TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/ physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.



U.S. Environmental Protection Agency (1986): EPA Method 9090. Compatibility Tests for Wastes and Membrane Liners. Test Methods for Evaluating Solid Waste. 3rd Ed., EPA SW-846. Washington D. C.

Witte, R. (1990): Protokoll zum 3. Workshop Quo vadis Schutzschichten. Hannover.

Witte, R. (1990): Weiterentwicklung des Schutzwirksamkeitsnachweises für geotextile Schutzsysteme in der Deponiebasisabdichtung. Müll und Abfall 12, S. 788-789.



## E Kunststoffdichtungsbahnen (W. Müller, G. Lüders)

1	Herstellung und Einbau	49
1.1	Einführung	49
1.2	Herstellungsverfahren	50
1.3	Qualitätssicherung bei der Herstellung	50
1.4	Einbau der Kunststoffdichtungsbahn als Teil einer Kombinationsdichtung	51
1.5	Die Qualitätssicherung beim Einbau der Dichtungsbahnen	51
2	Fügetechnik	52
2.1	Einführung	52
2.2	Geometrische und strukturelle Beschaffenheit der Schweißnaht	53
2.3	Verhalten der Schweißnaht bei zerstörender Beanspruchung	53
2.4	Offene Fragen, Wissenslücken	55
3	Literatur	56

### 1 Herstellung und Einbau

#### 1.1 Einführung

Die Eignung der Kunststoffdichtungsbahnen (KDB), die als Teil einer Kombinationsdichtung in Oberflächen- und Basisabdichtungen von Deponien eingebaut werden, muß im Rahmen einer Zulassung nachgewiesen werden. Dies fordert für Sonderabfalldeponien die TA Abfall (1991) und für die Siedlungsabfalldeponien die TA Siedlungsabfall (1993) sowie die verschiedenen Ländervorschriften (vgl. Nds. Minister für Umwelt, 1988, sowie LAGA, 1990). Seit 1988 vergibt die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Auftrag des niedersächsischen Umweltministers (vgl. Nds. Minister für Umwelt, 1988) solche Zulassungen. Eine ausführliche Darstellung der Anforderungen an Herstellung und Einbau findet sich in der Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen ..., herausgegeben von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, 1992).

Derzeit werden nur Bahnen aus im Niederdruckverfahren hergestellten Polyethylenen mittlerer Dichte zugelassen, die eine hohe chemische Beständigkeit und Beständigkeit gegen oxidativen Abbau besitzen sowie nur geringe Anfälligkeit gegen Spannungsrißbildung zeigen. Die Dichte liegt in der Regel zwischen 0,932 und 0,942 g/cm<sup>3</sup> und der Schmelzindex (DIN 53735, 190/5) zwischen 0,4 und 1,8 g/10 min. Das Granulat ist schon vom Rohstoffhersteller mit einem Rußgehalt zwischen 1,8 und 2,6 Gew.-% schwarz eingefärbt. Dies sorgt für eine ausreichende UV-Stabilität der Bahnen. Derzeit

wird für Oberflächenabdichtungen der Einsatz neuer, flexiblerer Polyethylene (z.B. VLDPE), aber auch der Einsatz von Recyclingmaterial, diskutiert.

Bislang zugelassene Bahnen werden im Breitschlitzdüsenverfahren und im sogenannten Extrusionswebverfahren hergestellt. Dichtungsbahnen können aber auch im Blasfolienverfahren hergestellt werden. Nach dem Stand der Technik können im Breitschlitzdüsenverfahren einwandfreie Bahnen von 5 m Breite und mit dem Extrusionswebverfahren derzeit schon bis zu 10 m Breite gefertigt werden. In nächster Zukunft werden jedoch auch mit dem Breitschlitzdüsenverfahren breitere Bahnen ohne Vorkonfektionierung produziert werden. Zur Vermeidung von Fügenähten, die eine potentielle Schwachstelle im Abdichtungselement darstellen, sollten möglichst breite Bahnen eingesetzt werden. Andererseits müssen die Bahnenrollen beim Transport und Verlegen gut handhabbar sein. Bei einer Mindestdicke von 2,5 mm und einer typischen Rollenlänge von 100 m hat eine 10 m breite Bahnenrolle bereits ein Gewicht von 2,5 t. Wesentlich breitere Bahnen als 10 m wird man auf den typischen Deponiebaustellen (Verlegefläche einige 10.000 m<sup>2</sup>) nicht mehr sinnvoll einsetzen können.

Die Bahnen werden so weit wie möglich im Heizkeilschweißverfahren mit Schweißmaschinen durch Doppelnähte mit Prüfkanal gefügt (vgl. Abschnitt 2 in diesem Kapitel).

## 1.2 Herstellungsverfahren

Eine einführende Übersicht über Verfahren der Kunststoffverarbeitung wird von Menges (1979) gegeben. Eine ausführlichere Darstellung der Extrusionsverfahren findet sich bei Hensen et al. (1986). Allen Verfahren zur Herstellung der Bahnen gemeinsam ist die Plastifizierung und thermische Homogenisierung des Granulats in einem Extruder. Über einen Trichter wird kontinuierlich Neumaterial und in gewissem Umfang granuliert Rückführungsware in die Schneckenpresse eingeführt. Die typischen Verarbeitungstemperaturen für Polyethylene liegen bei etwa 200 °C.

Beim Breitschlitzdüsenverfahren wird die aufgeschmolzene Formmasse aus dem Extruder durch eine Breitschlitzdüse gepreßt. Im Abstand einstellbare Lippen und regulierbare Staubalken bestimmen Dicke und Materialfluß des austretenden Materialteppichs. Die aus der Düse austretende plastische Schmelze wird in einer Kalandieranlage, einem Walzwerk aus riesigen Präzisionswalzen, abgezogen, ausgeformt, geglättet und abgekühlt. Die Bahn wird schließlich auf Wickelkernen aufgewickelt. Die verschiedenen Prozeßparameter, u. a. auch eine Dickenkontrolle z. B. über ein  $\beta$ -Strahler-Dickenmeßgerät, werden automatisch erfaßt und geregelt. Es entstehen Bahnen mit hervorragenden Oberflächeneigenschaften. Die Dicke kann mit enger Toleranz eingestellt werden. Durch den Einsatz entsprechend profiliertener Kalandervalzen können verschiedenartige Strukturen den Bahnen aufgeprägt werden.

Beim Folienblasverfahren wird die aus dem Extruder austretende Formmasse in ein Ausformwerkzeug gelenkt, in dem über eine Düse ein Schlauch ausgeformt wird, der durch Stützluft in seinem Inneren aufgeblasen wird. Über einen Abzugsturm wird der Schlauch hochgezogen und dabei abgekühlt. Er läuft in eine satteldachförmige Flachlegeeinrichtung und mündet als flachgelegter Schlauch in der Abzugswalze. Vor dem Aufwickeln wird der flachgelegte Schlauch aufgeschnitten und zu einer Bahn aufgeklappt. Auch hier erfolgt wie bei den anderen Verfahren eine weitgehend automatisierte Prozeßsteuerung. Oberflächenbeschaffenheit und im Vergleich zum Kalanderverfahren relativ große Dickenschwankungen bereiten bei diesem Verfahren Probleme. Zusätzlich entstehen zwei Falten durch das Flachlegen, Umlenken und Aufschneiden des Materialschlauches, in denen vom Grundmaterial abweichendes Werkstoffverhalten auftreten kann.

Beim Extrusionswebverfahren wird aus dem Extruder über eine Breitschlitzdüse ein schmaler (ca. 50 cm breiter) Materialteppich axial auf eine vorgeheizte, intermittierend rotierende Trommel aufgetragen. Die Temperatur des gerade ausgelegten Bahnsegments wird über eine Haubenheizung so lange oberhalb des Schmelz-

punktes gehalten, bis der Extruder das nächste Bahnsegment anschließt. An der Segmentkante kann das Material im Schmelzezustand unter Rollendruck verschweißen. Die Bahn wird abgekühlt, von der Trommel abgezogen und auf einen Stahlblechwickelkern aufgewickelt. Bei diesem Verfahren ziehen sich "Webnähte" in gleichmäßigem Abstand über die Breite der Bahn. Für diese Naht muß eine enge Überdickentoleranz eingehalten werden, da sich sonst Probleme beim Schweißen an den Nahtstellen ergeben. Auch bei diesen Bahnen wird durch das nachträgliche Aufsprühen von Material eine Oberflächenrauigkeit erzeugt (Salomo & Krause, 1989).

Zugelassene Bahnen werden über die ganze Fläche, etwa alle 2 m<sup>2</sup>, mit einer dauerhaften Zulassungskennzeichnung versehen. Die Bahnränder werden aufgrund einer Empfehlung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit Schutzfolien abgedeckt, die unmittelbar vor dem Fügevorgang zu entfernen sind. Es können verschiedene, nach der Verlegeplanung des jeweiligen Deponievorhabens erforderliche Längen aufgewickelt und geliefert werden.

## 1.3 Qualitätssicherung bei der Herstellung

Rohstoffeingangskontrolle, weitgehend automatisierte Prozeßkontrolle, Probennahme aus der laufenden Fertigung und Prüfungen im Rahmen der Eigenüberwachung, des weiteren Probennahme sowie Überwachung von Herstellung und Eigenüberwachung durch ein unabhängiges Prüfinstitut bilden die Bestandteile der Qualitätssicherung. Die Qualität der Rohstofflieferung wird durch ein Werkszeugnis belegt. Die Angaben werden durch stichprobenartige Kontrolle von Dichte, Schmelzindex, Rußgehalt, Feuchtigkeitsgehalt und anderer für die Fertigung relevanter Kenngrößen vom Bahnenhersteller überprüft. Häufigkeit und Art der Prüfungen durch den Hersteller an den fertigen Bahnen wird in der Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen ... (BAM, 1992) beschrieben. Zweimal jährlich wird die Herstellung durch ein Prüfinstitut unangemeldet überwacht. Dabei werden aus der laufenden Produktion Proben entnommen, die einer umfangreichen Prüfung unterzogen werden (siehe eben genannte Richtlinie). Beim Besuch des Fremdüberwachers wird jedoch auch das Funktionieren des betriebsinternen Qualitätssicherungssystems des Herstellers überprüft. Die Rollen werden mit einem Werkszeugnis ausgeliefert. Kennwerte und zulässige Toleranzen sind dabei im Anhang zum Zulassungsschein vorgeschrieben. Für alle Prüfungen besteht eine Dokumentations- und Aufbewahrungspflicht der Unterlagen. Anhand der Zulassungskennzeichnung kann auch bei verlegten Bahnen eine Zuordnung zu den Ergebnissen der betrieblichen Eigenüberwachung erfolgen.

## 1.4 Einbau der Kunststoffdichtungsbahn als Teil einer Kombinationsdichtung

Eine Kunststoffdichtungsbahn muß so eingebaut werden, daß das Kunststoffabdichtungselement auf einer einwandfreien Oberfläche der mineralischen Dichtung so glatt aufliegt, daß spätere Auflasten wie Schutz-, Entwässerungs-, Abfall- und Rekultivierungsschichten zu einem vollflächigen Kontakt, dem sogenannten Preßverbund, zwischen KDB und mineralischer Schicht führen. Dieses Ziel kann nur bei einem zwischen allen Gewerken genau abgestimmten Bauverfahrensablauf erreicht werden. In der Regel müssen dabei die Kunststoffdichtungsbahnen verlegtägig mit der Schutz- und Flächenentwässerungsschicht ballastiert werden. Dies muß in den frühen Morgenstunden geschehen, wenn sich die Bahnen durch die Abkühlung im Tag-Nacht-Temperaturverlauf glattgezogen haben. Durch das Einspannen der verlegten Bahnen mit streifenförmigen "Ankerriegeln" aus Schutzschicht und Drainagekies kann das Glattziehen unterstützt werden (Schicketanz, 1992). Nur durch frühzeitiges Ballastieren einer glattgezogenen Bahn können Einbaufehler wie zu starke Welligkeit und niedergedrückte Verwellungen nach dem Ballastieren, Überspannung von Kehlen und Bildung von Wassersäcken, Schädigung der mineralischen Dichtung unter der Bahn durch Vernässung vermieden werden.

Die Oberfläche der mit einem ein- bis zweitägigen Vorlauf eingebrachten mineralischen Dichtung muß bestimmte Anforderungen erfüllen, damit ein möglichst vollständiger Preßverbund erreicht wird. Im folgenden seien die Bestimmungen hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit zitiert, wie sie für den Einbau zugelassener Bahnen gefordert werden (BAM, 1992):

"Die Oberfläche muß frei von un stetigen oder abrupten Änderungen und aufliegenden Körnern oder Fremdkörpern sein. Stufen (Eindruckunterschiede) von 0,5 cm Höhe können geduldet werden. Unebenheiten unter einer auf der Oberfläche aufliegenden 4m-Latte (Richtscheid) dürfen nicht mehr als 2 cm betragen. Ausnahmen bilden Ausformungen in der Sohle zur Aufnahme der Sickerwasserrigolen. Durch geeignete Materialauswahl und Einbaumethoden ist sicherzustellen, daß in der Oberfläche keine Körner mit einem Durchmesser > 10 mm vorhanden und alle feineren Kiesanteile schwimmend so eingebettet sind, daß sie allseits von bindigem Bodenmaterial umgeben sind. Eine Beurteilung der Oberfläche der mineralischen Dichtung muß schon im Versuchsfeld erfolgen. Die zur Auflage der KDB fertigestellte Oberfläche ist vor Austrocknung (Trockenrißbildung, pulvrig-trockene Oberfläche), Wasseranstau, Überflutung (vernäßte Oberfläche) oder Durchfrostung zu schützen. Gelingt dies nicht, so ist die letzte Lage der mineralischen Dichtung vor dem Einbau der KDB entsprechend aufzuarbeiten."

Weitere Bestimmungen zum Versuchsfeld, Verlegeverfahren, zur Füge technik, zu den Baustellenprüfungen und zu den Schutzschichten finden sich ebenfalls in der zuletzt zitierten Zulassungsrichtlinie.

## 1.5 Die Qualitätssicherung beim Einbau der Dichtungsbahnen

Nach der TA Abfall (1991) und der TA Siedlungsabfall (1993) wird eine dreigliedrige Hierarchie der Qualitätssicherung vorgeschrieben (siehe auch Schicketanz, 1992). Der Hersteller hat eine eigene Qualitätssicherung durchzuführen, verantwortlich ist hier in der Regel die Fachbauleitung des jeweiligen Herstellers. Neben diese Eigenüberwachung tritt die unabhängige Fremdüberwachung durch ein Ingenieurbüro, eine Prüfanstalt oder ein -institut etc. Ein für die jeweilige Überwachungstätigkeit qualifizierter und deponietechnisch erfahrener Fachmann trägt dafür, bei ständiger Anwesenheit auf der Baustelle, die Verantwortung. Das dritte Glied in der Überwachung bildet die Kontrolle durch die zuständige Fachbehörde. Der Fremdüberwacher sollte zwar auf Kosten des Bauherrn, jedoch im Auftrage und enger Abstimmung mit der Fachbehörde tätig werden. Die Überwachungstätigkeit der Fachbehörde umfaßt dann regelmäßige Kontrollen sowie die Abstimmung mit dem Fremdüberwacher bei allen wichtigen Entscheidungen (etwa Beurteilung der Oberfläche der mineralischen Dichtungen, Standsicherheitsnachweise etc.).

Grundlage aller Qualitätssicherungsmaßnahmen bildet der Qualitätssicherungsplan als ein Dokument, welches für das jeweilige Bauvorhaben "die speziellen Elemente der Qualitätssicherung sowie die Zuständigkeiten, sachlichen Mittel und Tätigkeiten festlegt". Ein Beispiel zu Inhalt und Gliederung findet sich bei Schicketanz (1992) sowie bei Schicketanz & Lotze (1992). Die Grundbegriffe der Qualitätssicherung werden in DIN 55 350, Teil 11 definiert. In der Normenserie DIN ISO 9000 bis 9004 werden die verschiedenen Begriffe erläutert.

Die wesentlichen Qualitätsforderungen und -merkmale sollten schon in der technischen Detailplanung auf Grundlage des Planfeststellungsbeschlusses festgelegt werden, dabei sind z. B. die Bestimmungen und Auflagen der Zulassung der KDB zu berücksichtigen. Die Planungs- und Ausschreibungsunterlagen werden der Fachbehörde zur Prüfung vorgelegt. Die Fachbehörde sollte schon zu diesem Zeitpunkt den Fremdüberwacher beauftragen. Auf Grund der Projektunterlagen und diese ergänzend und konkretisierend wird vom Fremdüberwacher ein ausführlicher Qualitätssicherungsplan erstellt, der die Maßnahmen der Qualitätslenkung, -überwachung und -prüfung enthält. Nach Auftragsvergabe und damit der Festlegung der Firmen und der zum Einsatz kommenden Materialien werden alle noch allgemeinen Anforderungen des Qualitätssicherungsplanes konkretisiert. Der fertige Qualitätssicherungsplan sollte jetzt für jede Qualitätsforderung die genauen Mittel

und Tätigkeiten festlegen, über die die Sicherung der gewünschten Qualität erreicht wird. Im Hinblick auf den Einbau der Dichtungsbahnen muß der Qualitätssicherungsplan folgende Punkte berücksichtigen: Stand-sicherheitsnachweise, Versuchsfelder, Verlegeplanung, Bauablaufplanung, Oberfläche der mineralischen Dichtung, Verlegetechnik und -geräte, Prüfung der Schweißmaschinen und -geräte, Prüfung der Schweißnähte,

## 2 Fügetechnik

### 2.1 Einführung

Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) werden im Deponiebau in Breiten von 5–10 m verlegt und anschließend gefügt, um Deponiebasis- und Oberflächenabdichtungen herzustellen. Die Fügeverfahren müssen werkstoffgerecht und baustellentauglich sein. Da sich Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) als resistenter Werkstoff für Regelabdichtungen durchgesetzt hat, werden nur noch Schweißverfahren angewendet.

Kleberverfahren kommen für PE-HD nicht in Betracht (Cadwallader, 1986).

Um den gewachsenen Anforderungen gerecht zu werden, die die Deponietechnik an die Qualitätssicherung stellt, hat sich das Bahnschweißen, wie es früher als Handwerk im Erd- und Wasserbau betrieben wurde, zu einer Bahnschweißtechnik entwickelt, in der mit regelbaren selbstfahrenden Maschinen ein fortlaufendes Fügen ganzer Bahnlängen von 150 m und mehr zuverlässig möglich ist.

Die im Deponiebau verwendeten Schweißverfahren, Nahtgeometrien und Prüfverfahren zur Qualitätssicherung sind in der Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen ... (BAM, 1992), in den Richtlinien des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik (DVS) sowie in landes- und baurechtlichen Vorschriften beschrieben. Sie wurden von Kopp (1991) zusammenfassend kommentiert. Für die USA gelten Prüfrichtlinien, die von der Environmental Protection Agency (EPA, 1991) für Bahnschweißnähte herausgegeben wurden.

In der Regel wird mit Heizkeilschweißmaschinen gefügt. Nur dort, wo ein Maschineneinsatz nicht möglich ist, werden von Hand nach vorheriger Heftung Auftragsnähte im Warmgas-Extrusionsschweißverfahren hergestellt. Die kalten Überlappnähte mit Prüfkanal werden über der gesamten Länge auf äußere geometrische Beschaffenheit und mit Druckluft auf Dichtigkeit geprüft. Das Verformungsverhalten von Proben im Zugschälversuch dient zur Einstellung der Schweißparameter auf der Baustelle. "Schlechte" Schweißnähte, d. h. solche, die unter Bedingungen weit ab vom Parameteroptimum hergestellt wurden, schälen dabei auf. Sie lassen sich bei normgerechter Prüfung durch die gemessene Schälfestigkeit in ihrer Qualität diffe-

Anbindung an Bauwerke, Eignungsnachweise für Schutzschichten (Müller et al., 1992), Aufbringen der Schutz- und Dränageschicht, Witterungsschutz, Maßnahmen bei Witterungseinbruch. Eine Liste der Qualitätsforderungen für den Einbau der Dichtungsbahnen findet sich bei Schicketanz & Lotze (1992) sowie in der Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen (BAM, 1992).

renzieren. Zugelassene "gute" Schweißnähte bleiben bei Schälbeanspruchung intakt und zeigen Verstreckung im Grundmaterial neben der Naht.

Im Zugscherversuch versagen Heizkeilschweißnähte immer im Grundwerkstoff neben der Naht. Insofern ist die Frage berechtigt, ob die Schweißnaht für Deponieabdichtungen die potentielle Schwachstelle ist oder nicht. Da dieses Verhalten auch im Zeitstandzugscherversuch und im Relaxationsversuch beobachtet wird, ist auch die Berechtigung der Annahme fragwürdig, daß die Schweißnaht als solche für die Dichtung lebensdauerbestimmend ist. Immerhin haben aus Deponien ausgegrabene wie auch frei bewitterte Schweißnähte gezeigt, daß sie im möglichen, fraglos viel zu kleinen, Beobachtungszeitraum den langfristigen mechanischen Belastungen schadlos widerstehen können.

Kenntnisse, die eine dem hohen Schadstoffpotential von Deponien gerecht werdende Sicherheit in der Vorhersage der Schweißnahtlebensdauer erwarten lassen, sind aber derzeit nur im Ansatz vorhanden und greifen häufig auf Ergebnisse zurück, die an Schweißnähten im Apparate- und Anlagenbau gewonnen wurden. Die Einhaltung einer größeren Zahl von Parametern und Randbedingungen gestaltet sich bei der Herstellung und Untersuchung von Bahnschweißnähten zudem schwierig. Insofern und unter der Annahme des langzeitigen Wirkens einer Zugbeanspruchung quer zur Schweißnaht ist dieser Bereich der KDB zweifellos eine potentielle Schwachstelle.

Die wissenschaftlich-technischen, geräte- und prüf-technischen Arbeiten sind im wesentlichen gerichtet auf

- das Kurzzeit- und Zeitstandverhalten von Schweißnähten (z. T. unter deponietypischen Belastungsarten);
- Möglichkeiten zur Vorhersage der Schweißnahtlebensdauer aus Ergebnissen von Kurzzeit- und Zeitstanduntersuchungen;
- Zusammenhänge mit den Schweißbedingungen;
- Zusammenhänge mit der Nahtgeometrie;
- die Schweißnaht als strukturelle und rheologische Inhomogenität des Grundwerkstoffes;

- das Erkennen von Versagenkriterien (äußere und innere Belastungen);
- die Entwicklung und Anpassung von (gegebenenfalls baustelleneigneten) Prüfmethoden;
- Gütekriterien.

## 2.2 Geometrische und strukturelle Beschaffenheit der Schweißnaht

Die Schweißnaht wird als geometrische und strukturelle Inhomogenität des bahnenförmigen Grundwerkstoffes verstanden. Gefügeuntersuchungen von Egen (1986) und Horn (1987) an stumpfgeschweißten Polypropylen-Rohren und von Bielefeld (1991) an heizkeil- und wärmegeschweißten KDB aus PE-HD zeigen, daß die Schweißnaht durch aufeinanderfolgende Strukturzonen des partiell kristallinen Werkstoffes aufgebaut ist. Mehr als röntgenamorphe Kunststoffe zeigen die sphärolitisch strukturierten Polyolefine Abhängigkeit von der thermischen und rheologischen Vorgeschichte, d. h. von den Prozeßparametern. Erwärmungsdauer, Heizkeiltemperatur und Abkühlgeschwindigkeit sowie Fügedruck und Fügegeschwindigkeit und die örtliche Symmetrie aller Parameter im gesamten Nahtbereich sind Faktoren bei der Entstehung von fein- und normalsphärolitischen, transkristallinen und durch Scherung orientiert kristallisierten Gefügebereichen. Letztere erwiesen sich als versagensrelevante Nahtbereiche bei Belastung senkrecht zur Orientierungsrichtung. Gehde (1991) bezeichnet eine Schweißnaht als thermisch-rheologischen Eingriff in den Grundwerkstoff, der im Regelfall einzelne Güteigenschaften der Dichtungsbahn verringert. Es ist dabei naheliegend, daß diese Einflüsse umso größer sind, je höher der Kristallinitätsgrad und die Dichte des Grundwerkstoffes und je größer die Sphärolite sind. Insofern zeigen die "mitteldichten" PE-HD-Typen des Dichtebereiches 0,932–0,940, die z. B. nach Hutten (1991) die Einsatzforderungen in Deponien am besten erfüllen, gleichermaßen auch gute Fügbarkeit, d. h. hohe Festigkeit und (Spannungsriß-) Beständigkeit von Schweißnähten. PE-HD höherer Dichten versprechen zunehmend an den Schweißnähten und sind spannungsrißempfindlich (Peggs, 1990).

Nach Potente (1977) hängt die Festigkeit von Heizelement-Stumpfschweißnähten neben Diffusions- und Retardationsphänomenen hauptsächlich von der Intensität eines Schmelzeflusses ab. John (1984) fand einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit und der Nahtfestigkeit von Heizelement-Stumpfschweißnähten. Oberhalb einer bestimmten Mindestfließgeschwindigkeit kann die Nahtfestigkeit nicht mehr gesteigert werden; der Bruch tritt dann nicht mehr in der Fügeebene auf (gute Schweißnaht). Äußeres Kennzeichen dieses Quetschprozesses ist der Fügegeweg bzw. der Wulst als geometrischer Bestandteil jeder normalen Schweißnaht. Über den Quotienten aus Fügegeweg  $s_F$  und der Schmelzeschichtdicke  $L_0$  nach der Vorwärmung der

Fügepartner konnte Michel (1988) bei einem Wert von 0,75 maximale Kurzzeitzugfestigkeit von lochgekerbten Stumpfschweißnahtproben beobachten und auf diesem Wege Schweißparameter optimieren.

Beim Heizkeilschweißen muß anstelle des Fügeweges die äußere Dicke und die Schmelzeschichtdicke der fertigen Schweißnaht herangezogen werden. Bielefeld (1991) hat die Schmelzeschicht und die Wulstfläche von Heizkeilschweißnähten mit der Standzeit von Proben im Zeitstandzugversuch korreliert und so versucht, jeder Schweißparameterkombination eine bestimmte Nahtgeometrie zuzuordnen und als Gütekriterium zu verwenden. Die Ergebnisse müssen ausgebaut werden, lassen jedoch die Bedeutung einer Quetschkennzahl, wie sie in Fachkreisen diskutiert wird, erkennen. Auf den Einfluß, den die Form des Wulstes auf das Zeitstandverhalten hat, wies John (1988) hin. Anzustreben ist eine glatte Birnenform ohne Zerklüftung.

## 2.3 Verhalten der Schweißnaht bei zerstörender Beanspruchung

In der Deponie sind die Schweißnähte den gleichen Beanspruchungen ausgesetzt wie die KDB. Die Gesamtheit aller Belastungen setzt sich zusammen aus äußeren, d. h. kurz- und langzeitigen mechanischen, thermischen, langzeitigen chemischen und inneren Belastungen, das sind Eigenspannungen 1. Art (Abkühl-eigenspannungen) und 2. Art (strukturbedingte Eigenspannungen) sowie durch den Wulstkerb bedingte Spannungskonzentrationen.

Im Mittelpunkt des Interesses steht das mechanische Verhalten, weil die Schweißnaht einer KDB ihre vorrangige Aufgabe, dicht zu sein, nur dann erfüllt, wenn sie die auftretenden kurz- und langzeitigen mechanischen Belastungen erträgt. Thermische und chemische Belastungen sind indessen weniger kritisch, können aber als synergetisch wirkende Beanspruchungskomponenten bei Zeitstanduntersuchungen berücksichtigt werden.

### Verhalten bei mechanischen Kurzzeitprüfungen

Nach Knausenberger (1983) verstrecken und versagen Heizelement-Stumpfschweißnähte im einfachen Zugversuch außerhalb der Fügezone, weil einerseits durch Gefügeveränderung und Wulst der Nahtbereich lokal versteift ist, zum anderen die kurzen Prüfzeiten für eine Aktivierung verfahrensbedingter Fehlstellen in der Fügeebene und deren Anwachsen bis zum Spröbruch nicht ausreichen. Deshalb ergeben z. B. alle Schweißnahtprüfungen nach DVS 2203 undifferenzierte Naht-eigenschaften. Erst durch gezielte Spannungserhöhung im Nahtbereich kommt es zum Bruch in der Fügeebene und zur Differenzierung der Nahtgüte. Dies gelang im Zugversuch mit lochgekerbten Nahtproben, insbesondere

mit solchen von Egen (1988) durch geometrische Optimierung sprödbrechende Probekörper an Hand der Bruchspannung, der Reißdehnung und der Bewertung des Bruchspiegels. Auch durch den modifizierten technologischen Biegeversuch nach DVS 2203 bei -15 bis -40 °C wurden brauchbare Ergebnisse erhalten.

Aus mehreren Gründen sind die genannten Prüfmethoden zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Bahnschweißnähten ungeeignet. Durch die Überlappung liegt die Fügeebene in Bahnebene. Sowohl die Zugbeanspruchung senkrecht zur Fügeebene als auch die Lochkerbung in der Fügeebene sind nicht praktikabel. Zudem unterliegt der Nahtbereich einer Überlappung einer wesentlich höheren Versteifung und Kerbwirkung im Randbereich. Die angewendeten normgerechten Zugprüfungen im Schäl- und Scherversuch lassen nur gute von schlechten Nahtgütern unterscheiden. Im ersten Fall, d. h. bei guten Nähten, verstreckt das Grundmaterial am thermisch beeinflussten Nahtrand, wobei Werte bis zur Streckspannung des Grundmaterials erreicht werden können. Peggs (1987) hat solche im Schälversuch gemessenen Bruchspannungen mit der Streckspannung in Beziehung gesetzt und ähnlich dem FTB-Wert (Film-Tear-Bond nach NSF 54) zur Bewertung der Schweißnahtqualität verwendet. Hessel (1987) definiert als Maß für die Bindefestigkeit in der Fügeebene die Wertigkeit  $W$  aus der gefundenen Schälarbeit  $F_{Sch}$ , dem Schälweg  $l_{Sch}$  und der theoretisch erreichbaren Schälarbeit aus Streckkraft des PE-HD  $F_s$  und Überlappung  $l_u$  zu

$$W = \frac{F_{Sch} \cdot l_{Sch}}{F_s \cdot l_u}$$

Voraussetzung ist jedoch, daß die Schweißprobe schält, d. h. die Bewertung ist auf "schlechte" Nähte beschränkt.

Allgemein wird zwar der Schälversuch als mögliche Methode zur Nahtgütebestimmung auch an "guten" Nähten favorisiert (Rollin, 1990; Hessel, 1987). Dennoch muß unterstrichen werden, daß das mechanische Verhalten von Bahnschweißnähten derzeit durch keine Kurzzeitprüfmethode differenziert wiedergegeben wird.

### Langzeitverhalten, Lebensdauervorhersage

Die Möglichkeiten zur schnellen Ermittlung des Langzeitverhaltens von Schweißnähten (Knausenberger, 1983) konnten bislang den Zeitstandversuch nicht ersetzen (Bielefeld, 1991), wie er z. B. gemäß DVS 2203, Teil 4 mit Hebelapparaturen oder mit Rollenprüfständen durchgeführt wird. Auch zerstörungsfreie Prüfungen (Knipschild, 1985) sind nach Hessel (1987) nicht geeignet, Aussagen über das Langzeitverhalten von Schweißnähten zu machen.

Als maßgebende quantitative Größe wurde der Langzeitschweißfaktor  $f_s$ , wie seit 15 Jahren im Kunststoffbehälterbau, angesehen. Er ist das Verhältnis

der Zugspannungen von Schweißnaht und Grundmaterial bei gleicher Standzeit. Hessel (1987) fand Werte an Deponiebahnschweißnähten im weiten Bereich von 0,3-0,8. Um diese Zahlenwerte zur Einschätzung der Nahtqualität verwenden zu können, muß man die erforderlichen Langzeitschweißfaktoren kennen. Koch (1988) und Hessel (1988) ermittelten solche Faktoren aus Rohrzeitstanduntersuchungen, indem sie der gefundenen Zeitstandfestigkeit einen Spannungsverlauf zuordneten, der sich aus der Spannungsrelaxation einer Deponiebahn unter zweiachsiger Dehnung und einem angenommenen Zeitsetzungsverlauf ergibt. Sie geben erforderliche Langzeitschweißfaktoren für Wasser, netzmittelhaltiges Wasser und Kohlenwasserstoff-Standardmischung an, die je nach Sicherheitsfaktor  $S$  von 1; 1,5 und 2.0 im Bereich von 0,1 und 0,85 liegen, aber für den realen Beanspruchungsfall in der Deponie über 100 Jahre nicht über 0,6 hinausgehen.

Der Langzeitschweißfaktor  $f_s$  muß nach John (1988) größer als das Verhältnis von auftretender zu ertragbarer Belastung einer Schweißnaht sein. Die multiplikative Verknüpfung der einzelnen Faktoren nach DVS 2205/1 (1974) ergibt dann

$$f_s > \frac{\sigma_{RW} \cdot f_{CM} \cdot \alpha \cdot \beta}{K \cdot f_{CR\sigma}}$$

- $\sigma_{RW}$  – Relaxationsspannung bei Wassereinwirkung
- $f_{CM}$  – Chemikalien-Relaxationsfaktor
- $\alpha$  – dehnungsgeschwindigkeitsabhängige Spannungsüberhöhung
- $\beta$  – Umrechnungsfaktor auf mehrachsige Spannung
- $K$  – Festigkeitskennwert des Grundmaterials aus der nach ISO/DP 9080.2 auf Betriebstemperatur (20 °C) extrapolierten Rohrzeitstandkurve
- $f_{CR\sigma}$  – spannungsbezogener Chemikalien-Resistenzfaktor nach DIN 19 889 oder ISO/DIS 8584

Auch unter Zeitstandzugbeanspruchung sind die in der Fügeebene einer KDB auftretenden Schubspannungen so klein, daß schon bei Schweißnähten mäßiger Qualität der Zeitstandbruch nicht in der Naht, sondern immer neben der Naht eintritt, d. h. entscheidend für die Qualität der Schweißnaht ist die Zeitstandfestigkeit des Grundmaterials und die Spannungsüberhöhung durch Kerbwirkung an den Querschnittübergängen. Aus diesem Grunde ist die Verwendung des Langzeitschweißfaktors als Kennwert für die Nahtgüte nicht unumstritten (Hutten, 1991; Bielefeld, 1991).

Zeitstandbrüche in der Naht von KDB sind bisher nur im Zeitstandschälversuch beobachtet worden. Obwohl die Beanspruchungsart wenig praxisgerecht ist, ist diese



Prüfmethode, Untersuchungen von Bielefeld (1991) zufolge, für eine differenzierende Gütebestimmung geeignet, wenn sich Zusammenhänge mit den Schweißparametern eindeutig nachweisen lassen.

Zur Vorhersage der Lebensdauer von Deponiebahnen unter Betriebsbedingungen greift man allgemein auf die für Kunststoffrohre vorgeschlagene ISO/DP 9080.2 zurück, in der die international anerkannten Verfahren zur Extrapolation beschrieben sind. Danach muß das Zeitstandverhalten bei zwei höheren Temperaturen (z. B. 60 und 80 °C) und der Betriebstemperatur (z. B. 20 °C) über mindestens zwei Jahre für das Bezugsmedium Wasser vorliegen. Der Festigkeitskennwert  $K$  wird dann aus der extrapolierten Zeitstandkurve bei Betriebstemperatur abgelesen.

Henkhaus (1992) hat die Gültigkeit der Zeit-Temperatur-Verschiebung (Arrhenius-Beziehung), mit der die kürzeren Standzeiten von Bahnschweißnähten bei höheren Prüftemperaturen auf solche bei Betriebstemperatur extrapoliert werden, für größere Dehnungen, d. h. für den nichtlinearen visko-elastischen Bereich überprüft. Bei geringer werdender Temperatur verschieben sich die Zeitstandfestigkeitskurven sowohl zu höheren Zeiten (horizontal) als auch zu höheren Spannungen (vertikal). Eine zweiachsige Verschiebung, d. h. auch in der Spannungsachse, hat bei den Zeitstandfestigkeiten deshalb zu erfolgen, weil eine bestimmte Spannung unter verschiedenen Temperaturen nicht zu einer gleichen Anrißdehnung führt. Sie kann allerdings entfallen, wenn Anrißbildungen bei jeweils gleichen äußeren Verformungen miteinander verglichen werden. Die Größe der Zeitverschiebungsfaktoren hängt von der Werkstoffstruktur und dem Querschnittsprung im Schweißnahtübergangsbereich ab. Sie konnten in guter Näherung mit der Arrhenius-Beziehung beschrieben werden. Die Spannungsverschiebungsfaktoren für niedrigere Temperaturen konnten hingegen nur abgeschätzt werden.

### **Bruchverhalten, Versagenskriterien**

Als vorherrschendes Versagenskriterium bei der Untersuchung des Kurzzeit- und Langzeitverhaltens von Überlappschweißnähten hat sich immer wieder die durch die Werkstoffstruktur und Kerbwirkung verursachte Spannungsüberhöhung am Querschnittsübergang erwiesen. Die dabei beobachteten Effekte sind z. T. erheblich. So erhöht das nachträgliche Entfernen eines randgängigen Schweißwulstes am äußersten Bahnenrand z. B. die Standzeit der so geschäfteten Nähte auf das 10fache (John, 1988). Die Kerbwirkung wird zusätzlich durch innere Spannungen, z. B. Gefügespannungen, dilatante Abkühlspannungen erhöht und durch die Geometrie des Wulstes und seiner Einbindung in die Überlappung in ganz unbestimmter Weise beeinflusst. So wirken sich nach Henkhaus (1991) weniger der Kerbradius selbst, sondern Poren und Inhomogenitäten des Werkstoffgefüges im Kerbgrund besonders qualitäts-

schädigend aus. Da die Fehlstellen als Orte des bevorzugten Rißstarts besonders dann entstehen, wenn thermisch geschädigtes Schmelzmaterial auf bereits in Abkühlung befindliche Nahtrandbereiche trifft, wird empfohlen, durch schweißtechnische Maßnahmen ein Verschmelzen des austretenden Wulstes mit der Überlappung zu verhindern und dadurch den Wulst bei Beanspruchung kräftefrei zu halten.

Das allgemein zu beobachtende Bruchverhalten bei langsamer Dehnung ist aufgrund der partiellkristallinen Struktur des Grundmaterials und der thermischen und rheologischen Vorgeschichte der Schweißnaht und ihrer Randbereiche nicht einheitlich. Makroskopisch spröde gebrochen, sind an entsprechenden Proben mit mikroskopischen Methoden deutliche Unterschiede in der Bruchflächenmorphologie zu beobachten. Die Rißbildung geht allgemein von einem sogenannten "craze" als einem lokal durch Fibrillen und Fehlstellen gekennzeichneten hochorientierten Werkstoffzustand aus. Nach Untersuchungen von Halse (1990) an Schweißnähten von Deponiedichtungsbahnen liegen spröde bis duktile Anrißbildungen vor, je nachdem, wie hoch die angelegte Spannung ist. Mit zunehmender Spannung von 35–50 % der Streckspannung hinterläßt der Bruch verschiedene Oberflächenstrukturen. Rasterelektronenmikroskopisch werden im Bruchverlauf kurz- und langfaserige, flockige, federförmige und lamellare Strukturen gefunden. Henkhaus (1991) interpretiert den makroskopisch spröden Bruch mit der Anhäufung von Mikrovoids im sphärolitischen Gefüge, die das Rißwachstum beschleunigen. Infolgedessen können keine Gleitprozesse mehr wirksam werden und ganze Lamellenpakete werden aus ihrer Verankerung gerissen. Die oben schon erwähnten Übergänge vom mikroskopisch spröden zum mikroskopisch zähen Bruch werden als Folge der wachsenden Rißausbreitungsgeschwindigkeit mit abnehmendem Probenquerschnitt erklärt.

## **2.4 Offene Fragen, Wissenslücken**

- Ist durch eine Prüfmethode die Zerstörung von "guten" Bahnschweißnähten möglich und läßt sich das Verformungs- oder Bruchverhalten für eine differenzierte Nahtgütebeurteilung verwenden?
- In welchem Zusammenhang stehen die geometrischen, strukturellen und bruchmechanischen Eigenschaften von Bahnschweißnähten mit den Schweißbedingungen?
- Gibt es eine baustellengeeignete Prüfmethode zur differenzierten Qualitätsbeurteilung "guter" Schweißnähte?
- Ist eine standzeitverlängernde Gestaltung des Wulst- und Übergangsbereichs der Schweißnaht durch schweißmaschinentechnische Entwicklungen möglich?
- Ist der Langzeitschweißfaktor für Bahnschweißnähte ein Qualitätskennwert?

- Welche Schweißparameter sind als Regelgröße für Selbststeuerungsmechanismen einer Heizkeilmaschine vorteilhaft im Hinblick auf die Qualitätssicherung?
- Wie wirken sich reale Deponiebedingungen auf die strukturellen und mechanischen Eigenschaften von Schweißnähten aus?

### 3 Literatur

BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin) (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen und Altlasten.

Bielefeld, K.; Glück, L.; Klingenuß, H. (1991): Beurteilung des Langzeitverhaltens der Fügenähte von Kunststoffdichtungsbahnen zur Basis- und Oberflächenabdichtung in Deponien. Abschlußbericht des BMFT-Forschungsvorhabens Förderkennzeichen 14704668 (Süddeutsches Kunststoffzentrum SKZ FV 187).

Cadwallader, M. W.; Barker, P. W. (1986): Quality Control of Flexible Membrane Liners for Waste Disposal Facilities. *Geotextiles and Geomembranes* 3, S. 309-335.

DVS-Richtlinie 2203: Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik e.V.

Teil 1	"Prüfverfahren, Anforderungen..." (1986)	
Teil 2	Zugversuch	(1985)
Teil 3	Schlagzugversuch	(1985)
Teil 4	Zeitstandzugversuch	(1986)
Teil 5	Technologischer Biegeversuch	(1985)
	Schälversuch	(im Entwurf)

DVS-Richtlinie 2212, Teil 3: Prüfen von Kunststoffschweißern, Prüfgruppe III; Bahnen im Erd- und Wasserbau (Oktober 1991).

DVS-Richtlinie 2225: Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik e.V.

Teil 1	Schweißen, Kleben, Vulkanisieren (1991)	
Teil 2	Baustellenprüfungen, Entwurf	(1991)
Teil 3	Anforderungen an Schweißmaschinen und Geräte, Entwurf	(1992)

Egen, U. (1985): Gefügestruktur in Heizelementschweißnähten an Polypropylenrohren. *Schweißtechnische Forschungsberichte*. Band 4. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH.

Egen, U.; Ehrenstein, G. W. (1986): Gefügeuntersuchungen von Heizelementschweißnähten. *Plastverarbeiter* 37, Nr. 11, S. 61-68.

Egen, U.; Ehrenstein, G. W. (1988): Kurzzeitprüfmethoden zum schnellen Beurteilen der Güte von Heizelement-Stumpfschweißnähten. *Schweißen und Schneiden* 40, Nr. 11, S. 560-564.

EPA (1991): Technical Guidance Document: Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Field Seams. R.E. Landreth, D.A. Carson (Ed.), US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio 45268.

Gehde, M. (1992): Schweißverbindungen an Deponiedichtungsbahnen – Prüfungen und Versagensverhalten. In: 8. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 59-88.

Halse, Y. H.; Körner, R. M.; Lord, A. E. (1990): Stress Cracking Morphology of Polyethylene (PE) Geomembrane Seams. In: *Geosynthetics: Mikrostrukture and Performance*, ASTM, STP 1076, S. 78-89.

Henkhaus, R. (1991): Langzeitverhalten von Schweißverbindungen an Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 7577, Dechema, Frankfurt/M.

Hensen, F.; Knappe, W.; Potente, H. (Hrsg.; 1986): *Handbuch der Kunststoffextrusionstechnik*, I: Grundlagen, II: Extrusionsanlagen. München, Wien: Carl Hanser.

Hessel, J.; John, P. (1987): Langzeitfestigkeit von Schweißverbindungen an Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen. *Z. Werkstofftechnik* 18, S. 228-231.

Hessel, J.; Koch, R.; Gaube, E.; Gondro, C.; Heil, H. (1988): Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen. *Kunststoffe* 78, S. 155-160.

Horn, V. (1987): Parameterabhängige Gefüge, Festigkeit und Zähigkeit von heizelementgeschweißtem Polypropylen. *Schweißtechnik*, Berlin, 37, Nr. 10, S. 450-451.

Hutten, A. (1991): Anwendungsspezifische Eigenschaften von PE-HD-Dichtungsbahnen unter besonderer Berücksichtigung des Relaxationsverhaltens. In: 7. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 99-119.

John, P. (1984): Schweißen im Behälter- und Apparatebau. *Z. Werkstofftechnik* 15, S. 149-153.

- John, P.; Koch, R. (1988): Langzeitfestigkeit von Schweißverbindungen an Dichtungsbahnen aus PE-HD. DVS-Berichte, Bd. 111, Deutscher Verband für Schweißtechnik GmbH, Düsseldorf.
- Koch, R.; Gaube, E.; Hessel, J.; Gondro, C.; Heil, H. (1988): Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen. Müll und Abfall 8.
- Kopp, B.; Krause, R. (1991): Qualitätssicherung beim Schweißen auf der Basis der DVS-Richtlinie 2225. In: 7. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 85-97.
- Knausenberger, R.; Menges, G.; Schmachtenberg, E. (1983): Ein schneller Weg zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von Schweißnähten. DVS-Berichte Bd. 84. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik GmbH.
- Knipschild, F. W. (1985) (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beiheft zu Müll und Abfall. Heft 22. Berlin: Erich Schmidt.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; 1990): Merkblatt M3 – Die geordnete Ablagerung von Abfällen. Deponiemerkblatt, Neufassung des gleichnamigen LAGA-Merkblattes von 1979, Entwurf, Stand Februar 1990.
- Landesamt für Wasser und Abfall NRW, Düsseldorf (1985): Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen.
- Menges, G. (1979): Einführung in die Kunststoffverarbeitung. München, Wien: Carl Hanser.
- Müller, W.; Müller, U.; Preuschmann, R.; Tatzky-Gerth, R. (1992): Zulassung von Kunststoff-Komponenten für Deponieabdichtungssysteme – Dichtungsbahnen und Schutzsysteme. In: 8. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 31-44.
- Niedersächsischer Minister für Umwelt (1988): Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle. RdErl. vom 24.6.88 - 207 - 62812/21.
- Peggs, I. D. (1987): Evaluating Polyethylene Geomembrane Seams. Proceedings, Geosynthetics '87, Conference New Orleans, La., Febr. 1987, S. 505-518.
- Peggs, I. D.; Carlson, D. S. (1990): Brittle Fracture in Polyethylene Geomembrane. Geosynthetics: Microstructure and Performance, ASTM, STP 1076.
- Potente, H. (1977): Zur Theorie des Heizelementstumpfschweißens. Kunststoffe 67, S. 98-102
- Salomo, K.-P.; Krause, R. E. (1989): Das Verhalten profilierter Kunststoffdichtungsbahnen in geomechanischer, chemischer und physikalischer Hinsicht. Müll und Abfall 8, S. 405-415.
- Schicketanz, R. (1992): Wirkungsweise der Kombinationsdichtung und Anforderungen an die mineralische Oberfläche. Müll und Abfall 5, S. 287-295.
- Schicketanz, R.; Lotze, E. (1992): Prüfumfang bei der Qualitätssicherung von Kunststoffdichtungsbahnen in Kombinationsdichtungen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten, Grundkursus. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH.
- TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.



# F Erdstoffabdichtungen und andere mineralische Abdichtungen (U. Holzlöhner)

1	Begriffsbestimmung	59
2	Haupteigenschaften von Erdstoffabdichtungen, Übersicht	59
3	Arten von Erdstoffabdichtungen	60
4	Anforderungen an Erdstoffabdichtungen	60
5	Literatur	60

## 1 Begriffsbestimmung

Mineralische Abdichtungen bestehen aus mineralischen Stoffen. Diese können Erdstoffe sein oder auch Glasplatten oder -ziegel, Metallbahnen oder Stahlspundwände. Vielfach wird der allgemeine Ausdruck "mineralische Abdichtung" gebraucht, wenn "Erdstoffabdichtungen" gemeint sind. Da heute Erdstoffabdichtungen von allen mineralischen Abdichtungen weitaus am häufigsten eingesetzt werden, ist die Verwendung der beiden Ausdrücke als Synonyme verständlich.

Mit "mineralisch" wird der Gegensatz zu den "organischen" Kunststoffdichtungsbahnen betont. Abgesehen davon, daß Erdstoffdichtungen auch organische Beimengen enthalten können, sind sie in viel stärkerem Maße von folgenden Eigenschaften charakterisiert: Erdstoffe bestehen aus einzelnen Partikeln – oder "Kör-

nern" –, die keinen oder nur einen geringen kohäsiven Zusammenhalt besitzen. Die Bindungsenergien liegen weit unterhalb von denen bei physikalischer Sorption oder bei chemischen Bindungsarten. Wasser ist ein wichtiger Bestandteil des Dichtungsmaterials. Es beeinflusst sowohl die Flexibilität der Abdichtungsschicht als auch deren Dichtigkeit. Bei Erreichen der Festigkeitsgrenze treten nicht unbedingt auch klaffende Risse und damit stark ansteigende Durchlässigkeit auf. Die Erdstoffe sind Naturprodukte und sind daher gewissen Streuungen unterworfen.

Im englischen Sprachgebrauch wird folgerichtig die wörtliche Entsprechung von "mineralischer" Abdichtung selten verwendet. Man spricht hier meistens von clay liner, soil liner und earthen liner.

## 2 Haupteigenschaften von Erdstoffabdichtungen, Übersicht

### – Dichtigkeit, Schadstofftransport

Erdstoffe sind nicht absolut dicht. Die Dichtigkeit wird durch einen Durchlässigkeitsbeiwert charakterisiert. Das Wasser bewegt sich in Porenkanälen, deren Querschnitte durch geeignete Zusammensetzung, Kornverteilung und Herstellung möglichst klein sein sollen, siehe Kapitel J und L. Außer der Advektion ist auch die Diffusion im Porenwasser ein wichtiger Transport-Mechanismus für Schadstoffe, siehe Kapitel I.

### – Wassergehalt

Wasser ist ein wichtiger Bestandteil des Erdstoffs. Wasser erhöht die Flexibilität und vermindert damit die Rißanfälligkeit, siehe Kapitel G und H.

### – Flexibilität, Festigkeit

Wegen des geringen kohäsiven Zusammenhalts erreichen die Spannungen bei Belastung schnell die Bruch-

bedingung. Bei Scherversagen kann der Erdstoff große Deformationen ausführen, ohne daß seine Dichtigkeit wesentlich abnimmt, siehe Kapitel G. Zur Festigkeit und Standsicherheit siehe Kapitel G und M.

### – Einfluß vom strömenden Wasser

Wegen des geringen kohäsiven Zusammenhalts kann es infolge von strömendem Wasser zur Veränderung des Kornaufbaus infolge Erosion und Suffusion kommen.

### – Herstellung

Bei Erdstoffen als Naturprodukten ist die Qualitätskontrolle schwieriger als bei Industrieprodukten. Erdstoffe müssen aufbereitet und homogenisiert werden. Zur Vermeidung durchgehender Makroporen wird die Pseudokorngröße beim Einbau beschränkt. Der Einbau muß unter kontrollierten Bedingungen erfolgen, um Mindestanforderungen der Eigenschaften der Abdichtungsschicht zu erreichen, siehe Kapitel L.

#### – Chemische Einflüsse

Ton, als wesentlicher Bestandteil der Erdstoffabdichtungen, ist gegen die chemischen Einwirkungen, die vom abgelagerten Müll ausgehen, nicht resistent. Die Tonminerale können sich jedoch bis zu einem gewissen Grad den unterschiedlichen Milieus anpassen, wobei die Dichtigkeit weitgehend erhalten bleibt und Schadstoffe sorptiv gebunden werden können, siehe Kapitel I und K.

#### – Umweltbedingungen

Als natürliche Materialien sind Erdstoffe auf "natürliche" Umweltbedingungen angewiesen, um funktionsfähig zu

bleiben. Zum Beispiel dürfen Temperaturen, Abdeckung und Grundwasserabstand nicht so ungünstig sein, daß Austrocknung oder Frostschäden der Abdichtungsschicht zu erwarten sind, siehe Kapitel H und K.

#### – Langzeitverhalten

Unter nicht allzu extremen Umweltbedingungen unterliegen Erdstoffe, speziell Tone, Prozessen, die ungünstigenfalls als beschleunigte Verwitterung anzusehen sind. Der Erdstoff bleibt jedoch ein Erdstoff. Deshalb stellt man allgemein die Dauerhaftigkeit von Erdstoffabdichtungen nicht in Frage, siehe Kapitel K.

### 3 Arten von Erdstoffabdichtungen

Die Regelabdichtung nach TA Abfall und TA Siedlungsabfall ist eine Kombinationsdichtung. Die mineralische Dichtungsschicht in den Deponieabdichtungssystemen ist im Anhang E der TA Abfall näher definiert. Hiernach soll der Anteil an Feinstkorn  $< 2 \mu\text{m}$  mindestens 20 Gew.-% und der Anteil an Tonmineralien unter Hinweis auf das Adsorptionsvermögen mindestens 10 Gew.-% betragen. In der Praxis werden jedoch zunehmend auch kornabgestufte Böden mit einem sehr geringen Tonanteil eingesetzt. Hierbei und bei anderen Mischungen wird eine möglichst hohe Trockendichte angestrebt, um die Volumenänderung und Rißanfälligkeit infolge Wasserverlusts zu minimieren, siehe Kapitel K.

Erdabdichtungsstoffe können aus Tongruben stammen oder Abraum- und Bergematerial sein. Heute besteht die Tendenz, auch Recyclingmaterial einzusetzen. Als Zusätze werden Wasserglas, Zement oder Bitumen verwendet, siehe Kapitel K. Voraussetzung für die Herstellung einer guten Erdstoffabdichtung ist eine geeignete Bauverfahrenstechnik, siehe Kapitel L.

Dichtwandmassen sind ebenfalls Erdstoffabdichtungen. Auch hierbei kommt es darauf an, eine möglichst hohe Trockendichte zu erzielen, um bei Wasserabgabe das Schrumpfen zu minimieren, siehe Kapitel N.

### 4 Anforderungen an Erdstoffabdichtungen

In der TA Abfall, Anhang E, sind Anforderungen hinsichtlich Material- und Einbauparametern, Eignungsprüfungen, Qualitätssicherung und Abnahme detailliert vorgeschrieben. Die Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten (EA-GDA

1990)" behandeln unter E3 geotechnische Eignungsprüfungen. Diese Empfehlungen betreffen die Art und Zusammensetzung der Abdichtungserdstoffe, die Einbaukriterien und die Eigenschaften des Abdichtungserdstoffes im Gebrauchsfall.

### 5 Literatur

EA-GDA (1990): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA. DGE (Hrsg.): Berlin: Ernst & Sohn.

TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemein-

deverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.

TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.

# G Mechanische Beanspruchung von Erdstoff-Abdichtungsschichten, Setzungsschäden (U. Holzlöhner)

1	Einführung	61
2	Die Beanspruchung des Erdstoffes in der Dichtung	62
3	Mechanisches Verhalten von Erdstoffen	62
3.1	Wichtige Grundtatsachen	62
3.2	Mehrachsiges Untersuchung von Bodenproben	63
3.3	Verformung von Abdichtungsschichten in Zentrifugenversuchen	63
3.4	Einfluß von Spannungszustand und Belastungsgeschwindigkeit	64
3.5	Theoretische Ansätze	64
3.6	Einfluß der Kornverteilung	64
4	Einfluß von Wassergehalt, Tongehalt und Einbauparametern	64
5	Langzeitverhalten, Selbstheilung	65
6	Berechnung von Erdbauwerken und Dichtungsschichten	66
7	Bewehrung	66
8	Offene Fragen, Wissenslücken	67
9	Literatur	67

## 1 Einführung

Die Deponie ist ein Bauwerk. Ein Bauwerk hat Bauteile, die bemessen werden. Die wichtigsten Bauteile der Deponie sind die Abdichtungsschichten.

Bei "Bemessen" im Sinne der Statik denkt man zunächst an den Vergleich von vorhandenen mit zulässigen Spannungen. Für die Bemessung der Abdichtungsschichten gibt es in der Baustatik kaum analoge Aufgaben. Eine gewisse Analogie besteht zur Berechnung von Erddämmen mit Tondichtung.

Bei den Abdichtungsschichten treten folgende Probleme auf:

- Beanspruchung der Dichtungsschichten auf der Böschung, Abrutschen
- Anschlüsse Dichtungsschicht – starre Einbauten
- Spreizspannungen bei Teilfüllung
- Beanspruchungen infolge von Untergrundsetzungen bzw. bei Zwischen- und Oberflächenabdichtungen, Setzungen des abgedeckten Mülls.

Es genügt offenbar nicht, nachzuweisen, daß spektakuläre Brüche vermieden werden. Das Besondere besteht darin, daß nachgewiesen wird, daß die auftretenden

Dehnungen nicht zu übermäßigen Durchlässigkeits-erhöhungen führen. Man muß also feststellen, ob Auflockerungszonen infolge von Schervorgängen oder Risse auftreten, wie groß diese sind und unter welchen Umständen sie sich ggf. wieder schließen. Hinzukommen bzw. mitzubetrachten sind andere Einflüsse, die Makroporen und Risse hervorrufen können, wie Austrocknung und Schadstoffeinwirkung.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Erdstoffen wird seit Jahrzehnten untersucht. Trotzdem existieren bis heute nur wenige Arbeiten, die für die hier vorliegende Problematik anwendbar sind. Das liegt daran, daß die Untersuchungen fast ausschließlich in Hinblick auf zwei Anwendungen durchgeführt wurden: Setzungsberechnungen von Bauwerken und Standsicherheit von Böschungen und Bauwerken.

Bei der Setzungsberechnung interessiert nur die vertikale Zusammendrückung der unter dem Bauwerk befindlichen Schichten. Bei der Standsicherheit wird nur die Grenzfestigkeit des Erdstoffes ermittelt. In Einzelfällen werden auch einmal Verformungen abgeschätzt; jedoch interessiert in der Regel nicht, inwieweit die Verzerrungen im Erdstoff stetig verteilt sind, bzw. ob Risse auftreten.

Es gibt jedoch ein Teilgebiet der Geotechnik, nämlich den Staudambau, in dem ähnliche Probleme wie bei Deponieabdichtungen gemeistert werden müssen. Breth (1972) betont, daß nicht nur die statische Standsicherheit nachzuweisen sei; außerdem müsse die Verformung des Damms im Hinblick auf die Möglichkeit von Rißbildungen ermittelt werden. Diese Forderung ist sinngemäß auf den Deponiebau zu übertragen. Breth (1972) erläutert anhand von Beispielen die Wichtigkeit dieses Verformungsnachweises: So wird von einer "spröden" Kerndichtung aus nichtplastischem, schluffigen Sand berichtet, die auf die Verformung des Damms nur mit

einem Längsriß im Kronenbereich reagieren konnte. Weiterhin mitgeteilte, in Jahrzehnten gesammelte Erfahrungen haben schließlich zu konstruktiven Regeln für die Kerndichtung geführt. Sie soll sich nach unten verdicken und ihr Fuß leicht zur Wasserseite hin verschoben sein. Über die Materialien von Dichtung und Stützkörper werden ebenfalls Empfehlungen angegeben.

Empfehlungen für den Deponiebau werden ständig überarbeitet und ergänzt, EA-GDA (1990). In der Empfehlung E 2-13 (1992) wird ein Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungsschichten vorgeschlagen.

## 2 Die Beanspruchung des Erdstoffs in der Dichtung

Die Abdichtungsschichten werden im starken Maß durch Setzungen des Dichtungsaufagers beansprucht. Die weiträumige Deponieauflast hat Untergrundsetzungen zur Folge; die Basisabdichtung muß die hiermit verbundenen Setzungsunterschiede schadlos überstehen. Böschungfuß und Böschungsbereich sind besonders stark beansprucht.

Für Oberflächen- und Zwischenabdichtungen sind die Sackungen des Deponieinhalts und die Setzungen des Untergrunds von Bedeutung, Collins (1992). Nach Drescher & Meyer (1990) ist mit einem Sackungsmaß von etwa 20 % zu rechnen. Wenn die Schichtdicke des Mülls örtlich stark variiert, sind große Setzungsunterschiede und damit besonders große Beanspruchungen zu erwarten, Wiemer (1988). Collins (1992) und Gertloff (1992) berichten über Verformungsmessungen in Deponien. Jessberger & Kockel (1991) geben für den Abfall Scher- und Kompressionsparameter an, so daß Verformungs- und Standsicherheitsberechnungen möglich werden.

Für Dichtungsschichten in Deponien typisch sind große, nahezu waagrecht verlegte Flächen mit – im Verhältnis

zu den Grundrißabmessungen – geringer Dicke. Das Auflager dieser Dichtungsschicht gibt mehr oder weniger gleichmäßig nach. Hierdurch wird die Dichtungsschicht in Teilflächen Zerrungen oder Pressungen oder auch Biegungen unterworfen. Zerrungen oder Pressungen bedeuten für das betrachtete Abdichtungselement die Einprägung einer stetig verteilten Dehnung. Bei Ton ist die Strukturlänge (Dicke der Schichtminerale) klein gegen die Schichtdicke der Abdichtung. Deshalb genügt es, auch bei Biegebeanspruchung Bodenproben unter homogener Dehnung zu untersuchen, Dietrich und Arslan (1991). Bei Abdichtungsstoffen mit größerem Korn wäre die Korngröße die Strukturlänge. Dann müssen größere Bodenproben betrachtet werden, deren Beanspruchung bei Biegung der Dichtungsschicht nicht mehr ganz homogen ist. Das ist ein Grund, größere Probenkörper wie Balken und Platten aus Dichtungsmaterial zu verwenden; ein anderer ist, in Hinblick auf Oberflächenabdichtungen mit geringer Auflast, die Entstehung von Rissen in Abhängigkeit vom Krümmungsradius zu untersuchen, Henne (1989), Belouschek & Kügler (1990).

## 3 Mechanisches Verhalten von Erdstoffen

### 3.1 Wichtige Grundtatsachen

Dietrich & Arslan (1991) stellen einige Grundtatsachen des mechanischen Verhaltens von Erdstoffen in Hinblick auf die Deponieproblematik zusammen. Erdstoff ist ein Material, das keine oder nur eine kleine Zugfestigkeit hat. In trockenem oder geflutetem Sand können deshalb keine klaffenden Risse auftreten. Ton kann dagegen als Folge von Zugspannungen reißen. Allgemein gilt: Erreichen die Spannungen die Festigkeitsgrenzen, dann tritt entweder Zug- oder Schubversagen auf. Bei Schubversagen kann sich der Erdstoff unbegrenzt verformen. Die Verzerrungen können stetig verteilt oder in Scherzonen lokalisiert auftreten. Bei Zugversagen treten Risse auf, über die hinweg keine Spannungen übertragen werden. In Bodenschichten bewirkt oft die Auflast einen

Spannungszustand, der rissefreie Verformung ermöglicht (Überdrückung von Rissen).

Beim Abdichtungsproblem werden Verformungen danach beurteilt, in welchem Ausmaß sie die Dichtigkeit beeinträchtigen. Die Beeinträchtigung steigt in der Reihenfolge: stetig verteilte Verzerrung, begrenzte Scherzonen oder Scherfugen und schließlich klaffende Risse. Im Gegensatz zu Rissen können Scherfugen Druck- und Schubspannungen übertragen. Die Scherzonen können mehr oder weniger auffällig sein. So berichtet Barden (1971) vom Auftreten einer Scherzone in einer Kaolinprobe unter ebener Deformation bei 6,5 % Dehnung. Die Scherzone war mit bloßem Auge nicht zu erkennen; sie ergab sich aus der geänderten Orientierung der Partikel. Ob eine derartige Verformung eine Ände-



zung der Durchlässigkeit zur Folge hat, bleibt offen. Bei Dichtungsmaterial mit erheblichem Anteil an Sand und Kies ist dagegen die Bildung einer schmalen Scherzone mit einer deutlichen Auflockerung verbunden, die eine Durchlässigkeitserhöhung zur Folge haben könnte.

Die Aufgabe besteht also darin, die Dehnung festzustellen, bei der die Durchlässigkeit gerade noch nicht bemerkenswert größer ist.

### 3.2 Mehrachsige Untersuchung von Bodenproben

Es existiert eine Vielzahl von Versuchen an Bodenproben. Die weitaus meisten Versuche wurden im Triaxialgerät durchgeführt. Der Zweck dieser Versuche dient in der Regel der Feststellung der Scherfestigkeit. Die hierbei auftretenden Verzerrungen werden aus der Probenverkürzung bzw. -verlängerung unter Annahme der homogenen Verteilung der Verzerrungen ermittelt. Die Frage, ob diese Annahme zutrifft, bleibt gerade offen. Trotzdem müßten die gemessenen Bruchdehnungen einen Hinweis auf die hier interessierenden Grenzdehnungen geben. Für die Bruchdehnung wird in Abhängigkeit von der Bodenart angegeben: Einfach verdichtete Tone und Sand-Ton-Gemische ca. 20 %, bei Überkonsolidierung bis auf 5 % zurückgehend, Schultze & Muhs (1967). Für verschiedene Deponieabdichtungsmaterialien (Ton, Schluff, Auelem) gibt Arslan (1992) Bruchdehnungen von 0,5 % bis 15 % mit dem häufigsten Wert 5 % an.

Die Versuchsgeräte und der Versuchstyp haben einen großen Einfluß auf das Versuchsergebnis, ob eine isolierte Scherfuge oder eine weniger ausgeprägte Scherzone auftritt. Beim üblichen Triaxialgerät behindert die Reibung in den Endflächen die Querdehnung des Materials in den Endbereichen der Probe. Nach Head (1986) hat sich als einzige Methode zur Verminderung dieser Endflächenreibung die Verwendung von geschmierten Gummimembranen bewährt. Mit dieser Technik kann die Bodenprobe auch größere Verzerrungen ausführen, ohne daß sich eine auffällige Scherfläche ausbildet.

Auch die Schlankheit der üblichen Triaxialprobe und die seitliche Stützung durch Luft- oder Wasserdruck (Spannungsrandbedingung) begünstigen die Ausbildung einer Scherfläche.

Letztgenannter Nachteil ist im Quaderverformungsgerät vermieden, in dem die quaderförmige Bodenprobe mit starren, geschmierten Endflächen in einen Quader veränderter Seitenlängen verformt wird. Nach Arslan et al. (1993) ist die Frage noch ungeklärt, ob schmale Scherzonen nur durch gewisse Randbedingungen hervorgerufen werden, wie z. B. Vardoulakis et al. (1978) annehmen, oder ob auch bei optimalen Randbedingungen

stetig verteilte Verzerrungen nur bis zu einer bestimmten Grenzdehnung möglich sind, ab der sich die Dehnung in schmalen Scherzonen lokalisiert. Dieses halten Dietrich & Arslan (1991) für wahrscheinlich.

Die Verzerrungen in Deponieabdichtungen sollten mit einer Versuchstechnik untersucht werden, die das vorzeitige Auftreten von isolierten Scherzonen möglichst verhindert. Dies entspricht der Beanspruchung in der Abdichtungsschicht.

### 3.3 Verformung von Abdichtungsschichten in Zentrifugenversuchen

Scherbeck & Jessberger (1992) untersuchten mineralische Abdichtungsschichten im Maßstab 1:50 in der Zentrifuge. Das Untersuchungsziel war das Verformungsverhalten bei Untergrundsetzungen. Durch eine "trap-door" im Modell konnte Untergrundmaterial abgezogen und somit eine Setzungsmulde simuliert werden. Als Abdichtungsmaterial wurde Kaolin ( $w_L = 44\%$ ,  $w_p = 28\%$ ) oder DIA-Ton ( $w_L = 62\%$ ,  $w_p = 30\%$ ) verwendet.

Ausschlaggebend für die Dichtigkeit ist die Art des Bruchversagens: Ohne Überlagerung ergab sich Scherversagen bei plastischer Konsistenz und Reißversagen bei halbfester Konsistenz. Mit einer Auflast von 100 kPa, der eine Überlagerung von ca. 6 m entspricht, wird auch bei halbfester Konsistenz Scherversagen erreicht.

Während bei Reißversagen die Durchlässigkeit stark zunimmt, nimmt sie bei Scherversagen nur wenig zu. Scherversagen bedeutet deshalb nach Meinung der Autoren keine Schädigung der Abdichtungsschicht.

Aufgrund ihrer Untersuchungen schlagen Scherbeck & Jessberger (1992) Verformungsnachweise vor, die auch als Entwurf der EA-GDA (1992) formuliert wurden. Die maßgebende Setzungsmulde sei mit üblichen bodenmechanischen Berechnungen ermittelt. Dann wird als 1. Schritt überprüft, ob die Grenzdehnung des Materials bei Zug mindestens doppelt so groß ist wie die Randfaserdehnung einer Abdichtungsschicht ohne Auflast. Es würde dann keinerlei Versagen auftreten. Ist das nicht der Fall, so wird im 2. Schritt die Art des Versagens überprüft. Scherversagen tritt auf, wenn die Auflast  $\sigma_0$  die Bedingung

$$\sigma_0 > 2c' \cdot \tan(45 + \varphi'/2) \quad (1)$$

erfüllt, wobei  $c'$  und  $\varphi'$  die "drainierten" Werte für Kohäsion und Reibungswinkel bedeuten. Ist auch diese Auflastbedingung nicht erfüllt, wird geprüft, ob bei der verformungsinduzierten Biegezugspannung im Grenzzustand Scherversagen eintritt.

### 3.4 Einfluß von Spannungszustand und Belastungsgeschwindigkeit

Allgemein wirkt sich eine allseitige Druckspannung günstig auf das Verformungsverhalten von Erdstoffen und Gesteinen aus. Wie bereits Kármán (1911) mit Versuchen an Marmor zeigte, wächst die Neigung zu duktilem Scherversagen mit der wirksamen mittleren Druckspannung (zitiert nach Arslan et al. (1993)). Nach Fecker & Reik (1987) ändert sich das Bruchverhalten von Gestein mit steigender mittlerer Hauptspannung  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$  von spröde zu duktil. Sprödebruch bedeutet ausgeprägte Scherflächen bei einer Bruchdehnung  $< 1 \%$ , bei duktilem Bruch verformt sich die ganze Probe mehr oder weniger bis zu einer Bruchdehnung  $> 10 \%$ .

Einen ähnlichen Einfluß hat die Belastungsgeschwindigkeit. Bei großer Dehnungsgeschwindigkeit ergeben sich größere Festigkeiten und kleinere Bruchdehnungen als bei kleineren Geschwindigkeiten. Das gilt sowohl für Gestein, Fecker & Reik (1987), als auch für Böden, Caquot & Kérisel (1967). Nach Mitchell (1976) zeigen Böden sowohl Kriechen als auch Spannungsrelaxation. Letztere ist für das vorliegende Problem besonders wichtig, weil sie bewirkt, daß eine Spannung infolge einer eingepprägten Dehnung und damit die Gefahr der Ribbildung im Laufe der Zeit abnimmt.

Das ausgeprägte Kriechen von Tonen beschreiben Gudehus & Leinenkugel (1978): "Gesättigte bindige Erdstoffe fließen unter konstanter Last unbegrenzt". Nach Graf (1981) tritt dieses Verhalten dagegen erst auf, wenn die Deviatorspannung einen kritischen Wert überschritten hat. Das würde für das Material eine gewisse Dauerfestigkeit bedeuten.

## 4 Einfluß von Wassergehalt, Tongehalt und Einbauparametern

Der Einfluß des Wassergehalts auf die Verformbarkeit von tonigen Böden ist allgemein bekannt. Sie bildet die Grundlage zur Beschreibung des Zustandes eines Bodens durch seine "Konsistenz". Hierbei spielen zwei Wassergehalte eine wichtige Rolle: die Fließgrenze und die Ausrollgrenze. An der Fließgrenze "fließt" der Boden schon bei geringer Einwirkung. Bei Abnahme des Wassergehalts geht die Konsistenz von "breiig" auf "weich", "steif", "halbfest" und "fest" über. An der Ausrollgrenze ändert sich die Konsistenz von "steif" zu "halbfest".

Allgemein gilt: Bei abnehmendem Wassergehalt steigt sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit, während die Verformbarkeit abnimmt. Nach Youssef et al. (1965) nimmt die undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$  gemäß  $c_u \propto w^{-5,9}$  mit abnehmendem Wassergehalt  $w$ , ausgehend von der Fließgrenze, stark zu. In bodenmechanischen Materialgesetzen für teilgesättigte Böden wird die Wirkung des Wassers durch die Wasser-

### 3.5 Theoretische Ansätze

Die meisten bodenmechanischen Materialgesetze setzen homogene Verzerrungen voraus. Das Schwergewicht der Forschung lag auf der Beschreibung der Bruch- und der Fließbedingung. Es gibt nur wenig Ansätze, die auch inhomogen verteilte Verzerrungen untersuchen. Dietrich (1977) unterscheidet verschiedene Regimes der Verformung. Krawietz (1978) beschreibt die schmale Scherzone bei der Verformung von Bodenproben als Verzweigungsproblem. Allgemein wird das Erreichen des Spitzenwerts der effektiven Spannungen als der Beginn des Bruchs, der eventuell mit der Ausbildung von Scherflächen verbunden ist, angesehen, Barden (1971).

### 3.6 Einfluß der Kornverteilung

Nach Dietrich (1977) lokalisiert sich die Dehnung bei Überschreiten einer bestimmten Grenzdehnung in schmalen Scherzonen. Die Dicke der schmalen Scherzonen beträgt ein Vielfaches des Korndurchmessers. Die bei dieser Verformung auftretenden Makroporen, die die Änderung der Durchlässigkeit bestimmen, dürften ebenfalls zum Korndurchmesser in etwa proportional sein. Nach Dietrich & Arslan (1991) gibt es jedoch keine Arbeiten über den Anstieg der Durchlässigkeit mit wachsender Dehnung.

Außer der repräsentativen Korngröße werden auch andere Faktoren wie die Kornverteilung und die Bodenart eine Rolle spielen. Ein Boden mit einem tragfähigen Korngerüst wird vielleicht besonders empfindlich auf eingepprägte Dehnungen reagieren.

spannung beschrieben, die wie eine Kohäsion wirkt und damit sowohl die Festigkeit als auch die Steifigkeit des Bodens erhöht, siehe hierzu Kapitel H "Feuchtehaushalt". In der Bodendynamik wird für weiche Tone üblicherweise Proportionalität zwischen der undrainierten Scherfestigkeit und dem dynamischen Schubmodul angenommen. Letzterer nimmt für bindige Böden generell mit abnehmendem Wassergehalt zu, Holzlöhner (1988).

Die EAU (1990) gibt für Ton und Lehm für die Konsistenz-Folge weich, steif, halbfest ansteigende Werte für die undrainierte Scherfestigkeit, den Reibungswinkel und den Steifemodul an. Über die Bruchdehnungen wird nichts angegeben.

Reuter (1988a) fand in einer Versuchsserie mit Proben verschiedener Deponieabdichtungserdstoffen, daß die Bruchstauchung in einaxialen Druckversuchen stark mit

dem Wassergehalt zunahm. Er zog daraus den Schluß, daß zur Erzielung einer größeren Flexibilität der Einbauwassergehalt auf der nassen Seite des Proctoroptimums liegen sollte. Auch Henne (1989) stellte in seinen Biegeversuchen fest, daß die Dehnung, bei der Risse auftraten, mit dem Wassergehalt anstieg. Die Konsistenzzahl lag hierbei im Bereich 0,8 bis 1,0. Bei beiden Versuchsreihen ist zu berücksichtigen, daß sie eher den Spannungsbedingungen in Oberflächenabdichtungen entsprechen. Basisabdichtungen sind wegen des großen allseitigen Drucks auch noch bei niedrigeren Wassergehalten flexibel.

In Hinblick auf Deponieabdichtungen ist zu fordern: Das mineralische Material sollte möglichst gut plastisch verformbar sein, wobei es ausreichend fest sein muß. Sehr hohe Wassergehalte in Abdichtungsschichten sind inpraktikabel, weil sie infolge Auflast, Austrocknung und eventueller Schadstoffeinwirkung sehr leicht an Wasser verlieren können.

Der Tongehalt hat ebenfalls einen Einfluß auf die Verformbarkeit. Mit steigendem Tongehalt nimmt der

Reibungswinkel ab, Keedwell (1984), Head (1986). Allerdings wird diese Abnahme erst ab etwa 20 % Tongehalt aufwärts deutlich. Im Staudambau ist die Zugabe von Bentonit ein bewährtes Mittel, um die Verformungseigenschaften des Dichtungsmaterials zu verbessern, Breth (1972). Graf (1981) und Horn (1985) nutzten diese Methode, um die Kerndichtung eines Erd-damms in Kontaktzonen zu Betonbauwerken flexibler zu machen. Dem Ausgangsmaterial (30 % Ton, 45 % Schluff, 25 % Sand) wurde Bentonit zugemischt. Hierdurch nahm der Reibungswinkel von ursprünglich 15° auf Werte zwischen 12,3° (5 % Bentonitzugabe) und 6,5° (30 % Bentonit) ab. Die untersuchten Triaxialproben waren bei 100 % Proctordichte wassergesättigt.

Zum Einfluß der Einbauparameter, insbesondere auf die Durchlässigkeit, sei auf die Kapitel J "Hydraulische Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten" und L "Bauverfahren, Qualitätssicherung" verwiesen. Für die Vermeidung von durchlässigkeitsrelevanten Makroporen und Rissen ist das Erzeugen großer Homogenität von besonderer Bedeutung.

## 5 Langzeitverhalten, Selbstheilung

Für Deponieabdichtungen ist die Langzeitfunktionsfähigkeit von überragender Bedeutung. Dazu müssen die mineralischen Abdichtungsschichten lange Zeiten ohne Risse überstehen. Die Frage, unter welchen Bedingungen dies möglich ist, ist schwierig zu beantworten. Zu diesem Problem gibt es bisher nur Hinweise.

Aufgrabungen von Basisabdichtungen haben bisher noch in keinem Fall Risse ergeben. Allerdings war die Standzeit mit ca. 10 Jahren kurz im Vergleich zu den "geologischen Zeiträumen", die die Deponie überdauern soll. Zur Abschätzung des Langzeitverhaltens sind Beobachtungen von natürlichen Bodenschichten hilfreich. Gesteine und feste Lockergesteine weisen in der Regel Risse auf. Mitchell (1976) gibt folgende mögliche Ursachen für Rißbildung in natürlichen Bodenschichten an: zyklisches Schwellen und Schrumpfen infolge Wassergehaltsänderungen, Entlastung von vorbelasteten Tonen, zahlreiche kleine Scherbrüche während der Konsolidierung, Alterung, Verwitterung und chemische Einflüsse. In Scheffer & Schachtschabel (1984) sind die einzelnen Mechanismen beschrieben, die zu bestimmten Bodengefügen führen, z. B. wird das Plattengefüge – horizontal gelagerte Platten von 1 bis 50 mm Dicke – auf wiederholten schnellen Wechsel der (vertikalen) Belastung zurückgeführt. Wünschenswert wären gezielte Beobachtungen von relativ jungen, normalkonsolidierten, tonigen Schichten. Wichtige Punkte waren hierbei die Auflast und die von der Umgebung angebotene Feuchtigkeit. Modelle für das Verhalten derartiger Schichten sind nicht bekannt.

Wenn längere Zeiträume betrachtet werden, ist die Eigenschaft von Ton von Bedeutung, daß dieser nach einer gewissen Austrocknung auch bei ausreichendem Wasserangebot nur bis zu einem gewissen Grad wieder Wasser aufnimmt und schwillt, Cronney (1977). Etwaige inzwischen eingetretene Risse würden dann nicht mehr vollständig geschlossen werden. Die Langzeitfunktionsfähigkeit setzt also eine gewisse Gleichmäßigkeit der Umweltbedingungen voraus. Infolge zyklischer Wassergehaltsänderungen kommt es ebenso wie infolge zyklischer Laständerungen zu einer gewissen Alterung und Versprödung.

Unter Selbstheilung soll hier die Fähigkeit des Abdichtungsstoffs verstanden werden, einmal aufgetretene Risse im Laufe der Zeit wieder zu schließen. Hierbei kann die Rißentstehung mechanische oder andere Ursachen wie Austrocknung oder Schadstoffeinwirkung haben, siehe hierzu die Kapitel H "Feuchtehaushalt" und K "Chemische und physikalische Einwirkungen". Zu diesem Problem gibt es einige Erfahrungen und Untersuchungen. Am meisten ins Auge fallen die Austrocknungsrisse in eingebauten Abdichtungsschichten, die zu lange der trockenen Atmosphäre ausgesetzt waren. Hier hat man festgestellt, daß man durch Wiederbefeuchtung den alten Zustand nicht wieder herstellen kann; die Dichtungsschicht muß aufgenommen, aufbereitet und wieder eingebaut werden.

Stroh (1986) stellte anhand von durchgeschnittenen und wieder zusammengefügteten Tonproben in Triaxialver-

suchen fest, daß 90 % der ursprünglichen Scherfestigkeit wieder erreicht wurde. Über den Wiederherstellungsgrad der Dichtwirkung wurde nichts gesagt. Außer durch allseitigen Druck kann es auch infolge des Quellvermögens zur Selbstheilung kommen. Reuter (1988a) fand, daß relativ trocken eingebaute Tonproben ihre Durchlässigkeit im Laufe der Durchströmungszeit von  $8,2 \cdot 10^{-8}$  m/s auf  $10^{-10}$  m/s verminderten. Man muß hierbei jedoch berücksichtigen, daß die meisten Schadstoffe die Quellfähigkeit der Tonminerale beeinträchtigen, vgl. Kapitel J "Hydraulische Durchlässigkeit von

mineralischen Abdichtungsschichten". Die chemische Einwirkung kann eventuell auch wieder zur Heilung führen, und zwar infolge Kolmation, indem freigeordnete Feinteile in die Poren des Dichtungsmaterials gespült werden und dadurch die Durchlässigkeit vermindern, Reuter (1988b). Diesen Effekt wollen Belouschek & Kügler (1990) gezielt mit ihrem Vorschlag ausnutzen, unmittelbar oberhalb der Erdstoffschicht von Oberflächenabdichtungen eine dünne Schicht von Fließsand anzuordnen, der in ggf. entstehende Risse eingespült würde.

## 6 Berechnung von Erdbauwerken und Dichtungsschichten

Nach den EA-GDA-Empfehlungen (1990) werden statische Nachweise für die Spreizspannungen bei Teilfüllung, für die Standsicherheit von Böschungen, für die Grundbruchsicherheit am Böschungsfuß und für Anschlüsse der Abdichtungsschicht an starren Einbauten verlangt. Prinzipiell können mit den verschiedenen existierenden Rechenprogrammen (FEM) für die gängigen Aufgaben des Grundbaus die Standsicherheitsaufgaben und die Verformungen in den Abdichtungsschichten berechnet werden. Offen bleibt in jedem Fall, wie die berechneten Dehnungen hinsichtlich der zu gewährleistenden Durchlässigkeit zu bewerten sind.

Von den Grundbaukonstruktionen ist die Kerndichtung in einem Staudamm diejenige, die der Deponieab-

dichtungsschicht am meisten ähnelt. Nach Breth (1972) wird nicht nur die Standsicherheit des Damms nachgewiesen, sondern auch die Verformung im Hinblick auf eventuelle Ribbildung ermittelt. Die hier gesammelten Erkenntnisse sind nicht direkt übertragbar, weil in Deponieabdichtungen andere Spannungszustände und sonstige Beanspruchungen – Untergrundsetzungen, Austrocknung, Schadstoffeinwirkung – herrschen. Auch sind hinsichtlich von Rissen und Makroporen höhere Anforderungen zu stellen als im Staudambau.

Standsicherheitsfragen im Deponiebau werden ausführlich im Kapitel M behandelt.

## 7 Bewehrung

Wegen der hohen Beanspruchungen von mineralischen Abdichtungsschichten insbesondere bei steilen Böschungen und bei großen Setzungsdifferenzen der Dichtungsaufgabe ist die Bewehrung des Dichtungsmaterials eine Möglichkeit der Vergütung, Rodatz (1991).

Das Prinzip der "bewehrten Erde" ist seit den 60er Jahren in der Baupraxis eingeführt. Üblicherweise werden hierzu sehr grobe Zugglieder verwendet. Die Verwendung von Fasern als Bewehrung ist dagegen relativ neu, Rodatz (1991). Shim (1989) untersuchte mit Stahlnadeln und Nylonfäden bewehrten Sand im Triaxialversuch und fand eine erhebliche Erhöhung des Reibungswinkels. Die Beimengung von Fasern zu Sand bewirkte dagegen nach Untersuchungen von Bucher (1987) eine erhöhte Kohäsion bei gleichbleibendem Reibungswinkel. Auch beim Texsol-Verfahren, Leflaive

& Heun (1988) steht die Festigkeitserhöhung von nichtbindigem Material im Vordergrund. Wegen des Fehlens von Erfahrungen über bewehrte Deponieabdichtungsmaterialien untersucht das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Prof. Rodatz, diesen Problembereich im Rahmen des laufenden Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme".

Grundsätzlich scheint die Bewehrung sowohl die Festigkeit als auch die Verformbarkeit des Abdichtungsmaterials zu erhöhen. Es besteht also die Aussicht, daß die Faserbewehrung die Verzerrungen in der Dichtungsschicht besser verteilt und damit die Beeinträchtigung der Durchlässigkeit in vertretbaren Grenzen hält. Hierüber gibt es bisher noch keinerlei Untersuchungen.

## 8 Offene Fragen, Wissenslücken

Es sind eine ganze Reihe von Einflüssen auf durchlässigkeitsrelevante Ribbildung bekannt; man kann jedoch ihre Einwirkungen und ihre Wechselwirkungen noch nicht quantifizieren.

Bei folgenden Einzelproblemen bestehen noch Wissenslücken:

- Untersuchung der Grenzdehnung, von der ab schmale Scherzonen auftreten.
- Bewertung von Verzerrungen im Abdichtungsmaterial in Hinblick auf Durchlässigkeitsänderungen.
- Einflüsse der Parameter Bodenart, Korngröße, Kornverteilung, Wassergehalt, Konsistenz, Spannungszustand.
- Erfassung der Beanspruchung von Dichtungsschichten im Hinblick auf mechanische Schädigungen,

die zu größerer Durchlässigkeit führen können.

- Möglichkeiten der Selbstheilung.
- Möglichkeiten der Verbesserung des mechanischen Verhaltens und der Durchlässigkeit mittels Faserbewehrung.
- Zusammenwirken von mechanischer Beanspruchung, Austrocknung und Schadstoffeinwirkung.
- Erstellung eines Modells zum Langzeitverhalten von Abdichtungsschichten unter Verwendung von Beobachtungen an natürlich entstandenen Bodenschichten.
- Untersuchung des Gesamtbauwerks Deponie im Hinblick auf optimale Auswahl und konstruktive Regeln für das Deponieabdichtungssystem.

## 9 Literatur

Arslan, U. (1992): Persönliche Mitteilung.

Arslan, U.; Dietrich, T.; Gutwald, J.; Steinmetzer, D. (1993): Einfluß mechanischer Beanspruchungen auf die Funktionsfähigkeit mineralischer Abdichtungsschichten. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 2. Arbeitstagung 17.-19.3.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 85-94.

Barden, L. (1971): Examples of clay structure and its influence on engineering behaviour. In: Stress-strain behaviour of soils. Oxfordshire: G.T. Foulis & Co Ltd. Henley-on-Thames.

Belouschek, P.; Kügler, J.-U. (1990): Labortechnische Untersuchungen zur Ribbildung sowie zur Ribsicherung von mineralischen Dichtsystemen für Zwischen- und Deckeldichtungen. In: Deponie, Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik. S. 261-278.

Breth (1972): Der derzeitige Stand des Staudammbaus. Wasserwirtschaft 62. Heft 1/2. Sonderdruck. S. 1-14.

Bucher, G. (1987): Konstruktive Hangsicherungen. Grundbau-Taschenbuch. 3. Aufl.

Caquot, A.; Kérisel, J. (1967): Grundlagen der Bodenmechanik. Berlin: Springer.

Collins, H.-J. (1992): Verformungsmessungen in Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.):

Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 149-171.

Crone, D. (1977): The design and performance of road pavements. London: Her Majesty's Stationery Office.

Dietrich, T. (1977): A comprehensive mechanical model of sand at low stress level. Proc. IX ICSMFE. Tokyo. Spec. Sess. 9, S. 33-43.

Dietrich, T.; Arslan, U. (1991): Einfluß mechanischer Beanspruchungen auf die Funktionsfähigkeit mineralischer Deponieabdichtungen. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 65-72.

Drescher, J.; Meyer, H. (1990): Zur Standsicherheit von Abfalldeponien. 2. Bochumer Deponieseminar Neuzzeitliche Deponietechnik. Jessberger (Hrsg.). A. A. Balkema. Rotterdam: Brookfield. S. 149-160.

Düllmann, H.; Seppelfricke, C. (1992): Standsicherheit von Deponie-Abdichtungssystemen auf Böschungen. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 285-303.

EA-GDA (1990): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA. DGEG (Hrsg.). Berlin: Ernst & Sohn.

- EA-GDA (1992): Jahresbericht des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten". Bautechnik. Heft 9.
- EAU (1990): Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen. 8. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.
- Fecker, E.; Reik, G. (1987): Baugeologie. Stuttgart: Enke.
- Gertloff, K.-H. (1992): Setzungsmessungen bei Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.3.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 137-148.
- Graf, H. (1981): Einfluß der Bentonitzugabe auf das Verhalten eines tropischen Tons. Geotechnik. S. 194-201.
- Gudehus, G.; Leinenkugel, H. J. (1978): Fließdruck und Fließbewegung in bindigen Böden: Neue Methoden. Vorträge der Baugrundtagung der DGEG Berlin. S. 411-429.
- Head, K. H. (1986): Manual of soil laboratory testing. Vol. 3. London: Pentech Press.
- Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.3.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37.
- Henne, J. (1989): Versuchsgerät zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit von bindigen Böden. Geotechnik. S. 96-99.
- Holzlöhner, U. (1988): Dynamische Bodenkennwerte – Meßergebnisse und Zusammenhänge. In: Bautechnik 65 (9), S. 306-312.
- Horn, A. (1985): Deformation of clay cores in the contact zone to concrete structures. Proc. XI ICSMFE. San Francisco. 8/A/7, S. 1989-1992.
- Jessberger, H. L.; Kockel, R. (1991): Mechanical properties of waste materials. XV Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino. S. 1-41.
- Jessberger, H. L.; Stone, K. J. L. (1991): Subsidence effects on clay barriers. Géotechnique. S. 185-194.
- Kármán v., T. (1911): Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. Zeitschrift des VDI 55, S. 1749-1757.
- Keedwell, M. J. (1984): Rheology and soil mechanics. London: Elsevier.
- Krawietz, A. (1978): Beschreibung des Verhaltens von Sand im Rahmen der Kontinuumsmechanik. Vorträge der Baugrundtagung der DGEG Berlin. S. 77-100.
- Leflaive, E.; Heun, T. (1988): Eine neue Technik der Bodenbewehrung. Straße und Autobahn. 39, 1988.
- Mitchell, J. K. (1976): Fundamentals of soil behavior. New York: John Wiley & Sons.
- Reuter, E. (1988a): Einfluß des Wassergehaltes auf die Eigenschaften von Deponiebasisabdichtungen aus Ton. Wasser und Boden 88 (9), S. 500-503.
- Reuter, E. (1988b): Durchlässigkeit von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 26.
- Rodatz, W.; Beckefeld, P.; Sehrbrock, U. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 19.-20.3.1990. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 31.
- Rodatz, W. (1991): Durchlässigkeit und Spannungs-Verformungs-Verhalten bewehrter bindiger Böden in Deponieabdichtungssystemen. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.9.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 199-207.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Aufl. Stuttgart: Enke.
- Scherbeck, R.; Jessberger, H. L. (1992): Zur Bewertung der Verformbarkeit mineralischer Abdichtungsschichten. Bautechnik. Heft 9, S. 497-506.
- Schultze, E.; Muhs, H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Shim, J.-B. (1989): Einfluß der Beimengungen von Stahlnadeln und Nylonfäden auf das mechanische Verhalten von Sand im Dreiaxialversuch. Geotechnik (3), S. 141-143.
- Stroh, D. (1986): Ausführung einer Kombinationsdichtung. Vorträge der Baugrundtagung 1986 in Nürnberg. Essen: DGEGB. S. 69-86.
- Vardoulakis, I.; Goldscheider, M.; Gudehus, G. (1978): Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem. Int. Journ. Num. Anal. Meth. Geomech. 2, S. 99-128.
- Wiemer, K. (1988): Grundlagen zur Einkapselung von Deponien. Entsorgungspraxis 5, Nr. 2, S. 83-88.
- Youssef, M. S.; El Ramli, A. H.; El Demery, M. (1965): Relationships between shear strength, consolidation, liquid limit, and plastic limit for remoulded clays. VI ICSMFE, Montreal 1965. Vol. 1, S. 126-129.

# H Feuchtehaushalt, Austrocknungsgefährdung von Erdstoff- Abdichtungsschichten (U. Holzlöhner)

1	Einführung	69
2	Wassertransport im ungesättigten Boden	70
3	Einfluß der Temperatur auf bodenhydraulische Eigenschaften (nach Plagge)	71
4	Meßmethoden zur Kennwertermittlung	71
5	Veröffentlichte Zahlenwerte für Wassertransport-Größen	73
6	Rechenverfahren	76
7	Verhalten des Bodens bei Wassergehaltsänderung	77
8	Günstige und ungünstige Einflüsse, vorbeugende Maßnahmen zur Reduzierung der Austrocknungsgefährdung	79
9	Oberflächenabdichtungen	79
10	Offene Fragen, Wissenslücken	80
11	Literatur	81

## 1 Einführung

Die Deponie ist in die natürliche Bodenschichtung eingebettet. Sie stellt einen Bereich künstlicher Bodenschichtung mit einigen Besonderheiten dar:

Die allseitige Einkapselung des abgelagerten Abfalls verbunden mit der Entwässerung über die Sickerwasserdrainage erzeugt ein Gebiet zunehmender Trockenheit im Deponieinnern. Die Abdeckung unterliegt wie ein natürlicher Boden dem Niederschlag und der Verdunstung. Unterhalb der Basisabdichtung ist der Boden dagegen gegen Niederschlag und Verdunstung abgeschirmt. Eine weitere Besonderheit ist die Wärme, die durch biologische und chemische Prozesse in der Deponie entsteht.

Die Messungen von Ramke & Brune (1990) zeigen, daß die Temperaturen an der Deponiebasis erheblich sein können. So wurden in den Sickerwasserdrains der Hausmülldeponie Altwarmbüchen bis zu 35–40 °C gemessen. Diese Deponie wurde relativ schnell aufgeschüttet. Die Höhe beträgt bis zu 55 m. Die Temperaturen steigen mit der Überdeckungshöhe an. Die Temperaturen zeigten in den 1 bis 9 Jahre alten Überschüttungen zeitlich eher eine ansteigende Tendenz. Im Deponieinnern wurden Temperaturen bis zu 60–70 °C gemessen. In langsamer aufgeschichteten und niedrigeren Deponien wurden niedrigere Sickerwassertemperaturen gemessen.

Wie der natürliche Boden, so unterliegt auch das Schichtpaket Deponie einem Feuchtehaushalt, in dessen Rahmen es zu Porenwasserbewegungen kommt. Die erwähnten Besonderheiten der Deponie können dazu führen, daß mineralische Abdichtungsschichten insbesondere in der Basisabdichtung in einem derartig starken Maße Wasser verlieren, daß ihre Funktionsfähigkeit infolge von Ribbildung gefährdet ist. Wie ein "Expertengespräch" im BMU am 13.02.1989 zeigte, wurde die Austrocknungsgefährdung zu dieser Zeit nur von wenigen Spezialisten als dringendes Problem gesehen. Heute ist es dagegen ins Zentrum des Bewußtseins gerückt. Die Entwicklung läuft offensichtlich darauf hinaus, daß mittelfristig ein routinemäßiger Nachweis über die Austrocknungsgefährdung gefordert wird. Der Arbeitskreis "Geotechnik der Deponien und Altlasten" bereitet einen entsprechenden Empfehlungsentwurf vor.

Das Thema "Austrocknungsgefährdung" kann man gedanklich in zwei Teile gliedern: Wassertransport im Boden und Wirkung des Wasserentzugs auf die mineralischen Abdichtungsschichten. In der Praxis treten diese Phänomene synchron auf und sollten deshalb auch möglichst zusammen behandelt werden.

## 2 Wassertransport im ungesättigten Boden

Grundwasserströmung wird üblicherweise als Potentialströmung beschrieben, wobei die hydraulische Höhe  $H$

$$H = \frac{p}{\gamma} + z \quad (1)$$

als Potential verwendet wird. Hierbei ist  $p$  der Druck und  $\gamma$  die Wichte des Wassers;  $z$  ist die geodätische Höhe. Sie beschreibt den Einfluß der Gravitation.

Für den Wassertransport in ungesättigtem Boden wird dieses Potentialkonzept in mehrerer Hinsicht erweitert, Hillel (1980), Scheffer & Schachtschabel (1984):

- Anstelle der Druckhöhe  $p/\gamma$  wird allgemein die Wasserspannung  $-\psi$  (in m Wassersäule) verwendet, die sowohl den Druck- als auch den Zugbereich umfaßt. Das zugehörige Potential wird als Matrixpotential bezeichnet. Es gibt die Bindungskräfte des Wassers in der Bodenmatrix an.
- $\psi$  hängt vom volumetrischen Wassergehalt  $\Theta$  ab:

$$\psi = \psi(\Theta) \quad (2)$$

Diese Beziehung nennt man Wasserspannungs-Wassergehalts-Charakteristik, die für jeden Boden einen speziellen, für ihn charakteristischen Verlauf hat. Ein feinporiger Boden hält bei gleicher Wasserspannung mehr Wasser als ein grobporiger Boden. Die Wasserspannung ist oberhalb des Grundwasserspiegels eine Zugspannung, die bis zu 1 GPa entsprechend 100 000 m Wassersäule betragen kann.

- Die übrigen Einwirkungen auf den Wassertransport, wie Temperatur, Salzgehalt usw., lassen sich als Teilpotentiale beschreiben und zum Gesamtpotential addieren.

Wie beim Grundwasser kommt es zum Wassertransport, wenn das Gesamtpotential von einem Punkt des Bodens zum anderen variiert. Nach Darcy wird die Volumenströmdichte  $q$  proportional zum Gradienten des Gesamtpotentials bzw. der hydraulischen Höhe angesetzt:

$$q = -K \nabla H = K \nabla(\psi - z) \quad (3)$$

Hierbei ist die hydraulische Leitfähigkeit  $K$  nicht mehr konstant, sondern hängt von der Wasserspannung oder dem Wassergehalt ab.

Anstelle vom Gradienten der Wasserspannung kann man den Fluß auch vom Gradienten des Wassergehalts abhängig machen wie im "mechanistischen" Ansatz von Philip & de Vries (1957):

$$q = -D_{\Theta} \nabla \Theta - D_T \nabla T - K \nabla z \quad (4)$$

Hiernach setzt sich der Fluß  $q$ , das auf die Durchtrittsfläche bezogene Wasservolumen in m/s, aus den drei betrachteten Teilströmen infolge des Feuchtegradienten, des Temperaturgradienten und der Gravitation zusammen.  $D_{\Theta}$  und  $D_T$  sind die Diffusionskoeffizienten bei feuchte- bzw. temperaturinduziertem Fluß und  $T$  die Temperatur. Die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\nabla q \quad (5)$$

beschreibt die Wasserbilanz für ein Volumenelement. Die Differenz von einfließendem zum ausfließendem Wasser ergibt den Zuwachs des Wassergehalts im Element.

Die Koeffizienten  $D_{\Theta}$ ,  $D_T$  und  $K$  sind Funktionen von  $\Theta$ . Die Abhängigkeit  $K = K(\Theta)$  ist theoretisch und experimentell gut abgesichert, van Genuchten (1980). Da im allgemeinen die Wasserspannung  $\psi$  und nicht der Wassergehalt  $\Theta$  im Boden stetig variiert, benutzen einige Autoren konsequenterweise  $\psi$  anstelle von  $\Theta$  als Variable, d. h., es wird eine Gleichung vom Typ (3) verwendet. Wenn  $\Theta$  benutzt wird, wird an Schichtgrenzen mit den Wasserspannungs-Charakteristiken der beteiligten Materialien die Stetigkeit von  $\psi$  eingehalten.

Die Diffusionskoeffizienten setzen Philip & de Vries (1957) als Summen der Anteile des Transports in flüssiger (Index l) und dampfförmiger (Index v) Phase an:

$$\left. \begin{aligned} D_{\Theta} &= D_{\Theta l} + D_{\Theta v} \\ D_T &= D_{T l} + D_{T v} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Die Aufteilung ist wichtig in Hinblick auf den Wärmetransport, für den formal ähnliche Gleichungen wie (4) und (5) gelten. Das Gesamtproblem ist damit als System gekoppelter Differentialgleichungen beschrieben, wobei auch die durch den Wassertransport transportierte Wärmemenge berücksichtigt wird.

Es gibt noch eine Reihe von anderen Ansätzen, die, wie der von Taylor & Cary (1964), direkter auf die Gesetze der Thermodynamik Bezug nehmen. Milly (1982) entwickelt nach eingehender Diskussion verschiedener Ansätze ein umfassendes Modell. Nach Hillel (1980) ist jedoch bisher noch nicht erwiesen, daß die theoretisch besser fundierten Ansätze zu genaueren praktischen Voraussagen des Wassertransports in Böden führen.



### 3 Einfluß der Temperatur auf bodenhydraulische Eigenschaften (nach Plagge (1990))

Der Effekt der Temperatur auf bodenhydraulische Eigenschaften ist bislang noch nicht vollständig erklärt, Hopmans & Dane (1985). Aus der vorhandenen Literatur ist jedoch bekannt, daß die Temperatur einen beachtenswerten Einfluß auf die Wassergehalts/Wasserspannungsbeziehungen sowie die ungesättigte Leitfähigkeit besitzt.

Schon 1892 zeigte King, daß die Temperatur einen bedeutenden Einfluß auf das Wasserhaltevermögen eines Bodens hat. Man erklärte diesen Effekt durch die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung von Wasser. Darauf aufbauend untersuchten Miller & Miller (1956) sowie Philip & de Vries (1957) quantitativ den Temperatureinfluß auf das Matrixpotential im Verhältnis zur Oberflächenspannung. Sie entwickelten ein mechanistisches Konzept zur Beschreibung des viskosen Fließens von Wasser in porösen Medien (STVF-Modell = surface-tension, viscous-flow). Dieser Ansatz wurde durch zahlreiche Laboruntersuchungen von Gardner (1955), Wilkinson & Klute (1962) und Nimmo (1983) überprüft. Das Matrixpotential wurde mit Tensiometern in einem geschlossenen System gemessen, wobei der Wassergehalt in der Probe konstant gehalten wurde. Die dabei gemessenen Zunahmen der Wasserspannung bei steigenden Temperaturen konnten tendenziell durch das Konzept von Philip & de Vries beschrieben werden. Jedoch lagen die berechneten Modellwerte um den Faktor von 2-10 niedriger als die gemessenen Werte.

Peck (1960) und Chahal (1964; 1965) untersuchten den Einfluß von eingeschlossener Luft auf die Bodenwasserspannung. Durch Berücksichtigen der sich ändernden Rate des eingeschlossenen Luftvolumens konnten die gemessenen pF-Kurven mit dem Modell von Philip & de Vries hinreichend erklärt werden.

Wilkinson & Klute (1962) sowie Constantz (1982; 1983) untersuchten den Temperatureinfluß auf die pF-Kurve in unterschiedlich texturierten Böden. Sie fanden die erwartete Abhängigkeit zwischen Feinkörnigkeit (Größe der Oberfläche) und der Oberflächenspannung jedoch bedeutend größer als nach dem STVF-Modell. Lediglich

grobkörnige Substrate (gS) ließen sich, so Wilkinson & Klute, durch das Oberflächenspannungs-Konzept genügend erklären. Constantz (1982; 1983) fand eine temperaturinduzierte Strukturänderung in der Bodenmatrix und resümierte, daß der isothermale Wasserdampffluß größer sei als angenommen. Ferner stellte er eine steigende Temperaturabhängigkeit bei zunehmendem Trockenheitsgrad des Bodens fest. Cary (1975) konnte einen Temperatureinfluß auf die Hysteresis der pF-Kurve lediglich in feinkörnigen Substraten (uT) nachweisen.

Chen & Schnitzler (1978), Tschapek & Wasowski (1976) und Nimmo & Miller (1986) versuchten die Effekte durch Anwesenheit oberflächenaktiver Substanzen zu erklären. Eine Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung ist gegeben, da eine Zunahme sowohl der Konzentration oberflächenaktiver Stoffe als auch deren Effektivität bei steigenden Temperaturen zu verzeichnen ist. Hopmans und Dane (1986) machten mit hohem apparativen Aufwand Oberflächenspannungsmessungen an Bodenlösung als auch Lufteinschlußuntersuchungen. Weder die Anwesenheit von eingeschlossener Luft noch der Effekt von Chemikalien in der Bodenlösung auf die Wasserspannung konnten die Größe der gemessenen Temperaturkoeffizienten erklären.

Experimentelle Untersuchungen unter stationären bzw. instationären Bedingungen wurden unter anderem von Flocker et al. (1968), Nimmo & Miller (1986) durchgeführt. Flocker et al. (1968) und Cary (1975) fanden bei den Messungen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit lediglich im relativ trockenen Bereich einen signifikanten Temperatureffekt. Die Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeiten mit steigenden Temperaturen konnte durch die Abnahme der Viskosität alleine nicht erklärt werden. Hopmans & Dane (1986) untersuchten an einer 21 cm hohen Fließzelle mit 10 cm Durchmesser die Temperaturabhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften. Bei niedrigen Wassergehalten und höheren Temperaturen konnte die hydraulische Leitfähigkeit signifikant durch eine thermale Wasserdampfbewegung erklärt werden.

### 4 Meßmethoden zur Kennwertermittlung

Auch wenn die Austrocknung rechnerisch untersucht wird, sind Messungen notwendig, einmal zur Wertbestimmung der Kenngrößen, die für die Rechnung benötigt werden, zum anderen zur Überprüfung des Feuchtezustandes im Feld und in Modell-Bodenkörpern.

Die wichtigsten Meßgrößen sind Wasserspannung und Wassergehalt. Die gegenseitige Abhängigkeit dieser

beiden Größen, die Wasserspannungs-Wassergehalts-Charakteristik, wird seit Jahrzehnten in bodenphysikalischen Laboratorien bestimmt. Hierbei wird eine Bodenprobe mit einer wassergesättigten durchlässigen Keramikplatte oder einem anderen feinporigen Filter in Kontakt gebracht. An das Wasser in der Keramikplatte wird ein Unterdruck angelegt, der sich dem Bodenwasser mitteilt, wobei sich schließlich in beiden Körpern

dieselbe Wasserspannung einstellt. Wenn man den Versuchsaufbau in einem Druckgefäß anordnet, kann man bei Verwendung geeigneter feinporiger Filter bis zu Wasserspannungen von 10 MPa die zugehörigen Wassergehalte bestimmen. Eine Übersicht über die in verschiedenen Bereichen möglichen und üblichen Meßmethoden findet sich z. B. bei Hillel (1980), Aitchison & Richards (1965) und Soeiro (1957).

Die Wasserspannungs-Wassergehalts-Charakteristik  $\psi(\Theta)$  ist nicht eindeutig, sondern hat eine Hysterese, Hillel (1980). Für Trocknung und Befeuchten erhält man also unterschiedliche Wasserspannungen zum gleichen Wassergehalt. Wichtmann et al. (1989) weisen auf einen zeitlichen Effekt hin, der bei Messungen beobachtet wird: Bei Veränderung von Wasserspannungs-Randbedingungen ändert sich die Wasserspannung im untersuchten Bodenkörper schneller als der Wassergehalt.

Zur Messung der Wasserspannung im Feld werden üblicherweise Tensiometer verwendet, die in der gleichen Weise wirken, wie die oben beschriebene keramische Platte. Beim Tensiometer stellt eine keramische Spitze die Verbindung zwischen dem Bodenwasser und dem hinter der Spitze befindlichen mit Wasser gefülltem Raum dar, in dem die Wasserspannung gemessen wird. Mit der beschriebenen Bauart können Unterdrücke bis etwa 85 kPa gemessen werden. Diese Grenze wird in natürlichen Böden mit einer gewissen Versickerungsmöglichkeit und in vielen landwirtschaftlichen Anwendungen meistens eingehalten. Tensiometer sind nach Einbau jahrelang funktionsfähig, wenn die Wasserspannung immer unterhalb von 85 kPa bleibt und können bei entsprechender elektronischer Ausrüstung laufend abgefragt werden. Mit einer miniaturisierten Bauart, Plagge et al. (1989), kann der Wassertransport innerhalb von Bodenproben gemessen werden.

Die einfachste und sicherste Methode zur Bestimmung des Wassergehalts ist die Wägung/Trocknung/Wägung von Bodenmaterial. Diese Methode kann jedoch wegen der Störung oder Zerstörung des untersuchten Bodenkörpers nur begrenzt eingesetzt werden. Einige zerstörungsfreie Meßverfahren beruhen auf dem Einfluß des Wassers im Boden auf elektrische Felder. Bei niedrigeren Frequenzen (< 10 MHz) hat jedoch der Salzgehalt einen sehr starken Einfluß. Bei der dielektrischen Meßmethode werden zwei "Platten" eines Kondensators so angeordnet, daß der zu untersuchende Boden mindestens zu einem Teil das Dielektrikum bildet. Da die relative Dielektrizitätskonstante von Wasser 80 gegenüber 3 bis 4 von Bodenfestteilen beträgt, hat das Bodenwasser einen großen Einfluß auf die Kapazität des Kondensators. In der Praxis bestehen jedoch große Schwierigkeiten wegen der hohen Frequenzen (10–100 MHz) und der kleinen Werte der zu messenden Kapazitäten. Trotzdem gibt es einzelne Anwendungen sowohl im Feld, Kuráz (1981) als auch im Labor, Holzlöhner (1990). Als weitere Methoden werden die Durchstrahlung mit Mikrowellen und die TDR-Methode (time domain reflectory)

verwendet. Bei der TDR-Methode wird aus der Laufzeit eines Impulses entlang eines im Boden eingebetteten Leiterstabes auf den Wassergehalt im Boden geschlossen, Topp & Davis (1985). Dieses Verfahren ist prinzipiell für Feldmessungen als auch mit miniaturisierten Elementen in Bodenproben einsetzbar, Malicki & Skierucha (1989).

Für die experimentelle Bestimmung der Koeffizienten  $K$ ,  $D_e$  und  $D_T$  gibt es keine Routine-Verfahren. Man kann den Quotienten  $D_e / K$  gemäß

$$\frac{D_e}{K} = - \frac{d\psi}{d\Theta} \quad (7)$$

aus der Wasserspannungs-Charakteristik  $\psi = \psi(\Theta)$  berechnen, Hillel (1980). Die separate Wertbestimmung der beiden Koeffizienten  $K$  und  $D_e$  wird heute oft ebenfalls aus der  $\psi(\Theta)$ -Beziehung rechnerisch nach van Genuchten (1980) vorgenommen. Aus eindimensionalen Wassertransportversuchen mit großem Feuchtegradient kann  $D_e$  in Abhängigkeit von  $\Theta$  ermittelt werden, Evgin & Svec (1988). Hillel (1980) gibt einen Versuchsaufbau zur Bestimmung von  $K$  oder  $D_e$  bei ungesättigtem Fluß an. Anders als bei gesättigtem Fluß variiert  $K$  über die Länge der durchströmten Probe in Abhängigkeit von der Wasserspannung. Diese Variation ermitteln Plagge et al. (1989) durch Einsatz von Mikrotensiometern und TDR-Sonden innerhalb der untersuchten Bodenprobe. Der Einfluß der Temperatur ist seit den 60er Jahren intensiv von J. W. Cary und S. A. Taylor u. a. in der Zeitschrift Soil Science untersucht worden. Die Versuche beziehen sich auf das gekoppelte Wasser- und Wärmeleitproblem. Es werden Flüsse, Temperaturen und Wassergehalte gemessen und hieraus Transportkoeffizienten errechnet. Diese Arbeiten dienen eher der Abstützung von Theorien als der Ermittlung von Kennwerten für rechnerische Analysen. Bei der Anwendung der dort angegebenen Zahlenwerte muß man das jeweils zugrundeliegende mathematisch-physikalische Modell beachten. Cary & Taylor (1962, 1962a) zeigten, daß die Diffusion nicht nur vom Temperaturgradienten abhängt, sondern auch von der Temperatur selbst. Mit steigender Temperatur nimmt bei gleichem Gradienten die transportierte Wassermenge zu. Holzlöhner (1989) zeigte anhand von Meßwerten von Cary (1965), daß der Fluß nicht proportional zum Temperaturgradienten ist, sondern daß möglicherweise ein Stagnationsgradient existiert, unterhalb dessen kein oder kaum noch Wasser transportiert wird.

Die experimentelle Trennung von flüssigem und dampfförmigem Transport ist sehr schwierig. Sie erfolgt bisher weitgehend mit der Annahme, daß bei niedrigen Wassergehalten mit einem zusammenhängenden Porenluftraum der dampfförmige Transport über den flüssigen dominieren müsse, Gee (1966), Evgin & Svec (1988).

Ein relativ einfacher Versuchsaufbau zur Untersuchung des Temperatureinflusses, ist das "geschlossene System", Habib (1957), Jackson et al. (1965), Cassel et al. (1969).

Hierbei wird eine Bodensäule mit einem gewissen Ausgangswassergehalt in einer zylindrischen, allseits feuchtigkeits- und wärmeisolierten Zelle eingebaut. Über die Kopf- und die Fußplatte wird ein Temperaturgradient eingepreßt, unter dessen Wirkung die Bodensäule schließlich eine Gleichgewichtsfeuchteverteilung annimmt.

Aus der Gleichgewichtsfeuchteverteilung allein erhält man nur den Quotienten  $D_r/D_\Theta$ , Holzlöhner (1989). Um die Diffusionskoeffizienten separat zu bestimmen, muß man entweder den zeitlichen Verlauf von Temperatur und Wassergehalt innerhalb der Probe messen, Cassel et al. (1969), den zeitlichen Verlauf mindestens global messen und eine inverse Analyse durchführen, Holzlöhner (1991), oder  $D_\Theta$  mit einem Versuch anderen Typs bestimmen, Evgin & Svec (1988).

In jedem Fall ermittelt man die Koeffizienten zunächst gemäß Gleichung (6) als Summe des dampfförmigen und des flüssigen Anteils. Wie groß der Fehler ist, wenn man in Berechnungen diese beiden Anteile nicht trennt, bleibt noch zu untersuchen.

Das Feuchtegleichgewicht im geschlossenen System ist meistens "dynamisch" wie Messungen zeigten. Habib & Soeiro (1953) bzw. Jackson et al. (1965) haben mittels Zugabe von radioaktiven Isotopen bzw. von Kochsalz nachgewiesen, daß der dampfförmige Transport zwar immer zur kühleren Seite erfolgt, der flüssige jedoch auch entgegengesetzt gerichtet sein kann. Habib und Soeiro ordnen den flüssigen Transport dem Matrixpotential zu. In jedem Fall wird per saldo Wasser zur kühleren Seite transportiert.

## 5 Veröffentlichte Zahlenwerte für Wassertransport-Größen

Für die praktische Anwendung, die Berechnung der Austrocknungsgefährdung von Erdstoff-Abdichtungsschichten, wäre es ideal, wenn ein Kennwertkatalog zur Verfügung stünde, aus dem man die zur Berechnung der Austrocknungsgefährdung mineralischer Abdichtungsschichten benötigten Zahlenwerte entnehmen könnte. Das ist leider zur Zeit nicht der Fall. Die Aufgabe wird erschwert durch die Tatsache, daß die maßgebenden Größen  $\psi$ ,  $K$ ,  $D_\Theta$  und  $D_r$  keine Konstanten, sondern Funktionen des volumetrischen Wassergehalts  $\Theta$  sind.

In der Bodenphysik hat man sich seit langem bemüht, die Beziehung  $\psi(\Theta)$  als Funktion zu beschreiben. In dem heute weitgehend akzeptierten Ansatz von van Genuchten (1980) ist  $\psi(\Theta)$  durch vier Parameter bestimmt:  $\Theta_s$ ,  $\Theta_r$ ,  $n$  und  $\alpha$ . Hierbei ist  $\Theta_s$ , der Wassergehalt bei Sättigung, leicht einsichtig und leicht zu bestimmen.  $\Theta_r$ , der residuale Wassergehalt, ist der untere Wassergehaltswert für den  $d\Theta/d\psi = 0$ . Die physikalische Definition dieser Größe wird von van Genuchten (1980) mit Recht als etwas problematisch angesehen. Die restlichen beiden Parameter  $n$  und  $\alpha$  können aus Funktionswert und Steigung von  $\psi(\Theta)$  für  $(\Theta_s - \Theta_r)/2$  bestimmt werden. Wenn dann noch die hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung – in der Bodenmechanik als  $k_f$ -Wert bezeichnet – bekannt ist, kann nicht nur  $\psi(\Theta)$ , sondern auch  $K(\Theta)$  und  $D_\Theta(\Theta)$  ermittelt werden. Bei Bezug auf die van-Genuchten-Parameter wäre ein zu erstellender Kennwertkatalog besonders übersichtlich.

Die Beziehung  $\psi(\Theta)$  ist weitgehend durch das Phänomen der Kapillarität bestimmt. Hierbei geht der Durchmesser der Kapillaren, also die Porengröße im Boden, ein. In jedem Boden gibt es Poren verschiedener Größe. Die Porengrößenverteilung wird oft als Synonym für die Wasserspannungs-Charakteristik verwendet, Horn (1976). Diese hängt in nicht ganz einfacher Weise von der Kornverteilung ab. Hall et al. (1977) haben aufgrund

einer umfangreichen Untersuchung von Böden in England die Ausdrücke

$$\Theta = 7,57 + 0,48 \cdot C + 0,11 \cdot Z \quad (8)$$

für  $\psi = 200$  kPa und

$$\Theta = 1,48 + 0,84 \cdot C - 0,0054 \cdot C^2 \quad (9)$$

für  $\psi = 1,5$  MPa gefunden. Hierbei bedeuten  $C$  den Tonanteil ( $< 2 \mu\text{m}$ ) und  $Z$  den Schluffanteil ( $2 \mu\text{m} \div 60 \mu\text{m}$ ),  $\Theta$ ,  $C$  und  $Z$  in %.

Zahlenwerte für die Wasserspannungs-Charakteristik und für die Transportkoeffizienten finden sich in vielen Fachaufsätzen. Eine Übersicht gibt *Tabelle 1*.

Zur Berechnung des Wärmetransports werden mindestens die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in der Dimension  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und die Wärmekapazität  $C$  in der Dimension  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  benötigt. Für Baustoffe finden sich in einschlägigen Tabellenwerken Werte für beide Größen. Nach Wetzels & Rolle (1989) gilt für die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines gesättigten Bodens

$$\lambda = \frac{a\lambda_s\lambda_f}{(1-d)\lambda_s + d\lambda_f} + b\lambda_s + c\lambda_f, \quad (10)$$

wobei  $\lambda_s$  und  $\lambda_f$  die Leitfähigkeiten von Bodenmaterial und Porenflüssigkeit sind. Da dieses "resistor model" drei parallele Wärmeströme annimmt, gelten für die Konstanten  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$  aus geometrischen Gründen  $a + b + c = 1$  und für den Porenanteil  $n = 1 - b - ad$ . Wetzels & Rolle (1989) bestimmten für trockenen Sand zwei weitere spezielle Beziehungen  $c \approx n$  und  $b \approx \sqrt{\sigma}$ , wobei  $\sigma$  die isotrope Spannung darstellt. Mit den ebenfalls bestimmten Werten  $\lambda_s = 8,1 \div 8,8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  kann dann für jede Dichte

und Spannung die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Sandes ermittelt werden; mit  $\lambda_f$  für Wasser auch für wassergesättigten Sand. Für teilgesättigten Boden gibt

Hillel (1980) eine der Gleichung (10) entsprechende Formel an. *Tabelle 1* enthält weitere Hinweise auf Arbeiten mit Wärmeleitungs-Kennwerten.

*Tabelle 1*

*Literatur mit Angabe von Wasser- und Wärmetransportkennwerten*

*Wasserspannungs-Wassergehalts-Charakteristik, hydraulische Leitfähigkeit  $\psi$ ,  $K$ ,  $D_\Theta$*

Quelle	Bodenart	Information
Aitchison (1965)	Lehme und Tone	$\psi$ , $K$ , $D_\Theta$ Einige allgemeine Tendenzen für $K$ und $D_\Theta$
Aitchison & Richards (1965)	Tonige Böden	$\psi$ Einfluß des Tongehaltes
Blight (1965)	Expansiver Ton	$\psi$ Volumenänderung infolge Druck und Saugspannung
Coleman (1965)	Blanket peat soil - Organischer Boden	$\psi$
Croney (1977)	Feinsande, Gips, schwere Tone, schluffige Sande	$\psi$ , Schrumpfverhalten, Einfluß von Dichte, Plastizität, Verformungsgeschichte, Vorentwässerung
Croney & Coleman (1953)	schwere Tone	$\psi$
Delfaut (1988)	sandig-tonige Ablagerungen	$\psi$ Konsolidationskurven
Dempsey (1978)	AASHO-A4 soil - Klioian till	$K$ , $D_\Theta$
Göttner & Braun (1989)	Reuver Ton - verschiedene Böden	$\psi$ $K(\psi)$ nach van Genuchten
van Genuchten (1980)	Sandiger Lehm, Lehm und Ton	$\psi$
Hall et al. (1977)	Verschiedene Böden (2500 Proben)	$\psi$ Einfluß der Korngrößenverteilung
Juang et al. (1986)	verschiedene sandige Böden, Sand-Ton	$K$ aus Porengrößenverteilung
Livneh & Shklarsky (1965)	Loess	$K$ in Abhängigkeit von Porenziffer
Matsuo et al. (1981)	Sand, Granitmehl	$\psi$ , $K(\Theta)$
Neiß (1982)	14 Böden: Sand bis schluffigen Ton, Kaolinit	$\psi$

Tabelle 1

Fortsetzung (1):  $\psi, K, D_{\Theta}$ 

Quelle	Bodenart	Information
Prapaharan et al. (1985)	3 bindige Böden mit verschiedenem Tongehalt	$\psi$
Radhakrishna et al. (1984)	Goose, Lake Clay und Böden wie Dempsey	$\psi, K(\psi)$
Richards (1965)	Syndal Clay – Horsham Clay	$\psi, K(\psi), D(\psi)$ Vergleich verschiedener Versuchsmethoden
Scheffer & Schachtschabel (1984)	Löß, Sand Böden mit verschiedenem Tongehalt	$\psi$ , Hystereseeffekt, $K(\psi)$ , Einfluß des Porenvolumens und des Tongehalts
Soeiro (1957)	2 Sande mit verschiedenen Kornverteilungen	$\psi, K(\Theta)$ nur für $\psi < 100$ cm WS
Thomas & Rees (1990)	Kimmeridge Clay – ungestörte Proben	$\psi$
Uppal (1965)	Black Cotton Soil	$\psi$
Vahrson (1987)	10 Dünenande, tonig-schluffige Sande (sehr locker gelagert)	$\psi, k_f$ $K(\psi)$ nach van Genuchten (1980)

Tabelle 1

Fortsetzung (2): Diffusionskoeffizienten  $D_{\Theta}, D_T$ 

Quelle	Bodenart	Information
Cary (1966)	Bentonit, gesättigt Houston black clay Columbia loam Millville loam	$D_T, \frac{D_T}{K}; D_T = 0,01 \div 0,2 \frac{\text{cm}^2}{\text{d} \cdot \text{K}}$ bei Saugspannungen von 0,06 bis 0,14 bar
Cary & Taylor (1962), (1962a)	Millville silt loam	$D_T$ Einfluß der mittleren Temperatur $T = 15, 25, 35$ °C
Cassel et al. (1969)	Columbia fine sandy loam	Geschlossenes System $\frac{\Delta \Theta}{\Delta T} = \frac{D_T}{D_{\Theta}} = 0,00244$ bis $0,0419 \text{ K}^{-1}$ $T(t), \Theta(t)$ , Einfluß von $T$ und $\Theta_{\text{initial}}$

Evgin & Svec(1988)	Mackenzie silt Kornverteilung gegeben	geschlossenes System $\frac{\Delta\Theta}{\Delta T} = \frac{D_T}{D_\Theta} = 0,0002 \text{ bis } 0,0278 \text{ K}^{-1}$ $T(t), \Theta(t)$ , Einfluß von $T$ und $\Theta_{\text{initial}}, D_T, D_\Theta$
Gee (1966)	Palouse silt loam	$D_{\Theta v}, D_{\Theta l}, D_{Tv}, D_{Tl}$ getrennt
Habib (1957)	Lehm Plastizitätskennzahlen gegeben	geschlossenes System $\frac{\Delta\Theta}{\Delta T} = \frac{D_T}{D_\Theta} = 0,0012 \text{ bis } 0,0042 \text{ K}^{-1}$

Tabelle 1

Fortsetzung (3): Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität  $\lambda, C$

Quelle	Bodenart	Information
Evgin & Svec (1988)	Mackenzie silt	$\lambda = 0,72 \div 1,6 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ für $w = 6 \% \div 19,9 \%$
Hillel (1980)	Sand, Ton, Torf, Schnee für verschiedene Wassergehalte, verschiedene andere Materialien	$\lambda, C$ Formel für $\lambda$ für teilgesättigten Sand (s. auch Text)
Neiß (1982)	verschiedene mineralische Materialien, Böden	$\lambda = 0,25 \div 2,32 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ $C$
Wetzel & Rolle (1989)	trockener Sand	$\lambda$ Formel für $\lambda$ für trockenen und wassergesättigten Sand (s. auch Text)

## 6 Rechenverfahren

In der Fachliteratur gibt es einige Arbeiten, die Rechenverfahren und Rechenbeispiele beschreiben, Radhakrishna et al. (1984), Dempsey (1978), Hornung & Messing (1981). Hierbei wird der Bodenkörper in Teilgebiete (Elemente) aufgeteilt und das instationäre Problem in Zeitschritten gelöst. Zugrundeliegen die in Abschnitt 3 beschriebenen differentiellen Ansätze. Es werden die Verfahren Finite Elemente, Finite Differenzen oder Integrierte Finite Differenzen verwendet.

Schwierigkeiten ergeben sich aus der starken Variation der Diffusionskenngrößen. Es ist noch nicht geklärt, wie komplex ein Transportmodell sein muß, um die für die Praxis relevanten Phänomene abzubilden. Auch ist die mathematisch-numerische Zuverlässigkeit der verschiedenen Verfahren ungeklärt.

Die bisher veröffentlichten Beispiele beziehen sich nur vereinzelt auf Deponien. Göttner und Braun (1989) behandeln den Austrocknungsvorgang einer Basisabdichtung infolge der Wirkung der Gravitation. Holzlöhner (1990) berechnet das stationäre Problem, d. h. die schließlich sich einstellende Gleichgewichtsfeuchteverteilung in Basisabdichtung und Untergrund infolge von Gravitation und Temperatur. Der große Einfluß des Untergrundes wird hier deutlich. Radhakrishna et al. (1984) berechnen verschiedene Beispiele des Wassertransports und des gekoppelten Wasser- und Wärmetransports. Brauns et al. (1990) berechnen, wie sich die Temperaturverteilung unterhalb der Deponie zeitlich ändert.

In den USA wird der Wasserhaushalt von Deponieabdecksystemen mit dem HELP-Modell berechnet,

Markwardt & Reich (1987). Wegen der größeren Wassermengen – Niederschlag, Versickerung, Oberflächenabfluß, Evapotranspiration – kann das HELP-Modell größer als die zuvor geschilderten sein. So wird bei Teilsättigung lediglich die hydraulische Leitfähigkeit in pauschaler Weise entsprechend dem Sättigungsgrad

modifiziert. Berget et al. (1991) stellten fest, daß – von drei auf Testfeldern untersuchten Dichtungssystemen – nur die mineralischen Dichtungen mit HELP simuliert werden können; Kapillarsperren sind überhaupt nicht erfassbar. Auch für die Dichtschichtdurchsickerung ist HELP nicht geeignet.

## 7 Verhalten des Bodens bei Wassergehaltsänderung

Bei wassergesättigtem Boden entfällt die Differenz  $\sigma'$  zwischen totaler Spannung  $\sigma$  und Porenwasserdruck  $u$  auf die Bodenmatrix

$$\sigma' = \sigma - u \quad (11)$$

Nach dem "Prinzip der effektiven Spannungen" ist nur diese Spannung  $\sigma'$  für die Bodenverformung wirksam. Sie wird deshalb "effektive Spannung" genannt.

Nach Gleichung (11) müßten folgende beiden Versuche die gleiche Bodendeformation hervorrufen: Einerseits belastet man das Bodenelement allseitig mit dem isotropen Druck  $\sigma = p$  und läßt Entwässerung zu:  $u = 0$ . Andererseits wählt man  $\sigma = 0$  und legt an das Porenwasser eine Saugspannung  $u = -p$  an. Die effektive Spannung wäre in beiden Fällen die gleiche:  $\sigma' = p$ . Es müßte sich also in beiden Fällen dieselbe Bodendeformation ergeben.

Diese Überlegung eröffnet die Möglichkeit für weichen, wassergesättigten Ton die Bodenwasser-Charakteristik zu bestimmen, indem man, anstatt eine Saugspannung anzulegen, die Bodenprobe isotropem Druck aussetzt, Soeiro (1957). Richards (1965) beurteilt diese Methode jedoch als problematisch. Ein Grund hierfür könnte sein, daß die Belastungsversuche oft im Ödometer durchgeführt werden, und daß dort auch bei weichem Ton der Spannungszustand nicht ganz dem isotropen Druck entspricht.

Deutlicher erkennt man die Grenzen dieses Verfahrens aus dem Schrumpfverhalten der Böden: Wassergesättigter Boden schrumpft im Normalschrumpfbereich – mit Wassergehalten über der Schrumpfgrenze – unter weitgehender Beibehaltung der Wassersättigung. Die – wenn auch geringe – Abweichung von der Sättigung heißt jedoch, daß ein Teil des Porenraums mit Luft gefüllt ist; Gleichung (11) reicht also nicht mehr aus.

Bishop (1959) und andere versuchten das Prinzip der effektiven Spannungen auf teilgesättigte Böden zu erweitern

$$\sigma' = \sigma - \chi u_w + (1 - \chi) u_a \quad (12)$$

Hierin regelt der Parameter  $\chi$ ,  $0 \leq \chi \leq 1$ , in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad die Verteilung auf Porenwasser ( $u_w$ ) und Porenluft ( $u_a$ ). Jennings & Burland (1962) zeigten

jedoch, daß insbesondere bei niedrigen Sättigungsgraden die nach Gleichung (12) ermittelten effektiven Spannungen die Bodenverformungen nicht allein bestimmen; zusätzlich spielt die Bodenstruktur eine Rolle. Entsprechend stellten Vomocil & Waldron (1962) eine gewisse Druckspannung auf das Korngerüst infolge einer an das Bodenwasser angelegten Saugspannung fest, konnten hierfür aber insbesondere bei starrem Korngerüst keinen einfachen Zusammenhang angeben. Nach Alonso et al. (1990) ist es nicht möglich, mit einer modifizierten effektiven Spannung zu rechnen. Generell muß die Wasserspannung neben der totalen Spannung als Unabhängige berücksichtigt werden.

Die Wasserspannungs-Wassergehalts-Charakteristik nach Gleichung (2) wird allgemein an Bodenproben ohne Auflast ermittelt. In Bodenschichten unter natürlichen Bedingungen und in mineralischen Deponieabdichtungsschichten steht der Boden jedoch unter einer gewissen Auflast  $p$ . Nach Croney & Coleman (1953) ermäßigt sich hierdurch die Wasserspannung im Boden um

$$\Delta s = \alpha \cdot p \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (13)$$

gegenüber dem Wert ohne Auflast. Der Parameter  $\alpha$  berücksichtigt die Bodenart

$\alpha$	Bodenart
1	wassergesättigter, weicher Ton
0,5	schluffiger Ton
0,15	sandiger Ton
0	starres Korngerüst

Aus Richards' (1974) Analyse des gekoppelten Problems Wassertransport-Bodenverformung erhält man mittels Koeffizientenvergleichs für  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{de}{dw} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (14)$$

Hierbei ist  $p$  in Gleichung (13) als mittlerer totaler Druck aufzufassen. Da das Verhältnis der Dichten von Kornmaterial und Wasser  $\rho_s / \rho_w$  konstant ist, ist  $\alpha$  also desto größer, je mehr die Porenzahländerung  $de$  der Änderung des massebezogenen Wassergehalts entspricht. Für  $\alpha = 1$  würde der mittlere totale Druck mit seinem ganzen Wert die Wasserspannung beeinflussen. Das wäre der Bereich, in dem das Prinzip der effektiven Spannungen gilt.

Allgemeine Materialgesetze – Zusammenhänge zwischen Spannungen und Deformationen – für teilgesättigte Böden sind bereits verschiedentlich formuliert worden, Richards (1974), Alonso et al. (1990). Für Deponieabdichtungsschichten interessiert speziell, ob Risse auftreten können. Wenn keine Auflast oder umschließende Spannung auf den Boden aufgebracht wird, schrumpft er in allen drei Richtungen. Eine Erdstoffabdichtungsschicht ohne Auflast vermindert dann nicht nur ihre Dicke, sondern es treten auch Risse auf. Durch eine Auflast können die Risse bis zu einem gewissen Grad verhindert werden.

Aufgrund von theoretischen Überlegungen fand Holzlöhner (1992), daß Risse verhindert werden können, wenn die Wasserspannung  $s$  einen gewissen Prozentsatz  $\kappa$  der Auflast nicht übersteigt

$$s \leq \kappa p \quad \kappa = \frac{K_0}{(1 - K_0)\chi} \quad (15)$$

Hierbei ist  $K_0$  der Ruhedruckbeiwert. Für  $\chi = 1$ , wassergesättigten Ton, und  $K_0 = 0,5$  ergibt sich  $\kappa = 1$ , d. h., es treten keine Risse auf, so lange die Wasserspannung betragsmäßig nicht größer als die Auflast ist. Dieses Ergebnis wurde mit Ödometerproben für den Bereich  $p \leq 60$  kPa experimentell bestätigt. Die Proben aus einem schweren Ton und einem bentonit-verbesserten Sand-Schluff zeigten keinerlei Risse, solange die angelegte Saugspannung betragsmäßig nicht größer war als die gleichfalls aufgebrachte Auflast. Für standfestere Böden mit  $K_0 < 0,5$  ist meistens  $\chi < 1$ , so daß durchaus möglich erscheint, daß auch dann  $\kappa \geq 1$  ist.

Die Untersuchungsergebnisse von Guenther & Widmoser (1988) weisen in dieselbe Richtung. Die Autoren stellten fest, daß bei feuchten Triaxialproben schon die geringe Auflast von 32 kPa genügte, um durchgehende Makroporen, in denen der Großteil des Wassers transportiert wird, weitgehend zu unterbrechen. Bei trockenerem Boden blieben dagegen die durchgehenden Makroporen bei gleicher Auflast bestehen. Zu beachten ist generell, daß außer der Austrocknung auch chemische Einwirkungen und Untergrundsetzungen Rißgefährdungen darstellen. Zur Abhängigkeit der Flexibilität von Wassergehalt und Spannungszustand siehe auch Kapitel G.

Nach TA Sonderabfall wird die mineralische Abdichtungsschicht mit einem Wassergehalt etwas oberhalb des, im Sinne des Proctorversuchs, "optimalen" Wassergehalts eingebaut. Dieser Wassergehalt entspricht dann nach Korrelationen, von Soos (1980), in etwa der Ausrollgrenze. Aus Croney (1977) kann man für eine Reihe von Tonen die Erfahrungswerte 0,3 bis 1 MPa für die Wasserspannung bei der Ausrollgrenze entnehmen.

Nach Acar & Nyeretse (1992) hängt die Wasserspannung  $s$  von bei optimalen Wassergehalt verdichtetem Boden gemäß

$$\frac{s}{p_a} = 0,69 \cdot I_p^{0,58} \quad (16)$$

von der Plastizitätszahl  $I_p = w_L - w_p$  (in %) ab. Hierbei ist  $w_L$  die Fließgrenze und  $w_p$  die Ausrollgrenze,  $p_a$  der atmosphärische Luftdruck. Für die insgesamt 16 gezielt zusammengemischten Böden wurden zwischen 0,15 MPa (85 % Sand, 15 % Kaolinit) und 1,89 MPa (30 % Sand, 70 % Na-Montmorillonit) gemessen.

Der Einbau der mineralischen Dichtungsschicht bewirkt eine gewisse Vorentwässerung. Für vorentwässerten Boden steigt die Saugspannung zunächst sehr stark mit der Abnahme des Wassergehalts an, Croney (1977); d. h., es werden große Saugspannungen erreicht, ohne daß sich das Volumen stark ändert. Das Zusammenwirken der Vorentwässerung und der Auflast mit den eigentlichen Austrocknungsursachen Gravitation und Temperaturgradient ist noch weitgehend unbekannt.

Eine wichtige Frage hinsichtlich der Deponiepraxis ist, ob Austrocknungsrisse sich bei erneuter Wasserzufuhr wieder schließen können. Nach Horn (1976) ist die Quellfähigkeit, insbesondere wenn die Austrocknung die Schrumpfgrenze unterschritten hat, begrenzt. Diese Eigenschaft zeigen auch Croneys (1977) Tonproben bei Entwässerung und Wiederbefeuchtung. Eine Wiederbefeuchtung kann auch örtlich sehr stark variieren, wodurch es am Übergang vom bewässerten zum unbewässerten Bodenbereich zu Setzungsbrüchen kommen kann, Horn (1976) unter Berufung auf Kézdi (1969). Zu den Entstehungsbedingungen von Rissen siehe Hartge & Horn (1977).

Snyder & Miller (1985) kombinieren die Theorien von Kapillarkohäsion und Bruchmechanik elastischer Körper, die fehlerartige Einschlüsse besitzen. Das auch experimentell bestätigte Ergebnis ist, daß, wenn der Boden zu Teilsättigung übergeht und Luftporen sich bilden, die Zugfestigkeit auf die Hälfte der Porenwasserzugspannung absinkt. Die Risse entstehen also dort, wo sich Luftbläschen oder Vorschädigungen befinden. Bei einer aus Aggregaten (Erdstoffstücken) hergestellten Dichtungsschicht werden also zuerst entlang der Aggregatgrenzen Risse auftreten. Dieses auch in der Deponiepraxis beobachtete Verhalten führte – zwecks stetigerer Rißverteilung – zu der Forderung nach kleineren Aggregaten (Stückgrößen). Allerdings würden in einem Erdstoff, in dem die Aggregatgrenzen gar nicht mehr wirksam sind, besonders große Rißabstände, also unerwünschtes Verhalten, auftreten, Snyder & Miller (1985).



## 8 Günstige und ungünstige Einflüsse, vorbeugende Maßnahmen zur Reduzierung der Austrocknungsgefährdung

Die Austrocknungsgefährdung mineralischer Schichten in Basisabdichtungen hängt im wesentlichen von fünf Faktoren ab, Holzlöhner (1989): Eigenschaften des Dichtungsmaterials, Eigenschaften des Untergrundes, Auflast, Temperaturgradient zum Grundwasser und Grundwasserabstand. Da das Dichtungssystem vielen verschiedenen Anforderungen genügen soll, ist allgemein nicht zu erwarten, daß die Einflußfaktoren alle so eingestellt werden können, daß die Austrocknungsgefährdung minimal ist.

Günstig sind z. B. die Bedingungen: hohe Auflast, kleiner Temperaturgradient, kleiner Grundwasserabstand und großes kapillares Saugvermögen des Untergrundes. Die Tendenz, in Zukunft möglichst nur noch vorbehandelten Abfall abzulagern, bewirkt eine verringerte Wärmeentwicklung in der Deponie und wirkt sich damit günstig aus. Von der Anordnung einer Drainschicht hinter bzw. unter der mineralischen Abdichtungsschicht ist dagegen abzuraten, weil die Drainschicht als kapillarbrechende Schicht wirkt und insbesondere infolge der Luftzirkulation in den Poren zu starker Austrocknung der Schichten führen kann.

Verschiedentlich wird gegen die Verwendung der Kombinationsabdichtung als Basisabdichtung eingewendet, daß die abdeckende Kunststoffdichtungsbahn das Feuchthalten der mineralischen Abdichtungsschicht durch das Sickerwasser verhindere. Es ist jedoch keineswegs garantiert, daß immer auf der ganzen Deponiebasis Sickerwasser vorhanden ist, so daß auch ohne Kunststoffdichtungsbahn die Austrocknungsgefährdung untersucht werden muß.

Die Gefahr von Rißbildung infolge von Austrocknung hängt auch von der Art des Dichtungsmaterials ab. Die Versuche an Bodensäulen von Holzlöhner (1991) haben gezeigt, daß ein korngestütztes Dichtungsmaterial auch bei erheblicher Austrocknung keine Risse erkennen läßt. Allerdings ist es in diesem Zustand nicht mehr flexibel, sondern sehr hart. Es liegt nahe, zu versuchen, dem mineralischen Dichtungsmaterial Zusätze mit dem Ziel beizumischen, daß das Wasser fester gebunden bzw. die Rißheilungsfähigkeit bei erneuter Wasserzugabe verbessert wird. Wasserglasvergütete Böden scheinen bei Wiedergabe von Wasser wieder schnell an Flexibilität

zu gewinnen. Auch eine "Bewehrung" der mineralischen Schicht, in Form von Geweben oder Fasern, könnte die Bruchdehnung erhöhen oder doch mindestens die Risse kleiner halten und besser verteilen. Erste Ergebnisse von Belouschek & Kügler (1990) sind ermutigend. Noch in der Erprobung eingesetzt ist die Trockendichtung, Finsterwalder (1988), bei der ein Gemisch aus Sand, Kies und knapp 10 % Bentonit trocken, und dadurch in einer hohen Dichte, eingebaut wird. Hier ist noch nicht geklärt, ob und wieviel Wasser nach dem Einbau zugesetzt werden soll. Prinzipiell scheint die Aussicht zu bestehen, auf diese Weise eine schrumpfarme oder -freie Dichtungsschicht zu erzeugen.

Ein anderer Weg, die Rißgefährdung zu minimieren, besteht in konstruktiven Änderungen am Abdichtungssystem. Als einfachste Variante wird diskutiert, eine zusätzliche Kunststoffdichtungsbahn zwischen mineralischer Abdichtungsschicht und Untergrund anzuordnen. Diese zweite Bahn könnte von minderer Dicke und Qualität sein, da es möglicherweise ausreicht, wenn sie solange funktionsfähig bleibt, bis die Wärmeentwicklung in der Deponie abgeklungen ist. Bei dieser Bauart könnte es jedoch Standfestigkeitsprobleme geben, weil der Temperaturgradient eine etwas feuchtere Zone über der unteren Kunststoffbahn entstehen lassen könnte und weil bei Belastung durch die Müllaufast kaum Porenwasser abfließen kann, wodurch möglicherweise nur die undrainierte Scherfestigkeit vorhanden ist.

In den USA werden in der Regel Mehrfachabdichtungen, bestehend aus mineralischen Schichten, Kunststoffbahnen und Kontrolldrainagen im Wechsel, verwendet. Wie schon erläutert, sind die Drainschichten hinsichtlich der Austrocknungsgefährdung ungünstig. Ohne Drainschichten sind Mehrfachabdichtungen wie in Laub (1990) beschrieben, jedoch günstig, wenn die auf Porenwasser angewiesenen Schichten von anderen, wasserundurchlässigen Schichten "eingewickelt" sind.

Eine weitere Idee ist das gezielte Feuchthalten der mineralischen Abdichtungsschicht. Ein derartiges Bewässerungssystem müßte ebenfalls mindestens bis zum Abklingen der Wärmeentwicklung in der Deponie funktionsfähig bleiben.

## 9 Oberflächenabdichtungen

Kappen- oder Oberflächenabdichtungen unterliegen zum Teil anderen Bedingungen als Basisabdichtungen. Anstelle des natürlichen Untergrundes mit einem Grundwasserspiegel, schließt sich unterhalb der Kappenabdichtung, für die nach TA Sonderabfall ebenfalls die Kombinationsdichtung empfohlen wird, der Abfall an.

Wenn die Abdichtungssysteme wirklich dicht sind, wird das Deponieinnere im Laufe der Zeit immer trockener. Es wäre zu untersuchen, ob unter diesen Bedingungen die Erdstoffschicht in der Kombinationsdichtung des Abdecksystems auf Dauer ausreichend feucht bleibt. Ein Beitrag hierzu sind die langjährigen Untersuchungen an

Testfeldern der Deponie Georgswerder, Melchior (1993), Melchior et al. (1990). Austrocknungsfördernd wirkt auch eine Gasdrainage.

Bei Wärmeentwicklung in der Deponie kann sich, auch von der Jahreszeit abhängig, ein nach außen gerichteter Temperaturgradient einstellen, der die Feuchtigkeit der mineralischen Dichtungsschicht zutreiben würde.

Wenn die Erdstoffdichtungsschicht nicht mit einer Kunststoffdichtungsbahn abgedeckt ist, kommt es infolge von kapillaren Aufstiegs von Wasser zu erheblicher Austrocknung, wie die Feldversuche von Melchior (1993) gezeigt haben.

Eine weitere Besonderheit sind die großen zu erwartenden Setzungen des Abfalls, die hohe Anforderungen an die Flexibilität der Abdichtungskomponenten stellen. Hierbei ist zu beachten, daß die Auflast wesentlich geringer ist als bei Basisabdichtungen. Zu den Setzungen siehe Kapitel G.

## 10 Offene Fragen, Wissenslücken

### **Kenngrößen:**

Die empfindlichsten Wissenslücken bestehen auf dem Gebiet der Kenngrößenbestimmung und zwar sowohl hinsichtlich von Methoden als auch eines Kennwertkataloges. Es wäre wünschenswert, wenn die bisher veröffentlichten Kennwerte, siehe Abschnitt 5, unter Berücksichtigung des jeweils zugrundeliegenden Modells so aufbereitet und gesammelt würden, daß sie für numerische Analysen zur Verfügung stehen. Da in Versuchen oft keine homogenen Felder erzeugt werden können, sind inverse Analysen (Parameteridentifikation) zur Auswertung von Versuchen erforderlich. Es sollten Methoden bis zum standardmäßigen Einsatz entwickelt werden. Verlässliche Methoden zur Trennung des dampfförmigen und des flüssigen Wassertransports sind notwendig. Der Wassertransport bei kleinen Temperaturgradienten, wie sie in der Praxis vorherrschen, ist noch ungeklärt. Quantitative Angaben über den Einfluß von Vorentwässerung beim Einbau und Auflast auf die Bodenwassercharakteristik und das Rißbildungsverhalten gibt es bisher noch nicht.

### **Modelle für den Wassertransport, Rechenverfahren:**

Es ist zu klären, wie einfach oder wie komplex ein mathematisch-physikalisches Modell sein muß, um die relevanten Effekte zu erfassen. Die Unterschiede bei der Anwendung der verschiedenen Modelle sind zu untersuchen. Kriterien für die erforderliche Genauigkeit und standardmäßig anzuwendende Rechenverfahren sind zu entwickeln.

Auch die Bedingungen der auflagernden Schichten unterscheiden sich stark von denen der Basisabdichtung. Die oberen Schichten der Kappenabdichtung unterliegen den Witterungseinflüssen. In Abschnitt 6 ist beschrieben, in welchen Fällen der Wasserhaushalt von Deponieabdecksystemen mit dem HELP-Modell abgeschätzt werden kann.

Wegen der erwähnten Unterschiede werden bei Oberflächenabdichtungen stärker Alternativen zur Kombinationsdichtung und Varianten diskutiert, siehe z. B. Belouschek & Kügler (1990). Ein besonderes Dichtungselement ist die Kapillarsperre, bei dem die gegenüber Feinsand geringere hydraulische Leitfähigkeit von grobkörnigerem Boden im ungesättigten Zustand ausgenutzt wird, Melchior & Miehlich (1989). Diese vergleichende Untersuchung hat zum Ziel, die Anwendungsbereiche der verschiedenen Systeme – Bindige Erdstoffdichtung, Kombinationsdichtung und Kapillarsperre – zu zeigen. Näheres zu Oberflächenabdichtungen siehe Kapitel O.

### **Feldbeobachtungen:**

Gezielte Feldversuche unter Deponiebedingungen sind aufwendig, erfordern eine lange Beobachtungszeit und werden vom Deponiebetreiber oft als problematisch angesehen. Deshalb sollte man wenigstens bei Aufgrabungen auch die für die Austrocknung relevanten Parameter mituntersuchen und dokumentieren. Großmaßstäbliche Versuche unter simulierten Deponiebedingungen sind zur Ergänzung der Laborversuche und zur Erprobung von Rechenverfahren wünschenswert.

### **Verhalten von Dichtungsmaterialien bei Austrocknung:**

Die verschiedenen Erdstoffe, die für Abdichtungsschichten verwendet werden, reagieren auf Austrocknung unterschiedlich im Hinblick auf Schrumpfen und Rißbildung. Eine systematische Untersuchung, wie die Erdstoffe hinsichtlich der Vermeidung von Rißbildung optimiert werden können, fehlt bisher. Hierbei wäre auch zu beachten, daß die Flexibilität weitgehend erhalten bleiben sollte. Es wäre auch zu untersuchen, inwieweit Zusätze das Verhalten verbessern.

### **Konstruktive Varianten:**

In Abschnitt 8 wurden schon einige konstruktive Details diskutiert. Es fehlt zur Zeit eine systematische Untersuchung zur Optimierung des Entwurfs des Abdichtungssystems hinsichtlich Austrocknung. Natürlich müssen hierbei die anderen Erfordernisse berücksichtigt werden.

# 11 Literatur

- Acar, Y. B.; Nyeretse, P. (1992): Total suction of artificial mixtures of soil compacted at optimum water content. *Geot. Testing J. S.* 65-73.
- Aitchison, G. D. (1965) (Ed.): *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas.* Australia Butterworth.
- Aitchison, G. D.; Richards, B. G. (1965): A broad-scale study of moisture conditions in pavement subgrades throughout Australia. In: Aitchison, G. D. (Ed.) (1965): *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas.* Australia Butterworth. S. 184-232.
- Alonso, E. E.; Gens, A.; Josa, A. (1990): A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40, S. 405-430.
- Belouschek, P.; Kügler, J.-U. (1990): *Labortechnische Untersuchungen zur Ribbildung sowie zur Ribsicherung von mineralischen Dichtsystemen für Zwischen- und Deckeldichtungen.* In: Deponie, Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik. S. 261-278.
- Berger, K., Melchior, S., Miehlich, G. (1991): Zur Eignung des "Hydrologic Evaluation of Landfill Performance" (HELP) Modells der U. S. Umweltbehörde zur Simulation des Wasserhaushalts von Deponieabdecksystemen. In: *Informatik für den Umweltschutz, Proceedings. Informatik – Fachbericht 296.* Berlin: Springer. S. 407-418.
- Bishop, A. W. (1959): The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad* 106 (39), S. 859-863.
- Blight, G. E. (1965): A study of effective stresses for volume change. In: Aitchison (1965): *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas.* Australia Butterworth. S. 259-269.
- Brauns, J.; Dittmar, C.; Gottheil, K.-M. (1990): Laborversuche zum Feuchteverhalten thermisch belasteter Kombinationsdichtungen. *Geotechnik* 3, S. 135-141.
- Cary, J. W. (1965): Water flux in moist soil: Thermal versus suction gradients. *Soil Science* 100 (3), S.168-175.
- Cary, J. W. (1966): Soil moisture transport due to thermal gradients: Practical aspects. *Soil Science Soc. Amer. Proc.* 30, S. 428-433.
- Cary, J. W. (1975): Soil water hysteresis: Temperature und pressure effects. *Soil Sci.* 120, S. 308-311.
- Cary, J. W.; Taylor, S. A. (1962): The interaction of the simultaneous diffusions of heat and water vapor. *Soil Science Soc. Amer. Proc.* 26, S. 413-416.
- Cary, J. W.; Taylor, S. A. (1962a): Thermally driven liquid and vapor phase transfer of water and energy in soil. *Soil Science Soc. Amer. Proc.* 26, S. 417-420.
- Cassel, D. K.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. (1969): Soil-water movement in response to imposed temperature gradients. *Soil Science Soc. Amer. Proc.* 33, S. 493-500.
- Chahal, R. S. (1964): Effects of temperature and trapped air on the energy status of water in porous media. *Soil Sci.* 98, S. 107-112.
- Chahal, R. S. (1965): Effects of temperature and trapped air on matric suction. *Soil Sci.* 100, S. 262-266.
- Chen, Y.; Schnitzler, M. (1978): The surface tension of aqueous solutions of soil humic substances. *Soil Sci.* 125, S. 7-15.
- Coleman, J. D. (1965): Geology, climate and vegetation as factors affecting soil moisture. In: Aitchison (1965): *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas.* Australia Butterworth. S. 93-99.
- Constantz, J. (1982): Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, S. 466-470.
- Constantz, J. (1983): Laboratory analysis of water retention in unsaturated materials at high temperature. In: Mercer, J. W. et al. (Ed.): *Role of the unsaturated zone in radioactive and hazardous waste disposal.* Ann Arbor, MI. S. 147-164.
- Croney D.; Coleman, J. D. (1953): *Soil moisture suction properties and their bearing on the moisture distribution in soils.* Zürich: 3rd ICSMFE 1(1/3), S. 13-18.
- Croney, D. (1977): *The design and performane of road pavements.* London: Her Majesty's Stationery Office.
- Delfaut, A. (1988): Consolidation naturelle des remblais hydrauliques argilo-sableux de la zone portuaire de Limay-Porcheville. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.* 154, S. 17-31.
- Dempsey, B. J. (1978): A mathematical model for predicting coupled heat and water movement in unsaturated soil. *Int. Journ. for Num. and Anal. Meth. in Geomech.* 2, S. 19-34.
- Evgin, E.; Svec, O. J. (1988): Heat and moisture transfer characteristics of compacted Mackenzie silt. *Geotechnical Testing Journal* 11 (2), S. 92-99.

- Finsterwalder, K. (1988): Vorsorge für die Schadstoffemissionen von Deponien und Altlasten in geologischen Zeiträumen. Mitteilung der Dyckerhoff & Widmann AG.
- Flocker, W. J.; Yamaguchi, R.; Nielsen, D. R. (1986): Capillary conductivity and soil water diffusivity values from vertical soil columns. *Agron. J.* 60, S. 605-610.
- Gardner, R. (1955): Relation of temperature to moisture tension of soil. *Soil Sci.* 79, S. 257-265.
- Gee, G. W. (1966): Water movement in soils influenced by temperature gradients. Ph. D. dissertation, Washington State University. Pullmann, WA.
- Göttner, J. J.; Braun, G. (1989): Das Austrocknungsverhalten des Tons in der Kombinationsdichtung. *Müll & Abfall* 10, S. 534-546.
- Guenther, D.; Widmoser, P. (1988): Wasserbewegung und Bodenverdichtung – Messungen mit einer modifizierten Triaxialapparatur. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 57, S. 171-174.
- Habib, M. (1957): Thermo-osmose. *Annales de l'Inst. du Batiment et des Travaux Publics* 110, S. 130-136.
- Habib, M.; Soeiro, F. A. (1953): Diskussionsbeitrag. Zürich: 3rd ICSMFE 3, S. 155-156.
- Hall, D. G. M.; Reeve, M. J.; Thomasson, A. J.; Wright, V. F. (1977): Water retention, porosity and density of field soils. Soil survey technical monograph 9. Harpenden U.K.
- Hartge, K. H.; Horn, R. (1977): Spannungen und Spannungsverteilungen als Entstehungsbedingungen von Aggregaten. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.* 25, S. 23-33.
- Hillel, D. (1980): *Fundamentals of Soil Physics*. Orlando: Academic Press Inc.
- Holzlohner, U. (1989): Moisture behaviour of soil liners and subsoil beneath landfills. 2nd Int. Landfill Symp. Sardinia 89, Porto Conte. 1, S. XI-X11.
- Holzlohner, U. (1990): Austrocknung von mineralischen Abdichtungsschichten unter der Deponie. In: Deponie, Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik. S. 79-104.
- Holzlohner, U. (1991): Austrocknung mineralischer Dichtungsschichten in Kombinationsdichtungen. In: Fehlau, K.-P., Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1990. Berlin: Erich Schmidt. S. 281-303.
- Holzlohner, U. (1992): Austrocknung und Ribbildung in mineralischen Schichten der Deponiebasisabdichtung. *Wasser & Boden*. Heft 5, S. 289-293.
- Hopmans, J. W.; Dane, J. H. (1985): Effect of temperature-dependent hydraulic properties on soil water movement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49, S. 51-58.
- Hopmans, J. W.; Dane, J. H. (1986): Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, S. 562-567.
- Horn, R. (1976): Festigkeitsänderungen infolge Aggregierungsprozessen eines mesozoischen Tones. Diss. TU Hannover.
- Hornung, U.; Messing, W. (1981): Simulation of two-dimensional saturated-unsaturated flows with an exact water balance. In: Verruijt, A.; Barends, F. B. J. (Eds.): "Flow and Transport in Porous Media." Proc. EUROMECH 143 Delft. Rotterdam: Balkema. S. 91-96.
- Jackson, R. D. (1965): Water vapor diffusion in relatively dry soil. IV. Temperature and pressure effects on sorption diffusion coefficients. *Soil Sci. Soc. Amer.* 29, S. 144-148.
- Jackson, R. D.; Rose, D. A.; Penman, H. I. (1965): Circulation of water in soils under a temperature gradient. *Nature* 205, S. 314-316.
- Jennings, J. E. B.; Burland, J. B. (1962): Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique* 12, S. 125-144.
- Juang, H. C.; Holtz, R. D. (1986): Fabric, pore size distribution, and permeability of sandy soils. *Journ. Geot. Eng. ASCE* 112, S. 855-868.
- Kézdi, A. (1969): *Handbuch der Bodenmechanik*. Bde. I und II. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- King, F. H. (1892): Fluctuations in the level and rate of movement of ground water. U.S. Dep. Agric. Weather Bur. Bill. no. 5.
- Kuráz, V. (1981): Testing of a field dielectric soil moisture meter. *Geotechnical Testing Journal* 4 (3), S. 111-116.
- Laub, B. (1990): Abfallwirtschaftskonzeption des Main-Kinzig-Kreises. In: Kreisausschuß des Main-Kinzig-Kreises, Sachgebiet Abfallwirtschaft und Umwelttechnik (Hrsg.): Restmülldeponie 2000. Tagungsband zum Hearing.
- Livneh, M.; Shklarsky, E. (1965): Saturation criteria in pavement design for semi-arid zones. In: Aitchison, G. D. (Ed.) (1965): Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas. Australia Butterworth. S. 237-242.

- Malicki, M. A.; Skierucha, W. M. (1989): A manually controlled TDR-soil moisture meter operating with 300 ps rise time needle pulse. *Irrigation Science* 10, S. 103-109.
- Markwardt, N.; Reich, G. (1987): Das Programmsystem HELP zur Wasserhaushaltsberechnung von Deponien. *Müll & Abfall* 12, S. 503-506.
- Matsuo, S.; Nishida, K.; Sasaki, S. (1981): Physical properties of soil particles and their effect on hydraulic conductivity of unsaturated decomposed granite soil. *Soils and Foundations* 21 (4), S. 1-12.
- Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. *Hamb. Bodenkundl. Arb. Band* 22.
- Melchior, S.; Miehlich, G. (1989): Hydrological studies on the effectiveness of different multilayered landfill caps. *Sardinia 89. Second International Landfill Symposium*. 9.-13. October 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. XVI. 1-13.
- Melchior, S.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (1990): Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Oberflächendichtsysteme für Deponien und Altlasten. In: *Deponie, Ablagerung von Abfällen 4*. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik. S. 177-196.
- Miller, E. E.; Miller, R. D. (1956): Physical theory for capillary flow phenomena. *J. Appl. Phys.* 27, S. 324-332.
- Milly, P. C. D. (1982): Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matrix head-based formulation and a numerical model. *Water Resources Research* 18 (3), S. 489-498.
- Neiß, J. (1982): Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. *Fortschrittsbericht der VDI-Z. Reihe 3* (73).
- Nielsen, D. R.; Jackson, R. D.; Cary, J. W.; Evans, D. D. (1972): *Soil Water*. Am. Soc. of Agronomy and Soil Science Soc. of America. Madison, Wisconsin.
- Nimmo, J. R. (1983): The temperature dependence of soil-moisture characteristics. Ph. D. Diss., Univ. of Wisconsin-Madison.
- Nimmo, J. R.; Miller, E. E. (1986): The temperature dependence of isothermal moisture vs. potential characteristics in soils. *Soil Sci. Am. J.* 50, S. 1105-1113.
- Peck, A. J. (1960): Change of moisture tension with temperature and air pressure. *Theoretical Soil Sci.* 89, S. 303-310.
- Philip, J. R.; de Vries, D. A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys. Union* 38 (2), S. 222-232.
- Plagge, R.; Renger, M.; Roth, C. H. (1989): A new laboratory method to quickly determine the hydraulic conductivity of unsaturated soils within a wide range of textures. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 153, S. 39-45.
- Plagge, R. (1990): Einfluß der Temperatur auf bodenhydraulische Eigenschaften, pers. Mitteilung.
- Prapaharan, S.; Altschaeffl, A. G. (1985): Moisture curve of compacted clay: Mercury intrusion method. *Journal GT. ASCE* 8, S. 1139-1143.
- Radhakrishna, H. S.; Lau, K.-C.; Crawford, A. M. (1984): Coupled heat and moisture flow through soil. *Journal Geotechn. Eng. ASCE* 110, S. 1766-1784.
- Ramke, H.-G.; Brune, M. (1990): Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit von Entwässerungsschichten in Deponiebasisabdichtungssystemen. *Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben FKZ BMFT 145 0457 3*.
- Richards, G. B. (1965): Determination of the unsaturated permeability and diffusivity functions from pressure plate outflow data with non-negligible membrane impedance. In: *Aitchison, G. T. (Ed.) (1965): Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*. Australia Butterworth. S. 47-54.
- Richards, G. B. (1974): Behaviour of unsaturated soils. In: *Lee, I. K.: Soil Mechanics – New Horizons*. London: Newnes-Butterworths. S. 112-157.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1984): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart: F. Enke.
- Soeiro, M. (1957): Succion, *Annales de l'Inst. du Batiment et des Travaux Publics* 110, S. 121-129.
- Snyder, V. A.; Miller, R. D. (1985): Tensile strength of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, S. 58-65.
- Taylor, S. A.; Cary, J. W. (1964): Linear equations for the simultaneous flow of matter and energy in a continuous soil system. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28, S. 162-167.
- Thomas, H. R.; Rees, S. W. (1990): Modeling field infiltration into unsaturated clay. *Journ. Geotech. Eng. ASCE* 116, S. 1483-1501.
- Topp, G. C.; Davis, J. L. (1985): Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. Jour.* 49, S. 19-24.

Tschapek, M.; Wasowski, C. (1976): The surface activity of humic acid. *Geochim. Cosmochim. Acta* 40, S. 1343-1345.

Uppal, H. L. (1965): Field study on the movement of moisture in black cotton soils under road pavements. In: Aitchison, G. D. (Ed.) (1965): *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*. Australia Butterworth.

Vahrson, W.-G. (1987): *Aspekte bodenphysikalischer Untersuchungen in der lybischen Wüste*. Berlin Geogr. Abh. 43. Berlin: Inst. f. Phys. Geogr. FU. 72 S.

van Genuchten, M. T. (1980): A closed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journ.* 44, S. 892-898.

Vomocil, J. A.; Waldron, L. J. (1962): Effect of moisture content on tensile strength of unsaturated glass bead systems. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26, S. 409-412.

von Soos, P. (1980): *Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor*. In: *Grundbau Taschenbuch*. 3. Aufl. Teil 1, S. 59-116.

Wetzel, R. A.; Rolle, K. C. (1989): A model study of the influence of stress on the thermal conductivity of dry sand. *Geotech. Test. Journ.* 12, S. 167-170.

Wichtmann, W.; Guenther, D.; Widmoser, P. (1989): *Beobachtungen zum dynamischen Fließverhalten in wasserungesättigten Böden*. *Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges.* 59/1, S. 267-272.

Wilkinson, G. E.; Klute, A. (1962): The temperature effect on the equilibrium energy status of water held by porous media. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 26, S. 326-329.

# I Schadstofftransport (U. Holzlöhner, H. August)

1	Einführung	85
2	Schadstofftransportmodell für mineralische Abdichtungsschichten	85
3	Diffusion durch Kunststoffdichtungsbahnen, Wechselwirkung mit mineralischen Abdichtungsschichten	86
3.1	Untersuchungen an Kunststoffdichtungsbahnen	86
3.2	Untersuchungen an Dichtungen aus dem Werkstoffverbund Erdstoff – Polymerwerkstoff	89
3.3	Wechselwirkung der Schadstoffe mit der mineralischen Dichtungskomponente an der Grenzfläche zur Kunststoffdichtungsbahn	90
4	Sorption, Abbau und Verdünnung	91
5	Experimentelle Bestimmung von Transportparametern in Erdstoffen	92
6	Rechenverfahren	94
7	Aufgrabungen, praktische Folgerungen	94
8	Entwicklungstendenzen	95
9	Literatur	95

## 1 Einführung

Bei dem heutigen Stand der Deponierungstechnik stellen die Deponien große Schadstoffpotentiale dar. Gegenüber dem umgebenden natürlichen Boden besteht also ein Ungleichgewicht, das durch technische Barrieren wie das Abdichtungssystem aufrecht erhalten wird. Da kein Abdichtungssystem absolut dicht ist, diffundiert ein gewisser Schadstoffstrom auf den verschiedenen Emissionswegen in die Umgebung. Die Güte eines Abdichtungssystems oder einer Abdichtungsschicht

könnte man quantifizieren, indem man unter definierten Bedingungen die Emissionsrate ermittelt. Auf dieser Linie liegt der in der TA Sonderabfall geforderte Höchstwert für den Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) für mineralische Abdichtungsschichten. Hierbei liegt als Emissionstyp die Durchströmung (Advektion) zugrunde. Über den Emissionstyp Diffusion gibt es dagegen bisher noch keine Vorschriften, sondern nur Empfehlungen.

## 2 Schadstofftransportmodell für mineralische Abdichtungsschichten

Die Empfehlung E6-2 des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten", GDA-Empfehlungen (1993), enthält den heutigen Stand bezüglich des Transportmodells für wassergelöste Stoffe. Den eindimensionalen Transport beschreibt die Differentialgleichung

$$\frac{\partial(\Theta \cdot R \cdot c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\Theta \cdot d_0 \cdot \gamma + \alpha \cdot v) \frac{\partial c}{\partial x} - v \cdot c \right] - \mu \cdot \Theta \cdot c \quad (1)$$

Hiernach ergibt sich die zeitliche Änderung der Konzentration  $c$  des wassergelösten Stoffes aus vier Summanden, die in der Reihenfolge, wie sie auf der

rechten Seite der Gleichung aufgeführt sind, den Einfluß von Diffusion, Dispersion, Advektion und Abbau beschreiben. Im Retardationskoeffizienten

$$R = 1 + \frac{\rho_d k_d}{\Theta} \quad (2)$$

ist im zweiten Summanden die Sorption berücksichtigt. Die Größen in den Gleichungen (1) und (2) bedeuten:

- $c$  – Konzentration des wassergelösten Stoffes ( $\text{kg/m}^3$ )
- $d_0$  – Diffusionsbeiwert des wassergelösten Stoffes im freien Wasser ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

- $k_d$  – Koeffizient der linearen Gleichgewichtssorptionsisotherme (Verteilungskoeffizient) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $R$  – Retardationskoeffizient (-)
- $t$  – Zeit (s)
- $x$  – Längsordinate (m)
- $v$  – Filtergeschwindigkeit in x-Richtung (m/s)
- $\alpha$  – Dispersionslänge (m)
- $\gamma$  – Impedanzfaktor (-)
- $\Theta$  – Wassergehalt ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
- $\mu$  – Abbaukoeffizient
- $\rho_d$  – Trockendichte des Abdichtungsmaterials ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Bei Schneider & Göttner (1991) sind die einzelnen Größen näher erklärt. Für  $\mu$  und  $d_0$  sind formelmäßige Ausdrücke und für einzelne Größen Zahlenwerte angegeben. Eine ausführliche Darstellung findet sich bei Schneider & Göttner (1991).

Diffusion und Dispersion haben zwar verschiedene Ursachen, aber, wie Gleichung (1) zeigt, eine ähnliche Wirkung. Da in der Praxis ihre Einflüsse oft nicht voneinander zu trennen sind, werden sie mitunter in dem "Diffusions/Dispersionskoeffizienten"

$$D = \Theta \cdot d_0 \cdot \gamma + \alpha \cdot v \quad (3)$$

zusammengefaßt.

Der Gleichung (1) liegt die Vorstellung zugrunde, daß die Schadstoffe im Porenwasser gelöst sind und mit und in diesem transportiert werden. Bevor man Gleichung (1) anwenden kann, muß man die Filtergeschwindigkeit  $v$  mit einem Strömungsmodell ermitteln, vgl. hierzu auch Kapitel J "Hydraulische Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten".

Nach Shackelford & Daniel (1991a) besteht der Impedanzfaktor  $\gamma$  aus dem Produkt von drei Faktoren, die folgende Abweichungen vom Idealzustand berücksichtigen:

- Tortuosität des Fließwegs im Boden

- Abhängigkeit der Mobilität des Porenwassers vom Abstand zu den Tonmineral-Oberflächen
  - Ausschluß der Anionen von kleineren Bodenporen.
- Shackelford & Daniel (1991a) bezeichnen

$$D^* = d_0 \cdot \gamma \quad (4)$$

als effektive Diffusivität. Für diesen Begriff gibt es in der Literatur leider eine ganze Reihe leicht verschiedener Definitionen, so daß man bei der Übernahme von Zahlenwerten auf die genaue Definition der zugehörigen Größe achten muß.

Oft wird nur Diffusion und Sorption betrachtet, d. h. es wird in Gleichung (1)  $v = 0$  und  $\mu = 0$  gesetzt, Degen & Hasenpatt (1988), Shackelford & Daniel (1991a). Dann ist der volumetrische Wassergehalt  $\Theta = \text{konst.}$  und es ergibt sich aus den Gleichungen (1), (2) und (4)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D^*}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (5)$$

Gleichung (5) zeigt deutlich den verzögernden Einfluß der Sorption: Da  $R > 1$ , ist der apparente Diffusionskoeffizient  $D_{app}$  kleiner als  $D$ , d. h. die zeitliche Änderung der Konzentration ist kleiner als ohne Sorption. Man beachte, daß sowohl Gleichung (5) als auch Gleichung (1) nur gelten, solange sorbiert werden kann. Ist Sorptionsgleichgewicht erreicht, so ist  $R = 1$ . Der Transport verläuft dann so wie ohne Sorption. Nimmt die Konzentration  $c$  ab, kann auch Desorption,  $R < 1$ , auftreten.

Nach den Gleichungen (1) und (2) ist der adsorbierte Anteil  $c_s$  gemäß

$$c_s = \frac{\rho_d k_d}{\theta} \cdot c \quad (6)$$

proportional zur im Wasser vorhandenen Konzentration  $c$ . Außer dieser linearen Sorptionsisotherme sind auch andere, unterlineare Ansätze gebräuchlich, die der Beobachtung, daß sich die Sorption bei Annäherung an die Sättigung verlangsamt, besser gerecht werden.

### 3 Diffusion durch Kunststoffdichtungsbahnen, Wechselwirkung mit mineralischen Abdichtungsschichten

#### 3.1 Untersuchungen an Kunststoffdichtungsbahnen

In den 70er Jahren wurden neben mineralischen Dichtungen zunehmend auch Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) als alleinige Deponiebasisabdichtung eingesetzt.

Dies erfolgte in der Annahme, daß die unversehrte, porenfreie KDB ebenso gegen die Sickerwasserinhaltsstoffe eine praktisch perfekte Sperre darstellt, wie man das von der KDB im Erd- und Wasserbau oder für die Abdichtung von Dächern gegen Niederschläge her gewohnt war. Veröffentlichungen von Haxo et al. (1982)



und August & Tatzky (1982a und 1982b) wiesen auf die Notwendigkeit hin, Permeationsuntersuchungen an handelsüblichen Deponiebasisabdichtungen durchzuführen, um ihre Durchlässigkeit für gefährliche Sickerwasserinhaltsstoffe ermitteln zu können. Haxo et al. (1982) beschreiben Versuche mit Taschen, die, aus den zu untersuchenden Polymerfolien gefertigt, mit Sickerwasser, mit verschiedenen in Wasser gelösten Chemikalien oder mit öligen Flüssigkeiten gefüllt waren. Diese Arbeiten beschränkten sich auf den prinzipiellen Nachweis der mehr oder weniger großen Durchlässigkeit für gewisse Stoffe, ohne explizit Permeationsraten anzugeben. Im Zusammenhang mit den unzureichenden Kenntnissen über die Wechselwirkung von Tonabdichtungen mit konzentrierten und verdünnten Kohlenwasserstoffen stellt Anderson (1982) fest, daß es auch für die Polymerabdichtungen zu wenig Daten über deren Durchlässigkeitsverhalten gegen Schadstoffe gibt. Diese Feststellung gilt streng genommen nur in bezug auf Bahnen mit einer Dicke über 1 mm, da im Bereich der Verpackungsindustrie bereits zahlreiche Untersuchungen an Kunststofffolien mit Dicken < 1 mm vorgenommen wurden.

Die Durchlässigkeit für Schadstoffe bezieht sich vor allem auf den diffusiven Transport der organischen Sickerwasserinhaltsstoffe (Becker & Stahl, 1981; August et al., 1984; August & Tatzky, 1984; Haxo, 1985; Haxo et al., 1985; Haendel, 1987). Gegen diese Schadstoffgruppen, im wesentlichen Kohlenwasserstoffe (KW) und chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW), weisen die polymeren Dichtungswerkstoffe wegen Ihrer chemischen Verwandtschaft eine mehr oder weniger große Durchlässigkeit auf. Die Permeation dieser Substanzen erfolgt über den dreistufigen Prozeß Absorption, Diffusion und Desorption. Diese Phänomene sind ausführlich von Parlman (1948 und 1949), Pinsky (1955 und 1957), Tu (1978) und speziell im Zusammenhang mit Fragen zur Abdichtung von Deponien von Haxo et al. (1982) und August et al. (1984) ausgiebig untersucht worden, was jedoch nicht bedeutet, daß die Diffusionsvorgänge und die sie bestimmenden Gesetzmäßigkeiten in allen Details als aufgeklärt gelten können. Besonders trifft dies für teilkristalline Polymere zu, zu denen auch die Polyethylene gehören, von denen einige Spezialtypen in der Deponieabdichtungstechnik eine herausragende Rolle spielen. In ihnen lösen sich die niedermolekularen Permeanten nur in den amorphen Bereichen, so daß die Diffusionsprozesse mikroskopisch in einem inhomogenen Medium verlaufen (Kamal et al., 1984) und sich dort weitgehend einer einfachen Beschreibung durch die Fickschen Gesetze entziehen (Eyerer & Wurster, 1984a und 1984b; Fleischer & Holstein, 1984). Eine weitere Komplizierung erfährt die Beschreibung der Permeationsvorgänge, wenn nicht die Permeation von einzelnen Stoffen, sondern von Schadstoffgemischen zur Diskussion steht oder/und es sich um mehrschichtige Kunststoffe oder andere Werkstoffverbunde handelt, wie im Falle der Kombinationsdichtung. So ändern sich die Permeationsraten für Permeantenmischungen gegenüber

denen für Reinstoffe nicht für alle Komponenten entsprechend ihrer verringerten Konzentration gleichmäßig, sondern neben dem integralen Fluß ändert sich in der Regel auch dessen Zusammensetzung (Eyerer & Wurster, 1984a und 1984b; August et al., 1984). In mehrschichtigen Barrieren mit konzentrationsabhängigen Löslichkeits- und Diffusionseigenschaften ist die Permeation richtungsabhängig (Rogers et al., 1957), d. h., um eine maximale Barrierewirkung zu erreichen, sollte sich die Schicht mit der niedrigsten Permeabilität auf der Einströmseite, also deponieseitig befinden.

Ideale, d. h. den Fickschen Gesetzen gehorchende Sperrsysteme der Dicke  $d$  können in ihrem Permeationsverhalten über die stationäre Permeationsstromdichte  $J_s$  als Produkt aus Diffusionskoeffizient  $D$  und Löslichkeit  $c$  wie folgt berechnet werden (Crank & Park, 1968):

$$J_s = \frac{P}{d} = \frac{D \cdot c}{d} \quad (7)$$

$D$  kann für solche Systeme aus dem instationären Verlauf integraler Sorptionsmessungen ermittelt werden, wenn die gemessene Massenveränderung über die Wurzel aus der Zeit eine Gerade ergibt (" $\sqrt{t}$ -Gesetz") und sich Sorptions- und Desorptionskurven in ihrem Verlauf decken. Für das System Toluol/PE-HD haben Eyerer & Wurster (1984a und 1984b) gezeigt, daß dies nicht der Fall ist. Damit ist eine quantitative Bestimmung von Diffusionskoeffizienten nicht möglich. Aus ähnlichen Gründen liefern Sorptionsmessungen keine aussagefähigen Daten, wenn mehrkomponentige Prüfmedien und/oder geschichtete Barrierewerkstoffe (Kunststoff/Kunststoff, Kunststoff/Erdstoff, Erdstoff/Erdstoff usw.) vorliegen. In diesen Fällen sind Permeationsmessungen vorzuziehen, um Systemdurchlässigkeiten zu ermitteln, die auch Wechselwirkungen der permeierenden Schadstoffe miteinander (Synergismen) berücksichtigen. Diese Dinge werden häufig bei der Entwicklung von Rechenmodellen, um die Schadstoffmigration in Bodenschichten nachzubilden, nicht ausreichend berücksichtigt, und Ergebnisse für Einstoffsysteme werden nicht selten unkritisch, also ohne die notwendigen Einschränkungen auf Deponieverhältnisse übertragen.

Tabelle 1

Permeationsraten, 9-Komponenten-KW/CKW-Gemisch durch eine 2,3 mm dicke PE-HD Bahn gegen angrenzendes Wasser.

	Gemisch-Komponente *)	Permeationsrate (g/m <sup>2</sup> d)	
p			SUMME
o	Aceton	0,5	2,46
l	Tetrahydrofuran	1,9	
a	Methanol	0,06	
r			
u	i-Octan	(-)	SUMME
n	Trichlorethylen	0,7	1,89
p	Tetrachlorethylen	0,15	
o	Toluol	0,5	
l	Xylol	0,15	
a	Chlorbenzol	0,39	
r			
	KW/CKW-Gemisch	4,35	

\*) Anteil jeder Komponente: 11,11 Gew.% (flüssiges Gemisch aus 9 Reinsubstanzen; wasserfrei) Konzentrationen "deponieseitig" während des Versuches konstant

Die Tabelle 1 zeigt die Permeationsraten eines KW/CKW-Gemisches durch eine PE-HD-Dichtungsbahn, dessen Zusammensetzung auch unter dem Gesichtspunkt, daß synergistische Effekte die Permeation bestimmter Stoffe begünstigen können, gewählt wurde (August et al., 1984). Während bei Abdichtungsmaßnahmen im allgemeinen in Abhängigkeit von der Polarität der niedermolekularen KW/CKW und deren Molekülgrößen eine Permeation berücksichtigt werden muß, ist beispielsweise bei PE-HD wegen seines unpolaren Charakters mit einem wesentlichen Durchgang von Wasser (Kamal et al., 1984; Lawson & Ingles, 1984) bzw. von in Wasser gelösten anorganischen Substanzen nicht zu rechnen. August et al. (1992) berichten über mehr als 4 Jahre dauernde Langzeitversuche, in denen auf eine nur 1 mm bzw. 2,3 mm dicke Polyethylenabdichtungsbahn (PE-HD) hochkonzentrierte wäßrige, auf pH-Wert 1-2 angesäuerte Lösungen von Schwermetallsalzen (Zn<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> 0,5 molar) einwirkten, während auf der Rückseite der Dichtung sich klares, angesäuertes Wasser befand. Ein Durchwandern der Schwermetallionen konnte nicht nachgewiesen werden (Analyseverfahren: Plasmaemissionsspektalanalyse ICP-OES), so daß die PE-HD-Dichtungsbahn nahezu als ideale Sperre für Schwermetallionen gelten kann.

Polyethylenabdichtungsbahnen gelten wegen ihres unpolaren Aufbaus als "absolut" dicht gegen das stark polare Wassermolekül. Entsprechend werden PE-Bahnen für Wasserhaltungsmaßnahmen oder auch als Wasserdampfsperre im Bausektor eingesetzt. Diese Aussage ist uneingeschränkt richtig, sofern man als Transportprozesse für das Wasser lediglich Strömungsvorgänge betrachtet. Untersucht man diese "absolute" Dichtigkeit genauer, indem man in die eine Hälfte einer Doppelzelle Wasser einfüllt, während in der anderen Hälfte, durch eine PE-HD-Bahn getrennt, ein stark wasserabsorbierendes Mittel, z. B. Silicagel, den Wasserdampfdruck nahe bei null hält, so ergibt sich bei 20 °C eine Restdurchlässigkeit für die als "dicht" geltende Dichtungsbahn von ca. 0,1 Gramm Wasser pro m<sup>2</sup> Dichtungsfläche und Tag Einwirkungszeit. Die Untersuchungen zur Permeation von Wasser durch eine 2,3 mm Polyethylenabdichtungsbahn (Hostalen GM 5040 T12) wurden bei erhöhten Temperaturen (40 °C, 60 °C und 80 °C) durchgeführt. Die Zunahme der Wasserpermeation als Funktion der Temperatur ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Messungen zeigen, daß unter den beschriebenen Versuchsbedingungen der Durchgang von Wasser durch eine 2,3 mm dicke PE-HD-Bahn oberhalb von 50 °C deutliche Permeationsraten aufweist.

Tabelle 2

Permeation von Wasser durch eine 2,3 mm dicke PE-HD-Dichtungsbahn in Abhängigkeit von der Temperatur (August et al., 1992).

Temperatur (°C)	Permeationsrate von Wasser 2,3 mm PE-HD (g/m <sup>2</sup> d)
0	0,038
10	0,058
20	0,090
30	0,140
40	0,21 *)
50	0,330
60	0,49 *)
70	0,7
80	1,05 *)

\*) gemessene Werte

Bei der Anwendung dieser Ergebnisse auf Deponieverhältnisse ist zu berücksichtigen, daß die Werte nur für den Fall gelten, daß auf der Oberseite der KDB Wasser ansteht, während auf der Unterseite der Wasserdampfdruck nahezu gleich null ist, d. h. der angrenzende Erdstoff völlig trocken ist.

### 3.2 Untersuchungen an Dichtungen aus dem Werkstoffverbund Erdstoff – Polymerwerkstoff

In einem Forschungsbericht von August et al. (1992) wird über Schadstoffpermeationsmessungen berichtet, die aus Untersuchungen an Verbunddichtungen mit den Komponenten Kunststoffdichtungsbahn und Erdstoffdichtung an 20 Meßzellen in Laborversuchen gewonnen wurden. Die Ergebnisse basieren auf Langzeitversuchen, die, aufbauend auf Vorversuchen aus den Jahren 1983/84, seit Ende 1985 bis heute laufen.

Tabelle 3

Permeationsraten, 9-Komponenten-KW/CKW-Gemisch durch eine 1 mm dicke PE-HD Bahn auf 16 cm Ton gegen Wasser.

	Gemisch-Komponente *)	Permeationsrate (g/m <sup>2</sup> d)	
P o l a r	Aceton	0,831	SUMME  2,705
	Tetrahydrofuran	1,149	
	Methanol	0,725	
u n p o l a r	i-Octan	(-)	SUMME  0,005
	Trichlorethylen	0,0011	
	Tetrachlorethylen	0,0008	
	Toluol	0,002	
	Xylol	0,0002	
	Chlorbenzol	0,0009	
	KW/CKW-Gemisch	2,71	

\*) Anteil jeder Komponente: 11,11 Gew.% (flüssiges Gemisch aus 9 Reinsubstanzen; wasserfrei) Konzentrationen "deponieseitig" während des Versuches konstant

Untersuchungen von Anderson (1982) an tonmineralischen Dichtungen machten den Einsatz der mineralischen Dichtung als alleinige Dichtung fragwürdig. Ähnliches galt aber auch für die Kunststoffdichtungsbahn, die bei sehr geringer Dicke einerseits anfällig ist gegen wenig definierte Baustellenbelastungen und andererseits entgegen den Vorstellungen in den 70er Jahren, wie oben ausgeführt, keine absolute Sperre gegen alle Sickerwasserinhaltsstoffe darstellt.

Bereits eine gegenüber einer realen Kombinationsdichtung stark unterdimensionierte Kombinationsdichtung im Labormaßstab (1 mm dicke PE-HD-Bahn

auf 16 cm Ton) zeigt gegenüber der reinen 2,3 mm dicken PE-HD Bahn (Tabelle 1), insbesondere gegen die chlorierten KW, eine hervorragend verbesserte Sperrwirkung, wie die in Tabelle 3 zusammengestellten Permeationsraten zeigen. Die noch relativ hohen Raten für die polaren Anteile des Schadstoffgemisches gehen bei größerer Dimensionierung der Kombinationsdichtung (2,3 mm dicke PE-HD-Bahn auf 30 cm bzw. 60 cm dicker Erdstoffdichtung) ebenfalls deutlich zurück (August et al., 1985a und 1985b; August et al., 1992).

Sämtliche von August et al. (1992) vorgestellten Dichtungen (2,3 mm dicke PE-HD-Bahn im Verbund mit verschiedenen Erddichtungsstoffen in den Schichthöhen 8 cm, 16 cm, 30 cm, 60 cm und 20 + 25 cm [doppelte Kombinationsdichtung]) haben nach Laufzeiten von bis zu 4,5 Jahren bezüglich des 9-Komponenten-Gemisches noch nicht den stationären Zustand erreicht, so daß die gemessenen Schadstoffraten noch nicht endgültig sind. Auch wenn bis zum Erreichen des stationären Zustandes noch ein geringfügiger Anstieg der Permeationsraten zu erwarten ist, so ist dies jedoch für die praktische Anwendung nur von geringer Bedeutung, da es unwahrscheinlich erscheint, daß auf einer Deponie über Jahre hinaus bestimmte Schadstoffe in hohen Konzentrationen angeboten werden. Zur Übertragung der mit hohen KW/CKW-Konzentrationen gewonnenen Laborergebnisse werden von August et al. (1992) zwei streng konservativ durchgeführte Abschätzungen für die Fälle "hohe Schadstoffkonzentrationen bei zeitlich begrenzter Einwirkungsdauer" und "reale Schadstoffkonzentrationen bei unbegrenzter Einwirkungsdauer" durchgeführt. Für den ersten Fall werden unter der Voraussetzung eines konstanten Schadstoffangebotes ungefähre Induktionszeiten für eine 120 cm dicke Kombinationsdichtung von 18 Jahren, bis die polaren, und von 66 Jahren, bis die unpolaren Schadstoffe in meßbaren Mengen auf der Rückseite feststellbar sind, genannt. Es wird ausgeführt, daß ein Schadstoffangebot wie in den beschriebenen Experimenten auf einer Deponie nur punktuell und zeitlich auf einige Jahre begrenzt vorstellbar ist, so daß die genannten Zeiträume insofern nicht realistisch erscheinen, da es bereits zu früheren Zeitpunkten zu einer teilweisen Rückdiffusion aus der Dichtung in den Deponiekörper bis zum Konzentrationsausgleich kommen dürfte. Das bedeutet, daß eine 120 cm starke Kombinationsdichtung praktisch als absolut dicht gegen die genannte Schadstoffbeaufschlagung bezeichnet werden kann.

Für den zweiten Fall werden von den Verfassern auf der Basis der von Ehrig et al. (1988) angegebenen maximalen Schadstoffkonzentrationen in Sickerwässern – unter der Annahme, daß die Sickerwasserzusammensetzung sich über lange Zeiträume bezüglich der Art und Konzentration der Komponenten nicht ändert – eine Schadstoffrate für die 120 cm dicke Kombinationsdichtung von  $J_{KW+CKW} = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ g/(m}^2\text{d)}$  aus der ebenfalls konservativ durchgeführten Abschätzung angegeben. Auch in diesem Fall erscheint es den Verfassern

unwahrscheinlich, daß über Jahrzehnte stets Sickerwässer gleicher KW/CKW-Zusammensetzung deponie-seitig angeboten werden, so daß es auch hier mit einiger Sicherheit zur Rückdiffusion einzelner Stoffgruppen innerhalb der oben genannten Zeiträume kommen wird.

#### **Weitere Untersuchungen an Dichtungen aus dem Werkstoffverbund Erdstoff – Polymerwerkstoff**

Mit den 1983/84 begonnenen Untersuchungen von August et al. (1985b und 1992) zum Schadstoffsperrverhalten von Werkstoffverbunden aus Kunststoffdichtungsbahnen und Erdstoffen wurde Neuland betreten. Weder gab es bis dahin experimentelle Untersuchungen zu dieser Thematik, noch lagen für Deponiedichtungen Praxiserfahrungen mit Werkstoffverbunden vor, wie das beispielsweise für Lebensmittelverpackungen der Fall ist, wo durch Coextrusion hergestellte Folienverbunde, z. B. zur Rückhaltung von Sauerstoff und Kohlendioxid, bereits seit Jahren eingesetzt wurden (Mathieu, 1988).

Untersuchungen mit dem Ziel, Deponieabdichtungen hinsichtlich ihrer Sperrwirkung zu optimieren, wurden auch von Glück et al. (1985) in Anlehnung an die Versuche von August et al. (1985b und 1992) begonnen. Diese wurden jedoch nach einer Dauer von nur 3000 Stunden abgebrochen. Als Permeent, mit dem die Dichtung beaufschlagt wurde, diente das durch die Kombinationsdichtung schwer diffundierende Lösemittel Trichlorethylen. Der stationäre Zustand der Meßzelle konnte mit der kurzen Laufdauer der Versuche nicht erreicht werden. Damit mußte auf die Angabe von Permeationsraten verzichtet werden, jedoch konnte durch die Versuche von Glück et al. (1985) deutlich gemacht werden, daß das Lösemittel Trichlorethylen um Größenordnungen langsamer durch die Kombinationsdichtung wandert als durch eine Kunststoffdichtungsbahn von 2-3 mm Dicke als einzige Sperre.

Neben diesen Untersuchungen ist von Paßmann (1990) der Versuch unternommen worden, mit dem Permeenten Trichlorethylen (gesättigt in Wasser) die Restdurchlässigkeit von Kombinationsdichtungen in Kurzzeitversuchen über nur 9 Wochen zu erkunden. Gewählt wurde eine kornabgestufte mineralische Dichtung (Fuller-Kurve, bis 16 mm Korngröße + 25 % Tonmehl, k-Wert ca.  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s). Während der Versuche in Prüftöpfen mit 254 mm Durchmesser wurden die 2,5 mm dicken Dichtungsbahnen aus ECB und PE-HD mit einer biaxialen Verformung von 10 % (!) beaufschlagt, um nach Meinung des Verfassers Folgen üblicher Setzungen in der realen Deponie zu simulieren. Bei der Vorbereitung der Oberfläche der mineralischen Dichtung, auf die die Kunststoffdichtungsbahn aufgelegt werden sollte, wurde, um "praxisnahe Bedingungen" zu simulieren, die obere Schicht mit Quarzsand/Quarzkies angereichert und zusätzlich mit "einem harten, feuchten Besen abgefegt". Dies hatte zur Folge, daß sich zumindest für die etwas steifere, fest eingespannte PE-HD-Bahn kein inniger Verbund zwischen Kunst-

stoffdichtungsbahn und mineralischer Oberfläche ausbilden konnte. Da somit in diesem Fall de facto kein Werkstoffverbund im Sinne des Preßverbundes (= Planlage der KDB auf dem Erddichtungsstoff unter Auflast) erreicht wurde, wird hier auf eine Diskussion der Versuchsergebnisse verzichtet.

### **3.3 Wechselwirkung der Schadstoffe mit der mineralischen Dichtungskomponente an der Grenzfläche zur Kunststoffdichtungsbahn**

Von Kohler (1990) wird über chemisch-physikalische Untersuchungen des Redoxmilieus an der Grenzfläche von Kombinationsdichtungen berichtet. Durch den dichten Verbund von PE-HD-Kunststoffbahnen und mineralischer Dichtung in Kombinationsdichtungen kommt es an der Kontaktfläche zu einem Ausschluß des Sauerstoffs oder zumindest zu einer Verringerung von dessen Konzentration, wodurch eine Verschiebung des  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ -Verhältnisses im Ton bzw. im mineralischen Bindemittel eintreten kann. Trotz der relativ geringen Zahl der von Kohler (1990) untersuchten Bodenproben wird zweifelsfrei festgestellt, daß es in der Grenzfläche zwischen Kunststoffdichtungsbahn und mineralischem Dichtungselement zur Ausbildung einer schmalen reduzierenden Zone kommt. Die Ausbildung eines reduzierenden Milieus wird immer dann deutlich feststellbar sein, wenn eisenschüssige Bindemittel vorhanden sind, wenn also die Reduktion von dreiwertigem Eisen zu zweiwertigem Eisen zu meßbaren Veränderungen führt. Selbst in Böden, in denen nur geringe Anteile eisenschüssiger Bindemittel nachweisbar sind, ist mit Reduktionsmechanismen zu rechnen. Als Folge dieser chemischen Umsetzung wird vor allem das Quellvermögen der Tonminerale verändert. Quellfähige Tone aus der Smektitgruppe bzw. Wechsellagerungsminerale lagern Wassermoleküle in den Zwischenschichten ein und geben dieses Wasser je nach Schichtladung und Elektrolytführung des freien und/oder gebundenen Porenwassers ganz oder teilweise wieder ab. Nach der Reduktion von oktaedrischem  $Fe^{3+}$  ist mit einer Abnahme des Quellvermögens und einem Auspressen von Zwischenschichtwasser in die Porenräume zu rechnen. Endgültige Schlußfolgerungen können aber auf Grund der geringen Probenzahl, die untersucht wurde, nicht gezogen werden.

Der an der Grenzfläche entstehende dünne Film reduzierter Tonminerale hebt sich in seiner physikalisch-chemischen Wirkung sowohl von der Kunststoffdichtungsbahn als auch von dem nicht oder noch nicht reduzierten mineralischen Dichtungselement ab. Diese sensibilisierte Zwischenzone wird unter der Wirkung einer chemischen und/oder mechanischen Grenzbelastung aktiviert. Im Schadensfall wirkt diese Zwischenfläche als Gleitmittel. Dabei spielt es keine Rolle, ob in den gequollenen bzw. aktivierten Ton-

mineralien zusätzlich noch anorganische oder organische Sickerwasserbestandteile vorhanden sind, die durch Diffusionsmechanismen oder gar durch einen Schadensfall die Kunststoffdichtungsbahn passiert haben. Für die Deponiepraxis werden aus diesem Sachverhalt nach Kohler (1990) zwei grundlegende Forderungen abgeleitet:

- 1) An der Grenzfläche zur Kunststoffdichtungsbahn sollten nach Möglichkeit schrumpf- und quellunempfindliche Materialien eingesetzt werden, die keine hohen Anteile an eisenschüssigen Bindemitteln besitzen.
- 2) Kombinationsdichtungen sollten nur an der Deponiebasis bzw. bei geringer Neigung eingesetzt werden. Böschungsbereiche sind zu meiden.

Ob bei der deponietechnischen Realisierung einer Kombinationsdichtung grundsätzlich auf die Verwendung von quell- und schrumpfungempfindlichen Materialien verzichtet werden soll, hängt im hohem Maße von mechanischen Kriterien ab. Es wäre zu überprüfen, ob eine 10 - 20 cm mächtige Grenzschicht aus unempfindlichem Dichtungsmaterial ein gangbarer Weg wäre, und zwar nicht nur im Hinblick auf die sich aufbauende Reduktionszone, sondern auch hinsichtlich der zu erwartenden Austrocknungsphänomene in Kombinationsdichtungen, siehe Kapitel H. Eine Realisierung derartiger Lösungsvorschläge bedarf vor allem der geomechanischen Überprüfung.

## 4 Sorption, Abbau und Verdünnung

Die negative Ladung der Tonminerale ist durch adsorbierte Kationen ausgeglichen. Werden von Schadstofflösungen andere Kationen – z. B. Schwermetallionen – angeboten, so kommt es zu einem Kationenaustausch, der aus Adsorption und Desorption besteht, Scheffer & Schachtschabel (1989). Der Anionenaustausch ist von geringerer praktischer Bedeutung. Neutrale Moleküle können ebenfalls adsorbiert werden.

Die Sorption hat zweierlei Wirkung: sie verändert den Boden, siehe Kapitel K, und sie beeinflusst die diffusive Transportrate. Hinsichtlich der Zurückhaltung ist von Bedeutung, ob es sich um eine Chemiesorption handelt, die von Wienberg (1990) als "unter Umweltbedingungen irreversibel" eingestuft wird, oder um eine schwächere Bindung. In diesem Fall würde die Sorption nur eine zeitliche Streckung bedeuten. Grundsätzlich dürfte klar sein, daß die absolut adsorbierbare Menge begrenzt ist. Wenn also aus der Deponie wesentlich mehr Schadstoffe in die Dichtungsschicht wandern als sorbiert werden können, dann ist ebenfalls nur eine zeitliche Verzögerung erreicht.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Schadstoffdurchgangs besteht im allmählichen Abbau

Die Ergebnisse sind jedoch ein Hinweis, sowohl auf der Seite der Grundlagenforschung an Tonmineralien weitere Untersuchungen durchzuführen, als auch auf geomechanischer Seite zu erkunden, wie eventuelle Nachteile durch eine nicht auszuschließende Gleitebenenbildung in der Grenzschicht KDB – mineralische Dichtung sich bautechnisch, beispielsweise durch den Einsatz strukturierter Bahnen, kompensieren lassen.

Für den Fall, daß die Probleme bautechnisch zu meistern sind, erscheint auch die Frage interessant, wie das reduzierende Milieu in der Grenzschicht eventuell gezielt konservierend für die Kunststoffdichtungsbahn genutzt werden kann, um so aus dem vermeintlichen Nachteil der schmalen Reduktionsfront einen Vorteil zu machen. Da in der beschriebenen Zone jeder oxidative Abbau polymerer Werkstoffe praktisch ausgeschlossen ist, könnte es bei Bestätigung und Nutzung dieser Effekte zukünftig zu entscheidend erweiterten Aussagen über die Langzeitbeständigkeit polymerer Baustoffe in der Deponieabdichtungstechnik kommen. Dies aber wäre eine Entwicklung, die der Empfehlung von Kohler (1990), in der Grenzschicht schrumpf- und quellunempfindliche Erdstoffe einzusetzen, die möglichst keine hohen Anteile an eisenschüssigen Bindemitteln aufweisen, entgegenläuft.

Hier besteht interessanter Forschungsbedarf und eine Herausforderung an die Ingenieure, diese Effekte zukünftig beim Bau von Deponieabdichtungen vorteilhaft konstruktiv zu nutzen.

von Schadstoffen. Für radioaktive Stoffe gibt es Halbwertszeiten für den Zerfall. Analog hierzu beschreibt man die Stoffabbau- und Umwandlungsprozesse durch eine "Zerfallsgleichung", Schneider und Tietze (1987). Schneider & Göttner (1991) geben für eine Reihe von organischen Chemikalien ungefähre Schätzwerte für Halbwertszeiten an.

Metallionen können nur unschädlich werden, wenn sie in chemischen Verbindungen immobilisiert sind. Organische Schadstoffe können durch chemische oder mikrobielle Umwandlungs- und Abbauprozesse ihre Giftigkeit verlieren. Dieser Abbau besteht in der "Metabolisierung in biologisch nicht mehr wirksame Metaboliten", Scheffer & Schachtschabel (1984). Die "Persistenz", die Zeit, in der 75 % bis 100 % der Schadstoffe abgebaut sind, quantifiziert diesen Abbau. Man unterscheidet vier Persistenzklassen von "1 bis 12 Wochen" bis "über 2 Jahre". Erfahrungen liegen für Pflanzenschutzmittel, wie sie in der Landwirtschaft verwendet werden, vor.

Die Schadstoffe, die nicht nennenswert abgebaut werden, verbreiten sich in der Umwelt mehr oder weniger schnell, wenn sie einmal die Deponieabdichtung passiert

haben. Die Schadstoffrate sollte hierbei so gering sein, daß der umgebende Boden und das Grundwasser nicht beeinträchtigt werden. Maßstäbe, wann eine "Beeinträchtigung" beginnt, fehlen allerdings. Da auch bei niedriger Schadstoffrate die Schadstoffe sich über längere Zeiten in gefährdender Menge – an bestimmten Orten, z. B. im Meer – anreichern können, müßte auch die Gesamtmenge der zu erwartenden Emission berücksichtigt werden.

## 5 Experimentelle Bestimmung von Transportparametern in Erdstoffen

### Untersuchungen

Das Ziel von Laborversuchen sollte sein, die einzelnen Koeffizienten in Gleichung (1) zahlenmäßig zu bestimmen. Degen & Hasenpatt (1988) beschreiben Ionen-Diffusionsversuche an einer zylindrischen Tonprobe. Da die Sorption erst nach einem sehr langen Zeitraum abgeschlossen wäre, den man im Versuch nicht abwarten will, wird er vorzeitig abgebrochen. Aus dem gemessenen Konzentrationsprofil über der Probe wird mit Gleichung (5) auf  $D_{app}$  zurückgeschlossen. Auf diese Weise kann man Diffusion und Sorption nur unter Verwendung eines Rechenmodells voneinander trennen.

In vielen Arbeiten wie z. B. der von Acar et al. (1985) wird der Einfluß der Diffusion bei Durchströmungsversuchen untersucht. Hierbei sind die Einflüsse von Diffusion, Dispersion und Advektion nur schwer zu trennen.

Czurda & Wagner (1988) untersuchen die Verlagerung verschiedener Schwermetalle Cd, Cr, Cu, Pb, Zn in acht unterschiedlichen Tongesteinen, von denen der größte Teil als mineralisches Abdichtungsmaterial geeignet ist. Es werden Schüttelversuche, Diffusionsversuche, Durchlässigkeitsversuche und Durchströmungsversuche durchgeführt, aus denen die Transportparameter: apparente Diffusionskoeffizienten, Durchlässigkeitsbeiwerte und Retardationsfaktoren ermittelt werden.

Rowe et al. (1988) führen ebenfalls Säulenversuche mit instationärem Diffusionsprozeß durch. Durch geschickte Wahl der Randbedingungen können die Autoren Diffusionskoeffizient und Verteilungskoeffizient (Sorption) unter Anwendung eines Rechenmodells voneinander getrennt ermitteln. Die hierfür notwendige Annahme der linearen Sorption wurde durch Schüttelversuche verifiziert. Meßgrößen sind: die zeitliche Veränderung der Schadstoffkonzentration im Wasser der Anströmseite, der advective Fluß und die Schadstoffkonzentration über die Probenhöhe bei Abbruch des Versuchs. Durch einen Vergleichsversuch ohne Advektion konnte nachgewiesen werden, daß bei realistischen Durchströmungsgeschwindigkeiten im

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Sorption eher für die Ausbreitung im Deponieuntergrund von Wichtigkeit ist. Für die Langzeitfunktionsfähigkeit der Abdichtungsschicht sind nach heute vorherrschender Expertenmeinung sorbierende Eigenschaften nicht erforderlich, UBA (1992).

untersuchten tonigen Lehm ( $w_t = 39\%$ ,  $w_p = 12\%$ ) die Dispersion keinen Einfluß auf den im Versuch bestimmten Diffusionskoeffizienten hatte. Für die effektive Diffusivität  $D^*$ , siehe Gleichung (3), und für das Sorptionsmaß  $\rho \cdot k$ , siehe Gleichung (2), wurden für  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{K}^+$  Zahlenwerte ermittelt. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, daß offenbar der gesamte wassergefüllte Porenraum an der Diffusion teilnimmt.

Shackelford & Daniel (1991b) untersuchen die effektive Diffusivität und Sorptionseigenschaften von zwei Erdstoffen: Kaolinit und smektitischem Ton. Es wird ein simuliertes Sickerwasser mit den Ionen  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  verwendet. Die Konzentrationen lagen für jeden Stoffanteil zwischen 300 und 1500 mg/l. Die Inhaltsstoffe wurden so ausgewählt, daß sie sowohl nicht reaktive Tracer als auch reaktive Elemente umfassen. Die Sorption wird mit Schüttelversuchen untersucht, die Diffusionseigenschaften anhand einer nicht durchströmten Bodenprobe, die mit einer Schadstofflösung überstaut wird. Vor Aufgabe der Schadstofflösung wird der Erdstoffprobe Gelegenheit gegeben, sich mit Wasser aufzusättigen, damit jegliche Konvektion ausgeschlossen ist. Aus der zeitlichen Abnahme der Schadstoffkonzentration und der räumlichen Verteilung der adsorbierten Menge in der Bodensäule wird die effektive Diffusivität bestimmt. Hierzu werden Rechenmodelle verwendet.

Zur Bestimmung der Diffusionsparameter sind grundsätzlich Labor- und Feldversuche möglich. Schneider & Göttner (1991) halten Feldversuche für zuverlässiger, weil sie die großräumliche Variabilität des Untergrundes miteinfassen. Das ist besonders für den Deponieuntergrund wichtig. In einem Feldversuch wurden über 2 Jahre lang verschiedene in Wasser gelöste Prüfsubstanzen versickert, Schneider & Göttner (1991). Es wurden mit Br, Li und Cd nicht adsorbierende, schwach adsorbierende und adsorbierende Stoffe gewählt. Die Konzentration in den Infiltrationsbecken betrug für Bromid 1000 - 4000 mg/l und für Lithium 20 - 70 mg/l. Es steht ein ausgeprägt plastischer Ton mit  $I_p = 0,3$  an. Er besteht zu 67 % aus Korngrößen  $< 2 \mu\text{m}$  und zu 30 % aus  $2 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m}$ . Die zeitliche und räumliche Ausbrei-

tung der Prüfsubstanzen im Untergrund wurde gemessen. Mit Hilfe von parallel durchgeführten Berechnungen wurden die relevanten Transportkenngrößen bestimmt.

In den beiden Meßfeldern ergaben sich Porenwassergeschwindigkeiten von  $v = 0,027$  cm/d bzw.  $0,043$  cm/d und folgende Diffusions/Dispersionskoeffizienten von  $D = 0,548$  cm<sup>2</sup>/d bzw.  $0,884$  cm<sup>2</sup>/d.

## Ergebnisse

Nach Schneider & Göttner (1991) kann man diejenigen Transportparameter gut im Labor bestimmen, die in erster Linie von den Mikrostrukturen abhängen. Hierzu gehören Diffusionskoeffizienten, Fällungs- und Komplektierungsreaktionen und mit Einschränkungen Dispersionskoeffizienten. Die Adsorption kann man im Labor an Bodensäulen bestimmen; bei Schüttelversuchen erhalten die Autoren jedoch für Bromid, Lithium und Cadmium viel größere Werte für die Sorption als aus der rückgerechneten, im Feld gemessenen Ausbreitung. Czurda & Wagner (1988) messen mit Schwermetallionen ebenfalls im Durchströmungsversuch viel niedrigere Retardationsfaktoren als aus Schüttelversuchen errechnet. Als Ursache weisen die Autoren auf eine Reihe von Parametern hin, die bei den beiden Versuchstypen nicht gleich sind. Rowe et al. (1988) stellen dagegen für und Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> und K<sup>+</sup> eine gute Übereinstimmung zwischen dem in Schüttelversuchen bestimmten Wert und dem aus der rückgerechneten Ausbreitung in der Bodensäule fest. Auch Shackelford & Daniel (1991b) benutzen Schüttelversuche um die Sorptionsparameter zu bestimmen. Nach Schneider & Göttner (1991) wird wahrscheinlich die Menge der langfristig fixierten Schadstoffe aufgrund von kurzzeitigen Laborversuchen unterschätzt. Der konvektive Transport wird weitgehend von den Makroporen in der Dichtungsschicht bestimmt. Man erhält deshalb im Labor zu geringe Durchlässigkeiten, siehe Kapitel J.

Nach Schneider & Göttner (1991) ist für Filtergeschwindigkeiten kleiner als  $10^{-10}$  m/s der konvektive Stofftransport kleiner als der diffusive. In Deponieabdichtungen ist meistens der Einfluß der Dispersion auf die Diffusion vernachlässigbar. Erst für Porenwassergeschwindigkeiten von  $v > 6,5 \cdot 10^{-9}$  m/s könnte die Dispersion größer sein als die Diffusion, Schneider & Göttner (1991). Hiermit stimmt die Aussage von Rowe et al. (1988) überein, nach der für  $v \leq 0,035$  m/a ( $= 1,1 \cdot 10^{-9}$  m/s) die Dispersion vernachlässigbar ist.

Unterschiedlich wird die Frage nach der Linearität der Sorption beurteilt. Während Rowe et al. (1988) für die hohe Konzentration von 900 mg/l K<sup>+</sup> Linearität feststellen, zeigen die gemessenen Adsorptions-

isothermen von Shackelford & Daniel (1991b) für den gleichen Stoff schon bei niedrigerer Konzentration deutlich einen nichtlinearen Verlauf. Für Cadmium ist die Nichtlinearität noch stärker ausgeprägt. Nach Schneider & Göttner (1991) muß bei Konzentrationen, wie sie im Sickerwasser auftreten, die Nichtlinearität berücksichtigt werden, weil sonst das Adsorptionsvermögen überschätzt wird.

## Zahlenwerte

Shackelford & Daniel (1991a) geben Diffusionskoeffizienten sowohl für verschiedene Einzelionen als auch für einige "repräsentative einfache Elektrolyte" (wie z. B. HCl, NaBr usw.) in Wasser an. Sie haben ferner aus der Literatur Impedanzwerte  $\gamma$  für verschiedene Erdstoff-Abdichtungsmaterialien zusammengestellt, die zwischen 0,01 und 0,84 liegen. In den GDA-Empfehlungen (1993) ist der Bereich  $0,02 > \gamma > 0,6$  für technisch unbehandelte Tone angegeben. Shackelford & Daniel (1991b) erhalten für gestörte, verdichtete Tonproben Impedanzwerte von 0,24 bis 0,53.

Shackelford (1991) stellt Werte von effektiven Diffusionskoeffizienten zusammen, die von verschiedenen Autoren mit verschiedenen Methoden ermittelt wurden. Die Werte liegen zwischen 0,1 und  $25 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Shackelford und Daniel (1991b) bestimmten für verdichtet eingebaute Proben aus Kaolinit und smektitischem Ton effektive Diffusionskoeffizienten von 4 bis  $20 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s für eine Reihe von anorganischen Chemikalien. Physikalische Faktoren, wie der Einbauwassergehalt, haben zwar einen Einfluß auf die Advektion; sie beeinflussen jedoch diffusive Prozesse kaum. Die von Rowe et al. (1988) und Schneider & Göttner (1991) angegebenen effektiven Diffusivitäten liegen im selben Wertebereich.

Shackelford und Daniel (1991b) geben Retardationsfaktoren R (siehe Gleichung (2)) von etwa 2 bis 4 für Cadmium, Zink und Kalium in Kaolinit an. Ähnliche Zahlenwerte haben Rowe et al. (1988) in tonigem Lehm bestimmt. Nach beiden Arbeiten werden die Anionen Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> gar nicht adsorbiert. Czurda & Wagner (1988) ermittelten für Schwermetalle in verschiedenen Tongesteinen Retardationsfaktoren zwischen 1 und 70. In smektitischem Ton waren in den Versuchen von Shackelford & Daniel (1991b) die Retardationsfaktoren um fast eine Größenordnung höher als im Kaolinit. Schneider & Göttner (1991) haben umfangreiches Material bezüglich Wasserlöslichkeit, Sorptionsparameter, Abbau und Toxizität der bei Bodenkontamination häufig auftretenden organischen und anorganischen Stoffe zusammengestellt. Zur Sorption von Organika durch organisch-chemisch modifizierte Tone siehe Kapitel K.

## 6 Rechenverfahren

Ziel aller Abdichtungsmaßnahmen ist die Minimierung des Schadstofftransports in die Umgebung. Die Vorschriften sollten deshalb einen rechnerischen Nachweis fordern, der zeigt, daß die beim vorgesehenen Bauentwurf zu erwartende Emissionsrate unter einem festgelegten Maximalwert liegt. So weit ist die Entwicklung allerdings noch nicht: Die TA Sonderabfall sucht indirekt dieses Ziel zu erreichen, indem an die empfohlene Bauart "Kombinationsdichtungen" eine Reihe von Qualitätsanforderungen gestellt werden. Für mineralische Abdichtungen gibt es jedoch anwendbare Verfahren zur Berechnung des Schadstofftransports, die sich für den bisherigen Erfahrungszeitraum von einigen Jahren Einwirkungsdauer bewährt haben.

Rowe & Booker (1984) haben ein Rechenverfahren für den Schadstofftransport durch ein Schichtpaket entwickelt. Zugrunde liegt eine ähnliche Differentialgleichung wie Gleichung (1). Das Schichtpaket wird in ausreichend dünne Schichten zerlegt, so daß dort jeweils konstante Koeffizienten angenommen werden können. Die Autoren demonstrieren ihr Rechenverfahren an einem hypothetischen Beispiel einer Deponie, die sich auf einer 4 m dicken Tonschicht über einer mit Grundwasser durchströmten Schicht befindet. Es besteht eine Druckhöhendifferenz von 1 m zwischen Deponieinnern und Umgebung. Die Deponie hat einen endlichen Schadstoffinhalt. In Form einer Parametervariation wird der Einfluß der Bodenkenngrößen auf die Konzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Zeit gezeigt. Der Vorgang ist zu Ende, wenn der gesamte Schadstoffinhalt die Deponie verlassen hat. Die Güte der Abdichtung wird daran gemessen, wie gleichmäßig sie die Schadstoffbelastung in der Umwelt zeitlich – und über den Grundwasserstrom auch örtlich – zu verteilen vermag. Eigentlich wäre es dann konsequent, die produzierte Schadstoffmenge über der Erdoberfläche örtlich und zeitlich gleichmäßig verteilt zu "verregnen". Damit wäre zwar eine niedrige Schadstoffrate erreicht; die Gesamtmenge des Schadstoffaustrags würde sich jedoch nur bei Schadstoffabbau verringern. Diese Strategie steht im Widerspruch zu der TA Abfall, nach der die Schadstoffe konzentriert und eingeschlossen werden sollen.

## 7 Aufgrabungen, praktische Folgerungen

Bracke et al. (1991) berichten über geochemische Veränderungen in der Tonabdichtung der Deponie Geldern-Pont nach 8jähriger Betriebszeit. Obwohl die 50 cm dicke Tonschicht in ihrer Gesamtheit offenbar noch nicht durchströmt wurde, hatte sich über das gesamte Profil organische Substanz, aus dem Sickerwasser herrührend, angereichert. Die Veränderung der Tonminerale war etwa auf die obere Hälfte der Dichtungsschicht beschränkt. Ferner wurde die Verlagerung von Schwermetallen nach unten – am

Rowe (1988) zeigt an einigen Beispielen die Wichtigkeit der Rechenmodelle für die Abschätzung des Schadstoffaustrags. Es werden die verschiedenen Transportmechanismen berücksichtigt. Schon zur Bestimmung der Transportkennwerte wird die Anwendung von Rechenmodellen empfohlen.

Finsterwalder (1988) führt Rechnungen ähnlicher Art durch. Der Schadstoffaustrag von Metallionen, insbesondere Schwermetallionen, wird für verschiedene rein mineralische Abdichtungssysteme untersucht. Die Zahlenwerte für die für das Rechenverfahren notwendigen Kenngrößen wurden auch aus Aufgrabungsergebnissen von Quigley & Rowe (1986) bestimmt. Leider werden die in den Rechnungen verwendeten Zahlenwerte nur teilweise angegeben, so daß die Ergebnisse nicht völlig nachvollzogen und beurteilt werden können. Es wird jedoch deutlich, daß bei hoher Qualität der Abdichtung der Austrag von Schwermetallionen, die vom Ton in größerem Ausmaß adsorbiert werden, rechnerisch um 1000 Jahre und mehr verzögert werden kann.

Schneider & Tietze (1987) berechnen die Ausbreitung von Schadstoffen aus Deponien im Untergrund. In Parametervariationen wird der große Einfluß der angenommenen Zahlenwerte für die Transportkenngrößen demonstriert. Die Autoren meinen, daß die Rechenmodelle das Schadstoffverhalten der Bodenschichten zwar nicht exakt nachbilden, daß jedoch etwaige Grundwasserbeeinträchtigungen vorhergesagt werden können.

Schneider & Göttner (1991) kommen aufgrund ihres Vergleichs von Messungen im Feld und Rechenergebnissen zu dem Schluß, daß von den drei von ihnen untersuchten Rechenmodellen das "Mobil-Konzept" am geeignetsten ist. Hierbei wird angenommen, daß der gesamte wassergefüllte Porenraum durchflossen wird. Wie schon erwähnt, ist das nach den Versuchen von Rowe et al. (1988) der Fall.

stärksten Cu und Pb, in geringerem Maß Zn – beobachtet.

Wagner (1992) untersuchte die Verlagerung von Schwermetallen unter Altlasten und Deponien. An zwei Standorten lagerten Rückstände aus der Erzaufbereitung mit Konzentrationen von 1–8 % Zink und 0,2–2 % Blei. Beim dritten Standort standen die Schadstoffe in geringer Konzentration im Sickerwasser einer Hausmülldeponie an. An allen drei Standorten mit Ton



oder Lehm als Untergrund waren die Schwermetalle trotz jahrzehntelanger Einwirkungsdauer nur etwa bis zu 10 cm Tiefe nennenswert eingedrungen.

Goodall & Quigley (1977) untersuchten Kontaminationsprofile unter zwei Hausmülldeponien nach 2,5 bzw. 7 Jahren Betrieb in Kanada. Unter den nur wenige Kilometer voneinander entfernt liegenden Deponien stand jeweils ein schluffiger Ton an. Mit Piezometern wurde der jeweilige Gradient der Porenwasserströmung gemessen. Er war bei der jüngeren Deponie nach innen, bei der älteren nach außen gerichtet, woraus im letzteren Fall eine Durchsickerung von 4 cm errechnet wurde. Demgegenüber hatte sich die Kontamination unter beiden Deponien nach unten ausgebreitet, bei der jüngeren um 50–80 cm, bei der älteren um 30 cm. In beiden Fällen dominiert also die Diffusion gegenüber der Konvektion. Aus den Feldmessungen wurden apparente Diffusivitäten bestimmt, die verglichen mit den in der

sonstigen Literatur mitgeteilten Werten niedrig sind, aber noch im gleichen Bereich liegen.

Auch Schneider & Göttner (1991) kommen aufgrund ihres 2jährigen Feldversuchs zu dem Schluß, daß die Diffusion der maßgebende Transportmechanismus ist. Zwecks deutlicher Verminderung des Schadstoffaustrags empfehlen deshalb die Autoren Maßnahmen, die die Diffusion begrenzen wie: Minimierung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser und Mehrschichten- aufbau der mineralischen Dichtung in ausreichender Schichtdicke. Die weitere Forderung, daß die austragbaren Schadstoffmengen von der Dichtung und vom Untergrund der unmittelbaren Umgebung adsorbiert werden sollten, ist wahrscheinlich kaum einzuhalten. Rowe (1988) fordert vorsichtiger, die austragbare Schadstoffmasse zu ermitteln und den zeitlichen Ablauf der Schadstoffausbreitung zu berechnen.

## 8 Entwicklungstendenzen

Man ist allgemein der Ansicht, daß man den Schadstoffaustrag über die Zeit rechnerisch mindestens abschätzen sollte. Was reine mineralische Abdichtungssysteme betrifft, liegen zahlreiche Meßergebnisse bezüglich der maßgebenden Transportparameter vor. Es gibt auch eine Reihe anwendbarer Rechenverfahren. Es sollten auch in Zukunft unbedingt eventuelle Aufgrabungen genutzt werden, um die Voraussagemethoden zu prüfen und zu verbessern.

Kunststoffdichtungsbahnen unterbinden den advektiven Transport vollständig. Sie sind absolut dicht gegen Salze und hemmen die Diffusion von Organika.

Hinsichtlich des Zusammenwirkens von mineralischer Abdichtungsschicht und Kunststoffdichtungsbahn weiß

man zwar, daß es zu schadstofftransportmindernden synergistischen Effekten kommt. Es gibt hierüber zwar einige Messungen; die Ergebnisse sind jedoch bisher noch nicht in Rechenverfahren angewendet worden.

Ein Nachteil der bisherigen Versuche an Bodensäulen zur Ermittlung von Transportparametern ist, daß die Zeit, bis der stationäre Zustand sich einstellt, nicht abgewartet werden kann, wodurch die Versuche nur mit Hilfe eines Rechenmodells ausgewertet werden können. Aus diesem Grund werden im Rahmen des laufenden Verbundvorhabens "Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen" Untersuchungsmethoden für dünnere Proben entwickelt.

## 9 Literatur

Acar, Y. B.; Hamidon, A.; Field, S. D.; and Scott, L. (1985): The Effect of Organic Fluids on Hydraulic Conductivity of Compacted Kaolinite. Hydraulic Barriers in Soil and Rock. ASTM STP 874, pp. 171-187.

Anderson, D. (1982): Does Landfill Leachate Make Clay Liners More Permeable? Civil Engineering (ASCE) 9, S. 66-68.

August, H.; Tatzky, R. (1982a): Permeationsverhalten von Kunststoffdichtungsbahnen als Deponiebasisabdichtung gegenüber organischen Lösungsmitteln. Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 12, Heft 1, S. 9-14.

August, H.; Tatzky, R. (1982b): Permeation Behavior of Plastic Waterproof Sheetings to Seal Dump Bases against

Organic Solvents. Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 12, Heft 1, S. 9-14. Translated for EPA by Literature Research Corporation, Annandale, Virginia.

August, H.; Tatzky, R. (1984): Permeabilities of Commercially Available Polymeric Liners for Hazardous Landfill Leachate Organic Constituents. International Conference on Geomembranes, June 20-24, Denver, Colorado, USA. S. 163-168.

August, H.; Tatzky, R.; Pastuska, G.; Win, T. (1984): Untersuchung des Permeationsverhaltens von handelsüblichen Kunststoffdichtungsbahnen als Deponiebasisabdichtung gegenüber Sickerwasser, organischen Lösungsmitteln und deren wäßrigen Lösungen. Umweltforschungsplan des Bundesministers des Inneren.

F+E- Vorhaben 103 02 208. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

August, H.; Jakob, I.; Tatzky, R. (1985a): Stofftransport durch Kunststoffdichtungen (Material Transport through Plastic Sealing Foils). Wasser + Boden 1, S. 24-26.

August, H.; Tatzky, R.; Jakob, I. (1985b): Kunststoffe schützen Grundwasser vor Deponieschadstoffen. – Kombiniertes Einsatz von polymeren und mineralischen Baustoffen führen zur Problemlösung. Kunststoffe im Bau 20, Heft 4, S. 208.

August, H.; Tatzky-Gerth, R.; Preuschmann, R.; Jakob, I. (1992): Permeationsverhalten von Kombinationsdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. F+E-Vorhaben 102 03 412. Durchgeführt an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Becker, G.; Stahl, E. (1981): Eine einfache Methode zur Permeationsmessung von Kunststofffolien. GIT Fachzeitschrift für das Laboratorium 25, Heft Oktober, S. 795-803.

Bracke, R.; Hagemann, H. W.; Echle, W.; Püttmann, W. (1991): Geochemische Veränderungen in der Tonbasisdichtung der Deponie Geldern-Pont nach 8jährigem Deponiebetrieb. Müll & Abfall. S. 409-420.

Crank, J.; Park, G. S. (1968): Diffusion in Polymers. London: Academic Press.

Czurda, K. A.; Wagner, J.-F. (1988): Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Barrieregesteinen. In: Czurda, Kurt A., Wagner, Jean F. (Hrsg.): Tone in der Umwelttechnik. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 4, I-VII, S. 225-245.

Degen, W.; Hasenpatt, R. (1988): Durchströmung und Diffusion in Tonen. In: Czurda, Kurt A., Wagner, Jean F. (Hrsg.): Tone in der Umwelttechnik. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 4, I-VII, S. 123-139.

Ehrig, H.-J.; Endell, R. et al. (1988): Die Zusammensetzung von Sickerwässern. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 7.2.26 "Sickerwässer aus Industrie und Sonderabfalldeponien" des ATV-Fachausschusses 7.2. Korrespondenz Abwasser 35, Heft 1, S. 82-87.

Eyerer, P.; Wurster, T. (1984a): Zerstörungsfreie Permeationsprüfung an Kunststoff-Behältern und Rohren, Teil I. Plastverarbeiter 35, Heft 8, S. 30-34.

Eyerer, P.; Wurster, T. (1984b): Zerstörungsfreie Permeationsprüfung an Kunststoff-Behältern und Rohren, Teil II. Plastverarbeiter 35, Heft 9, S. 24-31.

Finsterwalder, K. (1988): Die Abfall-Lagerstätte für geologische Zeiträume. – Eine innovative Deponielösung. Vortrag, Ruhr-Universität Bochum, Nov. 1988.

Fleischer, G.; Holstein, P. (1984): Selbstdiffusion von Alkanen in Polyethylen niedriger Dichte – Einfluß des Polyethylentyps und der Diffusantengröße. Acta Polymerica 35, Heft 12, S. 738-744.

GDA-Empfehlungen (1993): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.

Glück, L.; Poschet, G.; Zöhren, J. (1985): Dichtigkeit von Kunststoffbahnen für den Grundwasserschutz. Bericht über praxisnahe Permeationsmessungen an HDPE-Bahnen. Beiheft zu Müll und Abfall. Heft 22. Berlin: Erich Schmidt. S. 81-84.

Goodall, D. C.; Quigley, R. M. (1977): Pollutant migration from two sanitary landfill sites near Sarnia, Ontario. Can. Geotech. J., Vol. 14, S. 223-235.

Haendel, H. (1987): Diffusionsverhalten von chlorierten Kohlenwasserstoffen gegenüber Kanalrohrwandungen. Korrespondenz Abwasser 34, S. 1040-1046.

Haxo, H. E.; White, R. M.; Haxo, P. D.; Fong, M. A. (1982): Liner Materials Exposed to Municipal Solid Waste Leachate. Contract No. 68-03-2134; Work Order No. 14, Final Report. Municipal Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. EPA, Cincinnati Ohio 45268.

Haxo, H. E. (1985): Polymeric Membrane Lining Materials for Waste Management Applications. Kautschuk + Gummi + Kunststoffe 38, Heft 6, S. 485-493.

Haxo, H. E.; Miedema, J. A.; Nelson, N. A. (1985): Permeability of Polymeric Membrane Lining Materials for Waste Management Facilities. Elastomerics, May, S. 29-36 und 66.

Kamal, M. R.; Jinnah, I. A.; Utracki, L. A. (1984): Permeability of Oxygen and Water Vapor Through Polyethylene/Polyamide Films. Polymer Engineering and Science 24, Heft 17, S. 1337-1347.

Kohler, E. (1990): Chemisch-physikalische Untersuchungen über das Redoxmilieu an der Grenzfläche von Kombinationsdichtungen. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. F+E-Vorhaben 102 03 412, Teil II,

- durchgeführt von der Universität Regensburg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Lawson, C. R.; Ingles, O. G. (1984): Water Repellency Requirements for Geomembranes. International Conference on Geomembranes, June 20-24, Denver, Colorado, USA. S. 169-174.
- Mathieu, C. (1988): EVOH – Neues Wachstum bei Barriere-Verpackungen. *nv neue verpackung* 4, S. 124-129.
- Parlman, J. H. (1948): *Modern Packaging*, Heft 7, S. 198-204.
- Parlman, J. H. (1949): *Modern Packaging*, Heft 3, S. 119-122.
- Paßmann, J. (1990): Permeationsverhalten unterschiedlicher Kunststoffdichtungsbahnen in einer Kombinationsdichtung. Diplomarbeit, RWTH Aachen, Institut für Bergbaukunde III.
- Pastuska, G.; August, H.; Tatzky, R. (1982): Eignung von Dichtungen aus Kunststoffen für Sonderabfalldeponien. *Fortschritte der Deponietechnik* 82 – Texte des Umweltbundesamtes 29, S. 147-163.
- Pinsky, J. (1955): *Plastics Techn.*, Heft 4, S. 159-164.
- Pinsky, J. (1957): *Modern Plastics*, Heft 4, S. 145-156, 237.
- Quigley, R. M., Rowe, R. K. (1986): Leachate Migration Through Clay below a Domestic Waste Landfill. Sarnia, Ontario, Canada: Chemical Interpretation and Modelling Philosophies. In: *Hazardous and Industrial Solid Waste Testing and Disposal. Sixth Volume. ASTM Special Technical Publication 933*. Philadelphia, Pa.
- Rogers, C. E.; Stannett, V.; Szwarc, M. (1957): *Ind. Eng. Chem.* 49, Heft 11, S. 1933-1936.
- Rowe, R. K. (1988): Eleventh Canadian Geotechnical Colloquium: Contaminant migration through groundwater – the role of modelling in the design of barriers. *Can. Geotech. J.* Vol. 25, S. 778-798.
- Rowe, R. K.; Booker, J. R. (1984): The analysis of pollutant migration in a non-homogeneous soil. In: *Géotechnique* 34. No. 4, S. 601-612.
- Rowe, R. K.; Caers, C. J.; Barone, F. (1988): Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed clayey soil. *Can. Geotech. J.* Vol. 25, S. 108-118.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1989): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 12. Aufl. Stuttgart: Enke.
- Schneider, W.; Göttner, J. J. (1991): Schadstofftransport in mineralischen Deponieabdichtungen und natürlichen Tonschichten. *Geol. Jahrbuch*. (Hrsg.): Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe, Hannover. 1991, Reihe C, Heft 58.
- Schneider, W.; Tietze, K. (1987): Numerische Schadstofftransportmodelle als Beurteilungsinstrument für die Barrierewirkung des Deponieuntergrundes. In: Fehla, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): *Fortschritte der Deponietechnik 1987*. Berlin: Erich Schmidt. S. 159-181.
- Shackelford, C. D. (1991): Laboratory diffusion testing for waste disposals – a review. *J. Containment Hydrology* 7, S. 177-217.
- Shackelford, C. D.; Daniel, D. E. (1991a): Diffusion in saturated soil. I: Background. *J. of Geotech. Eng. ASCE*. Vol. 117, S. 467-484.
- Shackelford, C. D.; Daniel, D. E. (1991b): Diffusion in saturated soil. II: Results for compacted clay. *J. of Geotech. Eng. ASCE*. Vol. 117, S. 485-506.
- Tu, D. (1978): Permeation, Diffusion, Plastifizierung und Permeabilität von flüssigen Kohlenwasserstoffen durch reine und gefüllte Thermoplaste (PE + PP). Dissertation, Universität Stuttgart.
- UBA (1992): Expertengespräch zum Thema Sorption und Ionenaustauschkapazität am 15.1.1992 im Umweltbundesamt, Berlin.
- Wagner, J.-F. (1992): Verlagerung und Festlegung von Schwermetallen in tonigen Deponieabdichtungen. – ein Vergleich von Labor- und Geländestudien. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*. Nr. 22, S. 246. Karlsruhe.
- Wienberg, R. (1990): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. 2, *AbfallwirtschaftsJournal*, S. 222-230 und S. 306-314.



# J Hydraulische Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten (U. Holzlöhner)

1	Einführung	99
2	Durchlässigkeit gegen Wasser	99
2.1	Allgemeines	99
2.2	Laborversuche	99
2.3	Feldversuche	100
2.4	Einflüsse auf die Durchlässigkeit	100
3	Einflüsse von Chemikalien auf die hydraulische Durchlässigkeit	101
3.1	Allgemeines	101
3.2	Anorganische Verbindungen	102
3.3	Organische Verbindungen	102
3.4	Zusammenfassung	102
4	Offene Fragen, Wissenslücken	103
5	Literatur	103

## 1 Einführung

Der Transport von Schadstoffen durch eine mineralische Abdichtungsschicht kann grundsätzlich advektiv und diffusiv erfolgen. Allgemein geht man von einem wassergesättigten Porenraum und von einer hydraulischen Druckhöhe aus, obwohl – insbesondere bei einer Kombinationsdichtung – keine oder kaum eine Druckhöhe vorhanden ist und die mineralische Schicht auch teilgesättigt sein kann. Dieser Fall ist jedoch der

günstigere. Der teilgesättigte Fluß wird in Kapitel H, Feuchtehaushalt und im Kapitel O, Oberflächenabdichtungen ausführlicher behandelt.

In diesem Kapitel soll ausschließlich Advektion, d. h. der Transport infolge der Durchströmung behandelt werden. Zum diffusiven Schadstofftransport s. Kapitel I.

## 2 Durchlässigkeit gegen Wasser

### 2.1 Allgemeines

In der Geotechnik wird die Dichtigkeit eines Erdstoffes seit jeher durch die hydraulische Leitfähigkeit, den  $k$ -Wert charakterisiert, der durch die Gleichung

$$v = k \cdot I \quad (1)$$

definiert ist. Hierbei ist  $v$  die Filtergeschwindigkeit und  $I$  das hydraulische Gefälle (dimensionslos). Gegenüber den Aufgaben im Grund- und Wasserbau sind im Deponiebau die Anforderungen hinsichtlich der Dichtigkeit wesentlich höher. Für keine andere geotechnische Kenngröße ist es so schwierig, verlässliche Werte zu bestimmen wie für die Durchlässigkeit, Madsen & Mitchell (1988). Mitchell et al. (1965) haben an Proben aus schluffigem Ton gezeigt, daß schon kleine Variationen in Wasser-

gehalt und Dichte Änderungen der Durchlässigkeit um zwei Zehnerpotenzen zur Folge haben können. Madsen & Mitchell (1988) führen diese Empfindlichkeit auf die Struktur des Tons zurück, die von der Güte der Verdichtung stark beeinflußt wird. Hierauf sind auch die großen Unterschiede zwischen Labor- und Feldversuchen und der große Einfluß der Chemikalien im Permeanten auf die hydraulische Durchlässigkeit zurückzuführen, s. Abschnitte 2.3 und 3.

### 2.2 Laborversuche

Zur Durchlässigkeitsmessung an Bodenproben sind drei Gerätetypen üblich: das Gerät mit starren Wänden, das Triaxialgerät (mit flexibler Probenummantelung) und das Konsolidations-Durchlässigkeitsgerät.

Bei dem Gerät mit starren Wänden wird der Boden direkt im Ausstechzylinder oder in der Form getestet, in der die Probe verdichtet hergestellt wurde. Bei dem Versuch ist der Boden ohne vertikale Auflast. Es besteht die Möglichkeit der Räumlichkeitsänderung, insbesondere, wenn Chemikalien im durchströmenden Wasser eine gewisse Schrumpfung des Bodens hervorrufen. Im Triaxialgerät wird dieses Verhalten weitgehend vermieden, weil die Probe von einer Membran ummantelt wird, die an die Probe gepreßt wird. Allerdings werden hierbei sich eventuell bildende Schrumpfrisse nicht bemerkt, weil sie überdrückt werden. Madsen & Mitchell (1988) bevorzugen deshalb das Kompressions-Durchlässigkeitsgerät, auch weil man hiermit die Zusammenrückung infolge von Strömungskräften und eventueller chemischer Einflüsse genau bestimmen kann. Der erzeugte eindimensionale Deformationszustand entspricht dem in einer Basisabdichtung am besten. Das Gerät eignet sich daher gut zur Untersuchung des Einflusses einer Auflast auf die Durchlässigkeit. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Probenhöhe, wodurch im Durchlässigkeitsversuch die Porenfüllung schneller ausgetauscht ist. Bei größeren Kornanteilen kann man diesen Versuchstyp nicht mehr verwenden.

### 2.3 Feldversuche

Im Feld wird die Durchlässigkeit über die Versickerung gemessen. Hierzu wird ein Hohlzylinder von der Oberfläche her in die Dichtungsschicht eingebaut oder eingedrückt, der Innenraum mit Wasser gefüllt und die Verluste infolge Versickerung gemessen. Um den Randeinfluß auszuschalten, wird nur die auf einer innen liegenden Teilfläche versickernde Wassermenge gemessen und daraus die Durchlässigkeit errechnet. Das ist das Prinzip des "Double-ring-Infiltrometers", siehe z. B. Daniel (1984), und der Standrohrmethode. Mitunter werden auch großflächige Lysimeter eingesetzt, bei denen das gesamte durchsickernde Wasser aufgefangen wird. Hierzu müssen unter der Dichtungsschicht entsprechende Vorrichtungen eingebaut sein.

Feldversuche sind notwendig, weil man immer wieder feststellt, daß im Feld 10- bis 1000mal größere Durchlässigkeiten gemessen werden als im Labor, Daniel (1984), Elsbury et al. (1990). Außer diesem generellen Unterschied kann die Durchlässigkeit im Feld auch örtlich stark variieren. Einen Durchschnittswert für die Durchlässigkeit wird man deshalb nur mit einer großen Versickerungsfläche erhalten. Daniel (1984) erhielt mit einem Lysimeter von 2,4 m Durchmesser denselben  $k$ -Wert, wie er sich aus den Versickerungsverlusten des gesamten Beckens, dessen Tondichtung untersucht wurde, ergab.

Daniel (1984) stellte nach der Untersuchung von verschiedenen Fällen fest, daß die Durchlässigkeit im Feld immer dann besonders groß war, wenn die Dichtungsschicht dünn und durch Verdunstung vorgeschädigt war, und wenn die Einbaukontrolle mangel-

haft war. Die Schwierigkeiten sind jedoch auch grundsätzlicher Natur: Aus der schon in Abschnitt 2.1 erwähnten Empfindlichkeit gegen geringe Variationen von Wassergehalt und Trockendichte schließen Madsen & Mitchell (1988), daß das Gros der Wassermenge durch Makroporen fließt. Diese Annahme wird durch Beobachtungen von Elsbury et al. (1990) gestützt, bei denen eingefärbtes Sickerwasser die bevorzugten Fließwege entlang von Tonbrocken markierte. Auch die Lysimetermessungen auf einer Oberflächenabdichtung durch Wohnlich (1990) weisen in dieselbe Richtung. Wohnlich (1990) schloß aus der im Verhältnis zum durchschnittlichen  $k$ -Wert kurzen Durchbruchzeit, daß das Wasser vorwiegend durch einige wenige Makroporen fließt.

Auf Testfeldern der Deponie Georgswerder wurden über mehrere Jahre mit Hilfe von Abflußmessungen, bodenhydrologischen Messungen, Tracerversuchen und Aufgrabungen die Prozesse erforscht, die die hydraulische Durchlässigkeit von Erdstoffdichtungen bestimmen, Melchior et al. (1990), Melchior (1993).

### 2.4 Einflüsse auf die Durchlässigkeit

Erdstoffabdichtungen haben nur selten eine ideale homogene Struktur, bei der die Mikroporen für die Durchlässigkeit maßgebend wären. Nach Untersuchungen an Probefeldern, Rogowski (1985), Elsbury et al. (1990), wird die Leckrate der Abdichtungsschicht jedoch hauptsächlich von sekundären Eigenschaften bestimmt. Das sind nach Trautwein & Williams (1990) Makroporen, die bevorzugte Fließkanäle darstellen und andere Struktureigenschaften. Diese äußern sich z. B. in dem von Mitchell et al. (1965) gefundenen Ergebnis, daß knetende Verdichtung um den Faktor vier niedrigere Dichtigkeiten ergab als statische Verdichtung, wobei Einbautrockendichte und -wassergehalt jeweils gleich waren.

Unter sonst gleichen Bedingungen nimmt die Durchlässigkeit ab, wenn die Trockendichte der untersuchten Bodenprobe oder -schicht zunimmt. Jedoch ist "Dichte" nicht gleich "Dichtigkeit", Düllmann (1987a). Der Autor zeigt anhand von Versuchen an Bodenproben, daß bei gleicher Trockendichte die Durchlässigkeit mit steigendem Wassergehalt abnimmt. Nach Mitchell et al. (1965) ist die Durchlässigkeit bei Einbau auf der nassen Seite des Proctroptimums um zwei bis drei Zehnerpotenzen kleiner als bei Einbau auf der trockenen Seite. Deshalb wird in Vorschriften gefordert, auf dem "nassen Ast" der Proctorkurve einzubauen. Nach Düllmann (1987a) ist – abweichend von der derzeitigen Praxis – die wichtigste Forderung überhaupt, ein homogenes Gefüge der Abdichtungsschicht zu erzeugen. Bei Begrenzung der Stückgröße auf 10 cm und Einhaltung zusätzlicher einbautechnischer Regeln hält der Autor eine Durchlässigkeit von  $10^{-9}$  m/s im Feld für erreichbar. Mit weiterer Zerkleinerung können noch kleinere Durchlässigkeiten erreicht werden. Untersuchungs-

ergebnisse von Daniel (1984) weisen in dieselbe Richtung: In einer Laborversuchsreihe nahm die Durchlässigkeit von  $3 \cdot 10^{-9}$  auf  $9 \cdot 10^{-11}$  m/s ab, als der Durchmesser der Tonbrocken von 10 mm auf 1,5 mm kleiner gewählt wurde. Nach Benson & Daniels hat die Stückgröße auf der nassen Seite des Proctoroptimums nur einen geringen Einfluß auf die Durchlässigkeit. In neuen deutschen Vorschriften ist die Pseudokorngröße beim Einbau auf 32 mm begrenzt, siehe NRW-Richtlinie, Merkblatt Siedlungsabfälle des Nieders. LA für Bodenforschung. Komodromos & Mattiat (1989) untersuchen die Gefügemerkmale (Inhomogenitäten, Porosität, Kleinklüftung, Risse) mit einer Kombination von licht- und rasterelektronenmikroskopischen Verfahren. Diese Methode wird zur Qualitätsprüfung mineralischer Abdichtungsschichten empfohlen.

Zu seinen Forderungen bezüglich des Einbaus kommt Düllmann (1987b) aufgrund der Aufgrabungsergebnisse der Deponie Geldern-Pont. Während der Polder mit der Tonabdichtung im Standrohrversuch eine in-situ-Durchlässigkeit von  $10^{-10}$  m/s ergab, erhielt man für die Bergematerial-Abdichtungsschicht Werte von  $10^{-6}$  m/s und darüber. Schurfe zeigten im Gegensatz zur Tonschicht eine sehr grobe Struktur der Bergeschicht mit Stücken bis zu 30 cm Kantenlänge. Nur der oberste, abgewalzte Teil der Schicht war feiner strukturiert. Diese Tatsache erklärt auch die früher gleich nach der Herstellung in-situ gemessenen Durchlässigkeiten von  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  m/s: Die verwendete "Faß-Methode" testete nur die oberste Schicht, während die bei der Aufgrabung verwendete Standrohrmethode das Wasser in einer gewissen Tiefe in die Dichtungsschicht eintreten läßt.

Mit dem erwähnten Bergematerial beobachtete Düllmann (1987b) einen Fehlereinfluß auf die im Labor gemessenen

Durchlässigkeiten. Der Durchlässigkeitsbeiwert nahm im Laufe des Versuchszeitraums um mehrere Zehnerpotenzen ab. Dieser Effekt konnte auf Ausspülen von Feinteilen aus dem Boden und Absetzen im Filterstein des Dreiaxialgeräts zurückgeführt werden.

Shackelford & Javed (1991) fanden, daß eine Ursache für die Unterschiede der im Labor und im Feld gemessenen Durchlässigkeiten die geringe Probengröße im Labor ist. Bei einem Infiltrationsversuch im Labor in einem Versuchsbehälter von 0,9 m x 0,9 m erhielten die Autoren um 0,6 bis 2,4 höhere Durchlässigkeiten als an kleinmaßstäblichen Proben. Deshalb seien großmaßstäbliche Laborversuche realistischer. Auch die Stückgröße des Materials hatte einen großen Einfluß und zwar nicht nur die Korngröße als solche, sondern auch die Kornverteilung des "Pseudo-Kiessands". Aufgrund ihrer Versuche empfehlen die Autoren, daß die Stücke bei der Herstellung der Probekörper im Labor nicht von Hand zerkleinert werden dürfen. Nach Mitchell et al. (1965) erhält man bei der Messung an Proben eine geringere Durchlässigkeit, wenn der Erdstoff nicht vollständig wassergesättigt ist.

Außer der bewährten Methode, den Erdstoff auf der nassen Seite des Proctoroptimums einzubauen, kann man hohe Dichtigkeit auch durch Einbau mit einer sehr hohen Trockendichte erreichen. Diese wenig schrumpfende Gemische verwendet man sowohl bei Abdichtungsschichten als auch bei Dichtwänden, s. Kapitel K. Andere Methoden zur Herabsetzung der Durchlässigkeit sind ebenfalls in Kapitel K näher beschrieben. Das Hinzumischen von 1 % bis 2 % Bentonit verringert oft die Durchlässigkeit beträchtlich.

## 3 Einflüsse von Chemikalien auf die hydraulische Durchlässigkeit

### 3.1 Allgemeines

Wassergesättigter Ton ist nicht nur ein Gemisch aus Festteilchen und Wasser; vielmehr bilden diese beiden Bestandteile die Struktur des Tons. Das Wasser ist mit unterschiedlichen, insgesamt schwachen Kräften an die Festteilchen gebunden, so daß das Vorhandensein von Chemikalien im Porenwasser oder anstelle des Porenwassers generell einen Einfluß auf die Tonstruktur erwarten läßt. Für die Deponiepraxis besonders von Interesse ist, ob die Änderung der Tonstruktur eine erhebliche Änderung der hydraulischen Durchlässigkeit zur Folge hat.

Madsen & Mitchell (1988) behandeln die chemischen Einflüsse auf die Tonstruktur und auf die Durchlässigkeit ausführlich. Die wichtigsten Ergebnisse sind in diesem

Abschnitt 3 zusammenfassend wiedergegeben. Nach Madsen & Mitchell (1988), und nach Evans et al. (1985), beeinflußt eine Chemikalie die Durchlässigkeit in günstiger oder in ungünstiger Weise. Wenn die elektrolytische Konzentration oder die Ladung der Kationen zunimmt, nimmt die Dicke der Doppelschicht ab und die Tonstruktur ändert sich in Richtung Koagulation. Hierdurch vergrößern sich die Makroporen, und die Durchlässigkeit nimmt zu. Günstig wirkt sich dagegen eine mehr dispergierte Tonstruktur aus. Diese Wirkung tritt ein, wenn einer der folgenden Parameter anwächst: dielektrische Konstante, Kationengröße, pH-Wert oder Anionenabsorption. Zusätzlich muß der Spannungszustand berücksichtigt werden: Wie bei der Austrocknungsgefährdung, siehe Kapitel H, wirken sich effektive Druckspannungen günstig hinsichtlich Rißvermeidung aus.

## 3.2 Anorganische Verbindungen

Im Porenwasser gelöste Salze erhöhen die Durchlässigkeit mit steigender elektrolytischer Konzentration, Quirk & Schofield (1955). Hardcastle & Mitchell (1974) zeigen, daß diese Änderung bei wieder abnehmender Konzentration reversibel ist. Dunn & Mitchell (1984) berichten, daß schon Leitungswasser mit nur 0,01 N Kalziumsulfat eine 50 %ige Erhöhung der Durchlässigkeit gegenüber destilliertem Wasser zur Folge hat. Tone mit hohem Wassergehalt wie Bentonite, bilden Risse unter der Einwirkung von Salzlösungen, Madsen & Mitchell (1988), Wagner (1988).

Anorganische Basen tendieren dazu, die Tonstruktur zu dispergieren und damit die Durchlässigkeit um bis zu einer Zehnerpotenz zu reduzieren. Anorganische Säuren bewirken dagegen Koagulierung. Madsen & Mitchell (1988) geben Meßergebnisse verschiedener Autoren wieder, nach denen die Einwirkung von Säure die Durchlässigkeit um eine halbe bis eine Zehnerpotenz ansteigen ließ.

## 3.3 Organische Verbindungen

Fernandez & Quigley (1985) mischten trockenen Ton mit den Flüssigkeiten an, die im folgenden Durchlässigkeitsversuch verwendet wurden. Bei gleicher Trockendichte stieg die Durchlässigkeit bei Durchströmung von Alkoholen und Azeton um eine bis zwei, von aromatischen Verbindungen um vier Zehnerpotenzen gegenüber dem Wert bei Wasser. Diese Unterschiede korrelieren mit der Abnahme der Dielektrizitätskonstanten von 80 (Wasser) auf 2 (Benzol). Mikroskopische Aufnahmen zeigten deutlich die flockige Struktur der Tonteilchen bei den Organika als Porenflüssigkeit im Gegensatz zur dispergierten bei Wasser. Mit den Organika kann man bei gleicher Verdichtungsarbeit höhere Trockendichten als mit Wasser erzeugen; trotzdem ist auch dann die Durchlässigkeit bei den Organika größer. Der wesentliche Effekt ist die Aggregation, wodurch auch größere Makroporen entstehen. In der Bodenkunde werden derartige Böden als Pseudosande bezeichnet, Scheffer & Schachtschabel (1984).

Der Deponiepraxis entspricht mehr der Versuchstyp, bei dem der Ton mit Wasser eingebaut wurde und dann einer Schadstoff-Flüssigkeit ausgesetzt wird. Fernandez & Quigley (1985) zeigten, daß bei verschiedenen Permeanten auch die Reihenfolge von Bedeutung ist. Benzol nach Wasser zeigte keine Durchlässigkeits-erhöhung, die Folge Wasser-Ethanol-Benzol dagegen eine Erhöhung um vier Zehnerpotenzen. In der Deponiepraxis werden im allgemeinen Mischungen verschiedener Chemikalien im Sickerwasser zu erwarten sein, über deren Wirkung noch wenig bekannt ist, Madsen & Mitchell (1988). Ein weiterer Gesichtspunkt ist, ob die Schadstoffe rein einwirken – wie z. B. in den Versuchen von Fernandez & Quigley (1985) – oder im

Sickerwasser gelöst. Brunelle et al. (1987) stellten für verdichteten Ton keinen wesentlichen Durchlässigkeitsunterschied von reinem Wasser gegenüber einem natürlichen Sickerwasser fest.

Nach Foreman & Daniel (1986) verhindern effektive Druckspannungen weitgehend die Bildung von Makroporen infolge Schrumpfen bei Chemikalien-einwirkung. Sie untersuchten mit Wasser angemischten Kaolinit, der anschließend von Methanol durchströmt wurde. Hierbei erwiesen sich die in Triaxial- und Ödometerzellen gemessenen Durchlässigkeiten bei effektiven Druckspannungen von 50 bis 100 kPa z. T. als kleiner als der Wert für Wasser. Die Unterschiede kann man weitgehend durch die Unterschiede hinsichtlich Dichte und Viskosität der beiden Permeanten erklären. Dieselben Ergebnisse zeigten neuere Untersuchungen von Fernandez & Quigley (1990), zitiert nach Mitchell & Jaber (1990). Eine Auflast von 40 kPa reichte aus, um die Durchlässigkeit gegenüber Ethanol unter den Wert gegenüber Wasser zu drücken. Auch hier wird betont, daß die Durchlässigkeit bei genügender Auflast nicht mehr vom Vorhandensein oder Nichtvorhandensein der diffusen Doppelschicht abhängt, sondern nur von der Viskosität des Permeanten abhängt.

Bisher ist nur Anilin als Vertreter organischer Basen untersucht worden. Madsen & Mitchell (1988) faßten die Ergebnisse dahingehend zusammen, daß wäßrige Lösungen kaum einen Einfluß haben, reine Basen dagegen die hydraulische Durchlässigkeit stark ansteigen lassen.

Organische Säuren scheinen nicht so stark auf den Ton zu wirken wie anorganische, Madsen & Mitchell (1988). Eine Durchlässigkeitserhöhung um bis zu einer Zehnerpotenz wurde festgestellt; wenn jedoch Karbonate oder Eisenoxide im Porenwasser gelöst sind, können diese ausgefällt werden, wodurch es zu einer Verstopfung der Poren und damit zu einer Reduktion der Durchlässigkeit kommt.

## 3.4 Zusammenfassung

Madsen & Mitchell (1988) haben auf mehreren Seiten die mit verschiedenen Chemikalien durchgeführten Versuche und deren Ergebnisse zusammengestellt. Hier seien nur die wichtigsten Schlüsse mitgeteilt, die diese Autoren aus den zahlreichen vorliegenden Arbeiten ziehen:

- Hinnehmbar niedrige Durchlässigkeitswerte kann man nur bei Ausschaltung der Makroporen in der Tondichtung erreichen. Nach Düllmann (1987) ist die Homogenität der eingebauten Dichtungsschicht der wichtigste Parameter überhaupt.
- Im Durchlässigkeitsgerät mit starren Wänden wird die Schrumpfung und Ribbildung infolge chemischer Einwirkung überschätzt, das Triaxialgerät ergibt dagegen zu günstige Durchlässigkeitswerte. Inge-



samt erscheint das Kompressions-Durchlässigkeitsgerät als am geeignetsten. Nach Foremann & Daniel (1986) verhindern ausreichend große effektive Druckspannungen die Bildung von durchlässigkeitsvergrößernden Makroporen.

- Der Einfluß von Chemikalien auf Dichtwandmassen mit relativ hohem Wassergehalt ist größer als auf verdichtete tonige Abdichtungsschichten.
- Wenn möglich, sollten die Tonproben mit Wasser derselben Zusammensetzung hergestellt werden wie beim Einbau in der Dichtungsschicht.
- Der Einfluß von Anorganika auf die Durchlässigkeit beruht auf der Einwirkung auf die Doppelschicht, wodurch Koagulierung oder Dispergierung, Schrumpfen oder Schwellen hervorgerufen werden.

- Der Einfluß der Organika ist hauptsächlich durch Wasserlöslichkeit, dielektrische Konstante und Polarität bestimmt.
- Reine organische Flüssigkeiten haben zwar eine große Wirkung, kommen jedoch in heutigen Deponien kaum vor.
- Wäßrige organische Lösungen ändern die Durchlässigkeit den bisherigen Untersuchungen zufolge nicht.
- Die bisherigen Untersuchungen beziehen sich meistens auf nur eine Chemikalie und auf kurzfristige Effekte.

Nach Mitchell & Jaber (1990) sind große Durchlässigkeitserhöhungen nur dann wahrscheinlich, wenn konzentrierte Kohlenwasserstoffe auf Tonabdichtungen mit kleiner Auflast treffen.

## 4 Offene Fragen, Wissenslücken

Labortestreihen zeigten, daß die gemessene Durchlässigkeit stark mit kleinen Änderungen von Trockendichte und Wassergehalt variiert. Auch die Stückgröße hat einen großen Einfluß. Es fragt sich, ob ein sehr niedriger im Labor gemessener Wert nicht eher das Geschick des Laboranten als die Eignung des Materials wiedergibt. Es erscheint daher notwendig zu untersuchen, wie Labor- und begleitende Feldversuche in Abstimmung mit dem Aufbereitungs- und dem Einbauverfahren so durchgeführt werden müssen, damit eine verlässliche Aussage über das Verhalten im Deponieeinsatz gemacht werden kann. Wünschenswert wäre eine Methode, mit der man

die Homogenität der Dichtungsschicht in-situ messen kann.

Eine weitere Wissenslücke besteht hinsichtlich des Zusammenwirkens der Chemikalien mit anderen Einflüssen, die auf die Durchlässigkeit des Tons einen Einfluß haben, wie Setzungen, Austrocknung und Spannungszustand, insbesondere Auflast.

Madsen & Mitchell (1988) fordern eingehendere Forschung hinsichtlich der Einwirkung natürlicher Sickerwässer, der gleichzeitigen Einwirkung verschiedener Chemikalien und des Langzeitverhaltens.

## 5 Literatur

Benson, C. H.; Daniel, D. E. (1990): Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journ. Geot. Eng. ASCE*. Vol. 116, S. 1231-48.

Brunelle, T. M.; Dell, L. R.; Meyer, C. J. (1987): Effects of Permeameter and Leachate on a Clay Liner. *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*. University of Michigan, Ann Arbor. June 15-17, 1987. ASCE Geotechnical Special Publication No. 13.

Daniel, D. E. (1984): Predicting Hydraulic Conductivity of Clay Liners. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. Vol. 110, No. 2, S. 285-300.

Düllmann, H. (1987a): Geotechnische und baubetriebliche Einflüsse auf die Dichtigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton. - Ergebnisse von Praxisversuchen -. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): *Fortschritte der Deponietechnik 1987*. S. 215-245.

Düllmann, H. (1987b): Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Erfahrungsbericht über die Freilegung von Versuchsfeldern auf der Deponie Geldern-Pont. In: *Neuzeitliche Deponietechnik*. 12. November 1987. Ruhr-Universität Bochum. S. 43-76.

Dunn, R. J.; Mitchell, J. K. (1984): Fluid Conductivity Testing of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. Vol. 110, No. GT11, S. 1648-1665.

Elsbury, B. R.; Sraders, G. A.; Anderson, D. C.; Rehage, J. A.; Sai, J. O. and Daniel, D. E. (1990): Field and Laboratory Testing of a Compacted Soil Liner. EPA Project Summary. Risk Reduction Engineering Laboratory. Cincinnati OH 45268. Jan. 1990. EPA/600/S2-88/067. S. 1-7.

Evans, J. C.; Fang, H.-Y.; Kugelmann, I. J. (1985): Organic Fluid Effects on the Permeability of Soil-

- Bentonite Slurry Walls. Proc. National Conf. Hazardous Waste and Environmental Emergencies. May 14-16, 1985. Cincinnati, Oh.
- Fernandez, F.; Quigley, R. M. (1985): Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 22, S. 205-214.
- Foreman, D. E.; Daniel, D. E. (1986): Permeation of Compacted Clay with Organic Chemicals. Journ. GT ASCE. Vol. 112, S. 669-681.
- Hardcastle, J. H.; Mitchell, J. K. (1974): Electrolyte Concentration-Permeability Relationships in Sodium Illite-Silt Mixtures. Clays and Clay Minerals. Vol. 22, S. 143-154.
- Komodromos, A.; Mattiat, B. (1989): Einsatz von licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungsmethoden bei der Qualitätsprüfung von mineralischen Deponieabdichtungen. Müll & Abfall. S. 253-263.
- Madsen, F. T.; Mitchell, J. K. (1988): Chemical Effects on Clay Fabric and Hydraulic Conductivity. In: Baccini, P. (Ed.): The Landfill. Reactor and Final Storage. Lecture Notes in Earth Sciences. 20, S. 201-251. Berlin: Springer.
- Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamb. Bodenkundl. Arb. Band 22.
- Melchior, S.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (1990): Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Oberflächendichtsysteme für Deponien und Altlasten. In: Deponie Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik. S. 177-196.
- Mitchell, J. K.; Hooper, D. R.; Campanella, R. G. (1965): Permeability of Compacted Clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. Vol. 91, No. SM4, Juli 1965. S. 41-65.
- Mitchell, J. K.; Jaber, M. (1990): Factors Controlling the Long-Term Properties of Clay liners. In: Waste Containment Systems: Construction, Regulation and Performance. Geot. Spec. Publ. No. 26, S. 84-105. ASCE.
- Quirk, J. P.; Schofield, R. K. (1955): The Effect of Electrolyte Concentration on Soil Permeability. Journal Soil Science. Vol. 6, No. 2, S. 163-378.
- Rogowski, A. S. (1986): Hydraulic conductivity of compacted clay soils. Proc. 12th Annual Res. Symp. on Land Disposal, Incineration, and Treatment of Hazardous Waste. U. S. EPA, Cincinnati, Ohio. S. 29-39.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. 11. Aufl. Stuttgart: Enke.
- Shackelford, C. D.; Javed, F. (1991): Large-scale laboratory permeability testing of a compacted clay soil. Geot. Testing J., GTJODJ. Vol. 14, No. 2, S. 171-179.
- Trautwein, S. J.; Williams, C. E. (1990): Performance evaluation of earthen liners. In: Bonaparte, R. (Ed.): Waste Containment Systems. Geot. Spec. Publ. No. 26, S. 30 - 51. New York: ASCE.
- Wagner, J.-F. (1988): Mineralveränderungen bei der Migration von Schwermetalllösungen durch Tongesteine. In: Czurda, K. A.; Wagner, J. F. (Hrsg.): Tone in der Umwelttechnik. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 4, I-VII, S. 47-62.
- Wohnlich, St. (1990): Travel Times of Seepage Water Through Multilayered Covering Systems for Hazardous Waste Sites. In: Environ Geol. Water Sci. Vol. 15, No. 2, S. 137-144. New York: Springer.

# K Chemische und physikalische Einwirkungen auf mineralische Abdichtungsmaterialien, innovative Baustoffe (U. Holzlöhner)

1	Einführung	105
2	Physikalische und chemische Einwirkungen	106
2.1	Frosteinwirkung (Th. Voigt)	106
2.1.1	Wasserhaushalt und Eisbildung	106
2.1.2	Einflußfaktoren auf den Frost im Baugrund	106
2.1.3	Änderung von Bodenparametern bei feinkörnigen Böden	107
2.1.4	Schutzmaßnahmen	107
2.1.5	Schlußfolgerungen	108
2.2	Physiko-chemische Wechselwirkungen	108
2.2.1	Einflüsse	108
2.2.2	Tonmineralogische und geochemische Veränderungen	108
2.2.3	Auswirkungen auf bodenmechanische Eigenschaften	109
3	Verbesserte und innovative Baustoffe	110
3.1	Verdichten, Zumischen, zweischichtige Systeme	110
3.2	Anorganisch-chemische Verbesserungsverfahren	111
3.3	Organisch-chemische Verbesserungen	111
4	Ergebnisse aus Aufgrabungen	111
5	Zusammenfassung und Ausblick	112
6	Literatur	113

## 1 Einführung

Die wichtigsten Bestandteile von Erdstoffdichtungen sind die Tone. Ton ist kein fertiges Produkt, sondern unterliegt schon unter natürlichen Bedingungen ständigen Veränderungen. Ein Teil dieser Vorgänge wird unter "Verwitterung" zusammengefaßt, bei der sich die Tonminerale gemäß Zerfallsreihen umwandeln. Intensive Verwitterung, wie sie im sauren Milieu, bei hohen Niederschlägen und hoher Temperatur von statten geht, kann die Tonminerale in Gitterbestandteile oder primäre Minerale zerfallen lassen, Scheffer & Schachtschabel (1989). Hierbei kommt es zu Verwitterungsneubildungen wie Oxiden und Hydroxiden. Viele der Vorgänge sind reversibel. In welche Richtung die Vorgänge gehen, hängt von einer Reihe von Zustandsgrößen ab wie pH-Wert, Redoxpotential, Kationen- und Anionenkonzentration, Stoffkonzentrationen. Die Zustandsgrößen spannen einen mehrdimensionalen Raum auf, in dem Stabilitätsfelder oder -bereiche für die verschiedenen

Formen des mineralischen Materials existieren. Von besonderer Wichtigkeit ist auch das Angebot von Wasser.

Die Vorgänge in mineralischen Deponieabdichtungsschichten sind Umwandlungen unter den extremen Bedingungen des Schadstoffmilieus, das für den Ton eine Vielfalt von Möglichkeiten darstellt. Meistens werden die negativen Folgen der geochemischen Veränderungen hervorgehoben; man kann jedoch auch die Reaktionsbereitschaft des Tons ausnutzen, um zu besonders geeigneten modifizierten Dichtungsmaterialien zu gelangen. Von besonderem volkswirtschaftlichen Interesse sind Verfahren, die mineralische Abfallstoffe zu Abdichtungsmaterialien aufarbeiten.

Die mineralische Abdichtungsschicht unterliegt im Laufe ihres Entstehungsprozesses und der Betriebszeit vielfältigen Einwirkungen: Frosteinwirkung beim Einbau,

Austrocknung, mechanischen Spannungen und Verformungen, physikalischen, chemischen und biochemischen Einwirkungen. Die einzelnen komplexen Vorgänge bedürfen der gründlichen Erforschung und Beschreibung, wobei man allerdings die übergeordneten Ziele nicht aus den Augen verlieren darf: Standsicherheit, langzeitige Betriebssicherheit und Minimierung der Emissionen.

Hinsichtlich der verschiedenen Einwirkungen interessiert daher besonders, wie die bodenmechanischen Eigenschaften beeinflusst oder modifiziert werden und ob insgesamt langfristig stabile Zustände erreicht werden. Als geotechnische Eigenschaften seien hier verstanden: Einbaumöglichkeit, Festigkeit und Dehnfähigkeit, hydraulische Durchlässigkeit und Diffusionseigenschaften.

## 2 Physikalische und chemische Einwirkungen

### 2.1 Frosteinwirkung

Temperaturen unter dem Gefrierpunkt haben bekanntlich einen großen Einfluß auf die Bodenstruktur und damit auf eine Reihe von geotechnischen Eigenschaften. In der fertigen Deponie sind die Dichtungen so abgedeckt, daß sie gegen Minustemperaturen geschützt sind. Die Frosteinwirkung ist daher nur bei Gewinnung, Aufbereitung und Einbau interessant. Insbesondere gilt es, die Schädigung eingebauter Dichtungsschichten zu verhindern, so lange sie noch nicht ausreichend abgedeckt sind.

Während der Frosteinwirkung weisen die Böden durch die Änderung der Aggregatzustände des Porenwassers Festigkeits- und Volumenzunahmen auf, die nach dem Auftauen größtenteils zumindest wieder rückgängig gemacht werden. Die bodenmechanischen Eigenschaften werden dabei i. d. R. verschlechtert. Neben den bodenmechanischen Parametern bestimmen das Vorhandensein und die Eigenschaften des Wassers das Verhalten des Bodens.

#### 2.1.1 Wasserhaushalt und Eisbildung

Die Frosteinwirkung auf Bodenschichten ist auch in anderen Zweigen des Bauwesens, insbesondere im Straßenbau, von großem Interesse. Über die grundlegenden Phänomene gibt es eine umfangreiche Spezialliteratur; auf einige der einschlägigen Arbeiten sei hier verwiesen; Scheffer & Schachtschabel (1989), Czurda & Wagner (1985), Kay & Perfect (1988), Wada & Nagasato (1983), Nakano (1990), Ladányi & Shen (1989), Konrad & Morgenstern (1980). Hier seien nur die wichtigsten Phänomene und Begriffe erläutert.

Der Temperaturgradient bewegt das Wasser zur kälteren Seite, siehe auch Kapitel H, Feuchtehaushalt. Dort, wo die Temperaturen unter 0 °C fallen, gefriert das Wasser. Das kann sowohl an der Oberfläche (Kammeisbildung) als auch im Porenraum geschehen. Die Vorgänge hängen stark von der Auflast ab. Je nach Bodenart und Feuchtigkeitsnachschub aus dem Untergrund können sich Eislinsen bilden, die eine Volumenvergrößerung zur Folge haben. Während Sande und grobkörnigere Böden nach dem Auftauen kaum verändert sind, werden feinkörnige bindige Böden durch das Gefrieren hinsichtlich Struktur, Festigkeit und Durchlässigkeit beeinträchtigt.

#### 2.1.2 Einflußfaktoren auf den Frost im Baugrund

Die wichtigsten Einflußfaktoren auf den Frost sind:

- Bodenmaterial      Korngrößenverteilung, Trockendichte, Porenvolumen, Mineralart, Durchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit
- Wasser              Verfügbarkeit, Verteilung, Salzgehalt, Ionengehalt, Viskosität
- Wetter              Temperaturniveau, Temperaturgradient, Wind, Sonneneinstrahlung
- Auflast              Größe, Verteilung, Dämmeigenschaften
- Zeit                  Frostdauer

Für die Abschätzung der **Frosttiefe** stehen die verbesserten Berggren-Formeln mit den von Sanger (1959) veränderten Diagrammen zur Verfügung. Auch bei einer Kiessandschutzschicht von 35–60 cm wurden Frosttiefen bis zu 1,3 m gemessen (Dahms, 1985). Alle drei Jahre muß mit einer Frosteindringtiefe von 50 bis 60 cm gerechnet werden. Diese Werte sind jedoch von der örtlichen Lage abhängig. In konkreten Fällen sind die örtlichen Klimabedingungen bzw. eigene Messungen zu berücksichtigen.

Bei einem **geschlossenen System**, wo es für einen gefrierenden Bodenkörper keine Möglichkeit der Wasseraufnahme (z. B. aus dem Grundwasser) oder Wasserabgabe gibt, kann es nur zu örtlichen Wassermulagerungen kommen. Der Gesamtwassergehalt ändert sich nicht.

In einem **offenen System** ist der Nachschub von Wasser aus dem Grundwasser zur Frostzone hin gewährleistet. Es kommt zu erheblichen Eislinsenbildungen und der Gesamtwassergehalt steigt infolge des aufgenommenen Wassers. Offene Systeme können bei hohen Auflasten aber auch dazu führen, daß durch die Volumenausdehnung beim Übergang vom Wasser zu Eis an der Gefrierfront Wasser in tiefere, noch nicht gefrorene Bodenschichten gedrückt wird. In den betroffenen Bereichen kann es demzufolge auch zu einer Abnahme des Wassergehaltes kommen.

Durch die **Auftaugeschwindigkeit** wird festgelegt, ob das Bodensystem sich in drainierten oder undrainierten Verhältnissen befindet und ob evtl. eine sich auswirkende Konsolidierungszeit gegeben ist. Bei gering durchlässigen Böden und einem schnellen Temperaturanstieg hat das anfallende Schmelzwasser der Eislinse keine Möglichkeit zu versickern. Es herrschen unkonsolidierte, undrainierte Verhältnisse. Das sich im Boden gebildete zergliederte Gefüge bleibt bestehen, wenn die Eiskristalle die Möglichkeit haben, sublimierend zu verdampfen (Frostgare) oder das Schmelzwasser schnell zwischen den entstandenen Aggregaten versickern kann.

Bei den verschiedenen **Tonmineralarten** ist die Wasserwanderung in unterschiedlichem Maß in den gebundenen Wasserschichten zur Eislinse hin möglich. Nach Grim (1951) ist bei Montmorillonit das Bodenwasser in einer ausgeprägten Ordnung angelagert und daher nur in einem geringen Maß beweglich. Die Tonmineralarten Illit und Kaolinit lassen wegen der dünneren und weniger fest gebundenen Wasserhüllen größere Wasserbewegungen und damit Eislinnenbildungen zu (Jessberger, 1971; Stepkowska, Skarzynska, 1989). Die Kationenbelegung beeinflusst die Wasserwanderung wie folgt:

- a) Na-Ionen führen zu einer relativ dicken Schicht gebundenen Wassers, das so wenig beweglich ist, daß eine Eislinnenbildung nur in begrenztem Umfang möglich ist. Czurda und Schababerle (1990) führen aus ihren Versuchen an verschiedenen Bentoniten an, daß beim Na-Bentonit das durch den Gefrierprozeß erworbene Gefüge durch das Quellen während des Auftauvorganges größtenteils wieder rückgängig gemacht wird.
- b) Bei Ca- und Mg-Ionen ist die Wasserhülle geordneter aber auch dünner. Eine Eislinnenbildung ist erst ab einem bestimmten (nicht angegebenen) Wassergehalt der Probe relevant.
- c) Bei K- und Fe-Ionen ist die Dicke der gebundenen Wasserschicht noch geringer als bei Ca- oder Mg-Ionen. Schon bei geringen Wassergehalten ist daher bewegliches Wasser vorhanden und eine Eislinnenbildung möglich.

### 2.1.3 Änderung von Bodenparametern bei feinkörnigen Böden

Bei natürlichen Bodensystemen hat sich im Laufe der Zeit ein Gleichgewicht zwischen Frosthebung und Eislinnenbildung im Winter und der Tausetzung und Austrocknung im Frühjahr/Sommer eingestellt. Anders liegen die Verhältnisse bei erstmalig einem Frost-Tau-Wechsel ausgesetzten künstlich verdichteten mineralischen Abdichtungen, die ihre Einbaukennwerte zur Aufrechterhaltung ihrer Funktion behalten sollen. Hier wird neben einer allgemeinen langfristigen Anpassung an die Umgebungsrandbedingungen (z. B. Wasserhaushalt und Dichte) ein erster Frosteintrag grundsätzliche Auswirkungen nach sich ziehen, bei denen sich die für

ein Gleichgewicht notwendigen Strukturen einstellen (z. B. Wasserwegsamkeiten für Austauschprozesse bei wechselnden Randbedingungen, passende "natürliche" Wassergehalt/Dichte-Verhältnisse).

Die hauptsächliche Auswirkung des Frostes im Boden ist eine Veränderung des **Wasserhaushaltes**. Bei den mineralischen Abdichtungsschichten liegt i. d. R. ein geschlossenes System vor (oben mindestens Kunststoffdichtungsbahn, unten kein Grundwasser in kapillar gefährdender Nähe), so sind relativ kleine Wassergehaltsänderungen zu erwarten.

Für die Deponieabdichtungen ist die Veränderung der **Durchlässigkeit** von größter Bedeutung. Die Mehrzahl der Veröffentlichungen beschreiben eine Vergrößerung der Durchlässigkeit nach einem oder mehreren Frostdurchgängen um eine bis zwei Zehnerpotenzen (Aoyama et al., 1985; Chamberlain, Gow, 1979; Sehrbrock, Rodatz, 1988). Das wird trotz der These, daß sich die Tonplättchen senkrecht zum Gefrierdruck einregeln und die Durchlässigkeit damit herabsetzen, mit dem verzweigten Netz von Schrumpfrissen begründet, deren Existenz auch von Graham und Au (1985) bestätigt wird.

Es gibt jedoch zahlreiche Veröffentlichungen aus der Deponietechnik, die eine im wesentlichen unveränderte Durchlässigkeit auch bei voller und mehrmaliger Durchfrostung angeben (Dahms, 1985; Karczmarzyk, 1986). Eine Begründung für das unterschiedliche Verhalten ist aus den Literaturangaben über die Versuchsdurchführungen bisher nicht abzuleiten. Bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, daß bei höheren Spannungsniveaus kleinere Dichtigkeiten erhalten werden, die in der gleichen Größenordnung wie die der ungefrorenen Proben liegen.

Das stützt die These der wegsamen Schrumpfrisse, die durch den erhöhten Druck weitgehend geschlossen werden. Eine spätere Müllauflast auf eine durch Frost in der Durchlässigkeit beschädigte Abdichtung kann offensichtlich wieder eine Verringerung der Durchlässigkeit erwirken. Leider gibt es nur wenige umfangreiche Untersuchungen, die gleichzeitig auch die Tragfähigkeiten der entsprechenden Bodenzustände angeben.

### 2.1.4 Schutzmaßnahmen

Im Endzustand sind die Deponieabdichtungsschichten durch die darüberliegenden Schichten von Müll oder bei Oberflächenabdichtungen durch Bodenschichten gegen Frosteinwirkung geschützt. In Bauzuständen wird es – besonders auf der Böschung – nicht immer möglich sein, vor der nächsten Frostperiode eine ausreichend dicke Schicht der endgültigen Abdeckung aufzubringen. Dann müssen die Erdstoffabdichtungsschichten provisorisch abgedeckt werden. Burkhardt & Hommel (1990) diskutieren anhand von Ausführungsbeispielen die verschiedenen Möglichkeiten, deren jeweilige Wirksamkeit durch Wärmetransport-Berechnungen nachgewiesen werden

kann. Es werden u. a. 10–20 cm dicke Strohmatte, Maten aus Steinwolle oder Styropor und Schüttung einer 30 cm dicken Schicht aus Rohkompost bezüglich ihrer wärmetechnischen Eigenschaften und ihrer Kosten betrachtet. Wichtig für die Wirksamkeit ist die Sicherung gegen Wind und eindringende Feuchtigkeit.

### 2.1.5 Schlußfolgerungen

Die Gefährdung einer mineralischen Abdichtung durch die Einwirkung von Frost ist grundsätzlich gegeben. Gefährdung bedeutet, daß das Material zumindest zeitweise die gestellten Anforderungen nicht mehr erfüllt. Beeinflußt wird durch den Frost primär die Wasserverteilung in der Dichtungsschicht; hieraus resultieren dann unvermeidbare Qualitätsverschlechterungen. Stark beeinflussend sind hierbei die Randbedingungen.

- a) Liegt die Abdichtung in der kapillaren Nähe eines Grundwasserleiters und liegt damit ein offenes System vor, besteht die Gefahr einer ausgeprägten Eislinienbildung. In Abhängigkeit der Frostintensität sind Eislinien innerhalb des Materials und an der Grenzfläche zum Planum zu erwarten. Nach dem Auftauen bilden sich Schmierfilme, da das Wasser nicht schnell genug drainieren kann.

Im Sohlbereich bewirken die Wasserumlagerungen Richtung Oberfläche nach dem Auftauen "nur" eine Abnahme der Dichte bzw. Zunahme der Konsistenz und damit der Tragfähigkeit. In den Böschungen besteht zusätzlich die Gefahr von Rutschungen auf den Schmierfilmen. Auch die Fuge zwischen der mineralischen Abdichtung und der Kunststoffdichtungsbahn ist durch die Herabsetzung der Reibung an den Böschungen gefährdet.

- b) Liegt die Abdichtung nicht in kapillarer Nähe eines Wasserreservoirs, so werden die Eislinien wesentlich dünner ausfallen. Es entsteht aber in den meisten Fällen ein von feinen Rissen zergliedertes Gefüge.
- c) Wenn das Abdichtungssystem nicht vor der zu erwartenden Frostperiode durch ausreichend dicke Müll- oder Erdschichten überschüttet werden kann, muß die mineralische Abdichtungsschicht provisorisch abgedeckt werden.

## 2.2 Physiko-chemische Wechselwirkungen

Die wichtigsten im Boden vorkommenden Minerale in Bezug auf geringe Durchlässigkeit, Dauerhaftigkeit und langzeitige Stabilität sind die Tonminerale, Mitchell & Jaber (1990). Besonders empfindlich gegen chemische Einwirkungen sind die stark wasserhaltenden Tonminerale wie Smektit und Montmorillonit. Andere Boden-Minerale, wie z. B. Karbonat, können in den Chemikalien der Sickerwässer löslich sein und sollen deshalb in Erdstoffabdichtungsschichten nicht vorhanden sein. Die folgenden Ausführungen beschränken sich deshalb auf Tone und Tonminerale.

### 2.2.1 Einflüsse

Die chemischen Substanzen erreichen die mineralische Abdichtungsschicht an der Deponiebasis mit dem Sickerwasser. Leider variieren die Inhaltsstoffe des Sickerwassers von Deponie zu Deponie sehr stark, wobei die Zusammensetzung noch nicht einmal zeitlich konstant ist. Deshalb ist es sinnvoll, wie Kohler & Morteani (1984) die Sickerwässer nach der chemischen Natur ihrer Inhaltsstoffe zunächst in anorganische und organische zu unterteilen und bei den organischen Inhaltsstoffen die vier Untergruppen "Organische Säuren", "Organische Basen", "Neutrale polare Verbindungen" und "Neutrale unpolare Verbindungen" zu unterscheiden. Diese Einteilung ist sowohl hinsichtlich einer allgemeinen Systematik als auch für Versuchsprogramme sinnvoll.

In Versuchen werden oft konzentrierte und reine Chemikalien verwendet, um die denkbar ungünstigsten Bedingungen und/oder einen gewissen Zeitraffereffekt herzustellen. Im Sickerwasser heutiger Deponien treten die Chemikalien jedoch fast ausschließlich in wäßriger Lösung auf.

Bei den Prozessen sind zusätzliche Einflußgrößen wie Temperatur und Auflast zu berücksichtigen. Insbesondere hat die Auflast in Basisabdichtungen Werte, die die Vorgänge erheblich beeinflussen.

### 2.2.2 Tonmineralogische und geochemische Veränderungen

Ton besteht aus Tonmineralen, Bindemittel (Porenzemente) und Wasser. Die Chemikalien des Sickerwassers wirken auf die drei Bestandteile in unterschiedlicher Art ein. Wienberg (1990a; 1990b) unterscheidet beim Einfluß organischer Schadstoffe unspezifische und spezifische Interaktionen. Die unspezifischen Interaktionen beeinflussen die Tone nur in ihrem kolloidchemischen Verhalten, die spezifischen verändern dagegen die Struktur und den Mineralbestand der Tone.

Zunächst sollen die kolloidchemischen oder hydrochemischen Veränderungen betrachtet werden. Ton ist eine Struktur aus Festteilchen und Wasser. Die an ihrer Oberfläche negativ geladenen Tonteilchen sind von einer elektrischen Doppelschicht umhüllt, in der eine hohe Kationenkonzentration besteht, Scheffer & Schachtschabel (1989). Erst in einer gewissen Entfernung beginnt die sog. Gleichgewichtslösung, in der unter natürlichen Bedingungen eine niedrige Kationen- und Anionenkonzentration herrscht. Die Gleichgewichtslösung steht für Transportvorgänge zur Verfügung.

Nach dem Vorstehenden leuchtet ein, daß chemische Substanzen in der Porenflüssigkeit, die sich in ihren elektrischen Eigenschaften – ihrer Polarität – stark von denen des Wassers unterscheiden, eine besonders große Änderung hervorrufen. Die Polarität wird durch die Dielektrizitätskonstante, die für Wasser einen sehr hohen

Wert hat, charakterisiert. Flüssigkeiten mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstanten, wie z. B. Benzol, führen zum Kollaps der Doppelschicht, Madsen & Mitchell (1988), Wienberg (1990a; 1990b). Der Ton nimmt dann eine flockige Struktur mit größeren Makroporen an, wodurch die Durchlässigkeit stark ansteigt. Diese Auswirkung kann durch ausreichend große effektive Druckspannungen mindestens vermindert werden, Foreman & Daniel (1986), siehe Kapitel J "Hydraulische Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungsschichten". Die Strukturänderungen sind reversibel: Bei erneuter Durchströmung mit Wasser bildet sich wieder die dispergierte Struktur, Fernandez & Quigley (1985).

Hettiaratchi & Hruddy (1987) ermittelten Sedimentvolumina von Montmorillonit-Böden. Hierbei wurde je 10 g Boden in 100 ml einer konzentrierten wäßrigen Lösung verschiedener organischer Substanzen gegeben. Das gemessene Sedimentationsvolumen nimmt mit abnehmender Dielektrizitätskonstanten entsprechend zunehmender Koagulierung ab. Man kann mit diesem Versuch also relativ schnell feststellen, ob für eine bestimmte Kombination Boden-Schadstofflösung ein Anstieg der hydraulischen Durchlässigkeit zu erwarten ist.

Wagner (1988) berichtet von Ribbildung einer mit einer konzentrierten (0,1 M) Zinkchloridlösung durchströmten Probe eines natürlichen Tons. Dabei traten Mineralneubildungen auf. Es konnte nicht geklärt werden, ob es hierbei zu einer Volumenabnahme oder -zunahme kam. Der Versuch wurde ohne Auflast durchgeführt.

Bei den spezifischen Wechselwirkungen kommt es nach Wienberg (1990a; 1990b) "zur direkten Ausbildung von sorptiven und/oder chemischen Bindungen mit den Feststoffphasen". Der Autor unterscheidet zwei Arten von Sorption: die Chemisorption, mit hoher Bindungsenergie, 60 kJ/mol bis 200 kJ/mol, und die physikalische Sorption mit Enthalpien von 4 kJ/mol bis 8 kJ/mol. Letztere beruht auf van der Waalsschen Kräften und elektrostatischen Wechselwirkungen. Dazwischen liegen die Wasserstoffbrückenbindungen mit Bindungsenthalpien von 12 kJ/mol bis 40 kJ/mol.

Die Energiebeträge sind ein Maß für die Dauerhaftigkeit der Sorption. Bei der Desorption müssen diese Energiebeträge zur Verfügung stehen. Wegen ihrer hohen Bindungsenthalpien kann die Chemisorption oft als irreversibel bezeichnet werden, d. h. unter Umweltbedingungen gehen die sorbierten Substanzen nicht wieder in Lösung, Wienberg (1990a; 1990b). Die schwächeren Bindungsarten sind dagegen reversibel, d. h., die Substanzen gehen wieder in die Porenflüssigkeit, wenn dort die Schadstoffkonzentration zurückgeht. Dieses Verhalten wird durch die Sorptionsisotherme beschrieben, für die hier als Beispiel die lineare Freundlich-Isotherme angegeben sei

$$q_e = K_p \cdot C_e$$

Diese Gleichung beschreibt das Gleichgewicht zwischen dem sorbierten Anteil  $q_e$  zum gelösten Anteil  $C_e$ . Der lineare Sorptionskoeffizient oder Verteilungskoeffizient  $K_p$  hat für jede Paarung Schadstoff – Ton oder Tonmineral einen anderen, konstanten Wert. Die maximal mögliche Sorption stellt sich ein, wenn der Schadstoff mit seiner Wasserlöslichkeit im Porenwasser präsent ist. Wienberg (1990a; 1990b) gibt für verschiedene organische Substanzen und für verschiedene Tone Zahlenwerte an.

Hydrophobe, unpolare bis gering polare organische Schadstoffe reagieren mit Ton unspezifisch über die Veränderung der Doppelschicht. Die hydraulische Durchlässigkeit ändert sich zwar, die Tone werden jedoch nicht verändert. Die Sorption erfolgt mit niedriger Enthalpie und ist reversibel; d. h., die Sorption hat nur einen zeitverzögernden Effekt auf das Rückhaltevermögen einer Tondichtung.

Organische Kationen werden von den Tonmineralen in starkem Maß gebunden. Quarternäre Alkylammonium-Verbindungen verändern die Oberfläche der Tonminerale nachhaltig. Diese Stoffe können gezielt zur Modifikation von mineralischen Abdichtungsmaterialien verwendet werden.

Organische Säuren können die Porenzemente der Tone und auch die Tone selbst lösen. Es kann dabei zur Bildung von stabilen tonorganischen Komplexen kommen, die einen erheblichen organischen Anteil enthalten können, Kohler & Morteani (1984).

Insgesamt sind erhebliche Veränderungen der physikochemischen Eigenschaften des Abdichtungstons zu erwarten und zwar nicht nur unter extremen Bedingungen, sondern auch bei realer Sickerwassereinwirkung, Echle et al. (1988).

### 2.2.3 Auswirkungen auf bodenmechanische Eigenschaften

Folgende bodenmechanische Eigenschaften werden beeinflusst: hydraulische Durchlässigkeit, Zusammendrückbarkeit, Schwellverhalten, Konsistenzgrenzen, Flexibilität und Scherfestigkeit. Die hydraulische Durchlässigkeit wird ausführlich in Kapitel J behandelt.

Zusammendrückbarkeit, Schwellverhalten und Konsistenzgrenzen ändern sich besonders dann, wenn bei reinem Wasser die diffuse Doppelschicht bestanden hat bzw. wenn sie durch die chemische Einwirkung zerstört wird, Foreman & Daniel (1986).

In eindimensionalen Konsolidationsversuchen von Mesri & Olson (1971) änderte der Na-Montmorillonit sein Konsolidations- und Schwellverhalten wie nach der Doppelschicht-Theorie von Gouy-Chapman vorausgesagt. Der Ca-Montmorillonit erwies sich dagegen als

unabhängig von Elektrolytkonzentration und pH-Wert des Wassers während der Sedimentierung. Mit Ethanol angemischter trockener Montmorillonit nahm viel kleinere Porenziffern an als bei Wasser als Porenflüssigkeit. Bei nicht-polaren Flüssigkeiten ergaben sich noch kleinere Porenziffern; das Schwellen betrug nur noch 1 % bezogen auf das Schwellen mit Wasser. Reuter & Meseck (1986) stellten eine bis zu 50 %ige Abnahme des Quellvermögens von Bentonit bei Einwirkung verschiedener Prüfflüssigkeiten fest. Diese waren wäßrige (5–10 %) Lösungen organischer und anorganischer Substanzen und synthetische saure und alkalische Sickerwässer.

Die Konsistenzgrenzen, Fließ- und Ausrollgrenze, sind mit Wasser am größten, weil Wasser im größten Ausmaß von den Tonmineralen gebunden werden kann. Organische Schadstoffe beeinflussen die Konsistenzgrenzen, Daniel et al. (1985), Acar & Seals, (1984). Wienberg (1990a, 1990b) faßt die Ergebnisse dieser Untersuchungen wie folgt zusammen: Wäßrige Schadstofflösungen und Deponiesickerwässer haben nur einen schwachen Einfluß. Bei konzentriertem Methanol oder Xylol sind die Böden nicht mehr plastisch. Nur für die quellfähigen Montmorillonite ist eine eindeutige Abnahme der Fließgrenze mit abnehmender Dielektrizitätskonstanten zu erkennen.

Während die Auswirkung von Chemikalien auf die hydraulische Durchlässigkeit eingehend untersucht wurde, gibt es nur wenig Arbeiten in Bezug auf eventuelle Änderungen der Scherfestigkeit und der Flexibilität. Diese Größen sind jedoch für Stand sicherheitsprobleme bzw. für die Reißgefährdung wichtig.

Grundsätzlich ist auch hierbei das Wasserbindungsvermögen der wichtigste Parameter. Bei zusammen-

brechender Doppelschicht nimmt der Ton eine flockige Struktur an, die weniger Wasser enthält und dichter gelagert ist. Dadurch erhöhen sich Scherfestigkeit und Steifigkeit, während das Material bei Deformation spröder reagiert, Pamukcu et al. (1990). Düllmann (1987a) stellte an der nach achtjähriger Betriebszeit aufgegrabenen Hausmüll-Deponie Geldern-Pont eine deutliche Zunahme der Festigkeit im oberen Bereich der Tonabdichtung der Basis fest. Diese, mit Flügelsonde und Penetrometer festgestellte "Verfestigung" ist sowohl auf hydrochemische Einflüsse als auch auf geochemische Veränderungen zurückzuführen, Bracke et al. (1991).

Komodromos & Göttner (1988) beobachteten an kaolinitischen und smektitischen Tonproben nach bis zu 20tägiger Lagerung in Methanol oder Hexan eine erhebliche Festigkeitszunahme im Standpenetrometer, die offenbar auf eine Reduzierung des Wassergehalts infolge Chemikalieneinwirkung zurückzuführen war. Bei erneuter Wasserlagerung wurde wieder die Ausgangsfestigkeit erreicht.

Pamukcu et al. (1990) stellten fest, daß die Zumischung von bis zu 20 % Flugasche oder Hausmüllschlamm zu Kaolinit den Schubmodul stark gegenüber dem Wert bei reinem Kaolinit ansteigen ließ. Eine Zumischung mit Treibstoff ergab dagegen eine niedrige Dichte, hohes Wasserbindungsvermögen und eine kleine Festigkeit.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die bodenmechanischen Eigenschaften sich nicht so stark verändern, wie die physiko-chemischen Eigenschaften des Tons. Für die Baupraxis am wichtigsten ist wahrscheinlich die Tendenz zur Versprödung der Erdstoffabdichtung.

### 3 Verbesserte und innovative Baustoffe

Die beschriebenen Einwirkungen verändern den Ton. Diese Veränderungen müssen jedoch nicht immer negativ sein: man kann sie bewußt ausnutzen, indem man das vorliegende Bodenmaterial durch Zumischungen, Bauarten und Behandlungsmethoden gezielt verbessert.

#### 3.1 Verdichten, Zumischen, zweischichtige Systeme

Je höher die Trockendichte, desto geringer der Porenanteil. Mit abnehmendem Porenanteil nimmt im allgemeinen auch die Durchlässigkeit des tonigen Abdichtungsmaterials ab. Deshalb wird in Deponierichtlinien eine gewisse Proctordichte gefordert. Allerdings kommt in der weiteren Forderung, daß auf der "nassen Seite" des Proctroptimums eingebaut werden soll, zum Ausdruck, daß bei gleicher Trockendichte ein größerer Wassergehalt dem Erdstoff eine geringere Durchlässigkeit gibt. Diese Tatsache ist darauf zurück-

zuführen, daß bei feuchterem und damit plastischerem Boden die Größe und Anzahl der Makroporen mit Verdichtung besser minimiert werden können. Durch Einstellen von bestimmten Korngrößenverteilungen kann man die Trockendichte bis an die von Beton heran erhöhen. Hierunter fallen der kornabgestufte Boden, Steffen (1990), die "Trockendichtung", Finsterwalder (1988), und Dichtwandmassen mit Wasserglas, Hitze (1987). Bei der Kornabstufung genügen 1 % oder 2 % Bentonit, um die verbliebenen Poren zu füllen. Die so hergestellte Dichtungsschicht schrumpft nicht, weil sie ein stabiles Korngerüst besitzt; sie ist jedoch wenig plastisch. Heute sind "fettere" Mischungen üblich, Steffen (1990), zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und zur Sicherstellung, daß überall im Boden eine Mindestmenge von Bentonit vorhanden ist. Mitunter wird die Quellfähigkeit der zugemischten Tone betont, Kohler & Morteani (1984). Bei Wasser als Durchsickerungsmedium sind quellfähige Tone ideal; bei Schadstofflösungen besteht, wie geschildert, die Gefahr



der Koagulation. Bei der noch in der Erprobung befindlichen "Trockendichtung" wird Kies, Sand und Bentonit trocken gemischt und mit hoher Dichte eingebaut, Finsterwalder (1988). Auch die Verwendung von kornabgestuften Gemischen zusammen mit Wasserglas ergibt hohe Trockendichte und gute Verarbeitbarkeit als Dichtwandmasse, Hitze (1987).

Die in der Erprobung befindliche, von Czurda (1990) entwickelte Bauweise besteht aus einer zweischichtigen Basisabdichtung. Die oben liegende Schicht aus quellfähigem Bentonit hat keine Dichtfunktion. Etwaige Schrumpfvorgänge infolge von Schadstoffen im Sickerwasser sind unschädlich bzw. sogar erwünscht, um den guten Kontakt mit den Schadstoffen und deren Sorption zu erleichtern. Die darunter liegende nicht quellfähige Tonschicht ist gegenüber chemischen Angriffen resistenter und dient ausschließlich der Dichtung.

Nach heute vorherrschender Expertenmeinung wird der Sorption in rein mineralischen Abdichtungssystemen keine besondere Bedeutung zugemessen, UBA (1992). Vielmehr wird eine hohe Trockendichte und ein chemisch resistentes Bindemittel gefordert.

### 3.2 Anorganisch-chemische Verbesserungsverfahren

Nach Kohler & Morteani (1984) wird bei diesen Verfahren die Verringerung des Porenraums angestrebt. Es wird ein künstlicher Porenzement erzeugt, der gegenüber allen chemischen Angriffen weitgehend resistent sein soll. Kohler & Morteani (1984) unterscheiden die Verbesserungsverfahren nach den Bindemitteln: Zement, Wasserglas oder Bitumen. Alle drei Zusätze reagieren mit dem Ton chemisch. Die jeweils unterschiedlichen Reaktionen beeinträchtigen oder verhindern das Quellen des entstandenen Abdichtungsstoffs. Kohler & Morteani (1984) zeigen, daß Bentonit-Zement-Systeme auch nach 26 Monaten noch keinen chemisch stabilen Zustand erreicht haben.

Nach Hitze (1987) erweisen sich nur zementfreie Dichtwandmassen als schadstoffresistent. Die 28 Tage alten Proben wurden einem Deponiesickerwasser ausgesetzt. Es wurden Einphasen- und Zweiphasen-Dichtwandmassen untersucht, bei denen Wasserglas die

Bindemittelfunktion übernahm. Das Wasserglas wurde mit geringen Mengen eines organischen Stoffes (DynagROUT) modifiziert. Diese Dichtwandmassen erlauben einen hohen Feststoffanteil bei guter Verarbeitbarkeit.

Nach Belouschek & Kügler (1990) ist Wasserglas gegen nahezu alle Chemikalien bis auf Flußsäure und starke Alkalien wie Ätznatron resistent.

### 3.3 Organisch-chemische Verbesserungen

Nach Kohler & Morteani (1984) können Tone, insbesondere Montmorillonit große Mengen einer ganzen Reihe von organischen Stoffen einlagern. Die organischen Substanzen sind dabei nicht nur sorptiv, sondern auch chemisch in "tonorganischen Verbindungen" gebunden, Kohler & Morteani (1984). Diese Möglichkeit bedeutet jedoch nicht, daß jeder organische Schadstoff von jedem Ton in großer Menge zurückgehalten wird: Die von Wienberg (1990a; 1990b) für einige Tone angegebenen maximal möglichen Sorptionswerte bezüglich einer Reihe von unpolaren Schadstoffen betragen im Höchstfall nur einige Promille. Wie schon im Abschnitt 3 im Kapitel J mitgeteilt, kann um so mehr absorbiert werden, je größer der organische Anteil der Tone ist. Die tonorganischen Verbindungen sind nach Wienberg (1990a; 1990b) für hydrophobe Substanzen wesentlich sorptiver als die beiden Einzelkomponenten, Ton und organisches Material, jeweils sind.

Das Zusammenwirken von Ton und organischem Material bietet die Möglichkeit, "maßgeschneiderte" Abdichtungsmaterialien herzustellen, Wienberg (1990a; 1990b). Hierzu sind quarternäre Ammoniumverbindungen ideal geeignet. Ein Beispiel hierfür sind organophilisierte Bentonite, die besonders gut zur Aufnahme von Lösemitteln geeignet sind, Kuhn & Weiss (1988). Diese und in anderer Weise aktivierte Bentonite werden bereits von der Industrie angeboten.

Geringe Zusätze von Organosilanen zum Wasserglas bewirken eine wesentlich bessere Vernetzung des Gels mit den Bodenkörnern. Es entstehen Dichtwandmassen hoher Trockendichte und großer Langzeitbeständigkeit, Hass (1987).

## 4 Ergebnisse aus Aufgrabungen

Laborversuche, Modellversuche und Probefelder haben in der Regel zwei Nachteile: die Versuchszeit ist kurz im Vergleich zu Deponie-Betriebszeiten, und die Deponie-Betriebsbedingungen können nur unvollkommen simuliert werden. Die Langzeitfunktionsfähigkeit kann nur mit zeitraffenden Methoden (Konzentrations- und/oder Temperaturerhöhungen) abgeschätzt werden. Zur Überprüfung dieser Methoden und wegen der in Labor-

versuchen idealisierten Bedingungen sind Erfahrungen aus Aufgrabungen von Deponieabdichtungen nach langjährigem Betrieb unerlässlich.

Auf der Hausmülldeponie Geldern-Pont wurden Polder mit verschiedenen Basisabdichtungssystemen angelegt mit der Absicht, sie nach einigen Jahren wieder freizulegen, Düllmann (1987b). Während des acht-

jährigen Betriebs erwies sich die die Abdichtung bildende Tonschicht als absolut dicht, d. h., sie wurde nicht konvektiv durchströmt, Düllmann (1987). Der Wassergehalt blieb unverändert. Die obere Hälfte der Tonabdichtung war in ihrer geochemischen Zusammensetzung deutlich verändert, während die untere Hälfte gegenüber dem Einbauzustand unverändert blieb, Echle et al. (1988). Oben nahm der Anteil der quellfähigen Tonminerale ab, und es kam zu einer deutlichen Anreicherung von organischer Substanz. Innerhalb der Tondichtung fanden die chemischen Prozesse einschließlich anaerober Bakterientätigkeit wie innerhalb der Deponie statt, Bracke et al. (1991). Diese Autoren schreiben der Tondichtung lediglich eine verzögernde Funktion zu.

Der Abnahme der quellfähigen Tonminerale entsprach eine Abnahme der Fließgrenze und der Plastizität, Düllmann (1987). Diese "Verfestigung" zeigte sich auch an der Zunahme der Scherfestigkeit in der oberen Hälfte der Dichtungsschicht.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Erdstoffabdichtungen verändern sich vielfältig unter physikalischen und chemischen Einwirkungen. Wichtig ist letzten Endes, ob die Funktionsfähigkeit der Abdichtungsschicht langfristig gewährleistet ist.

Katastrophale Auswirkungen zeigen sich nur in Laborversuchen unter verschärften Bedingungen. Aber auch unter Deponiebedingungen sind langfristig starke tonmineralogische und geochemische Veränderungen zu erwarten, die i. allg. weniger stark ausgeprägte bodenmechanische, für die Praxis relevante Veränderungen nach sich ziehen. Der früher vielfach befürchtete starke Anstieg der hydraulischen Durchlässigkeit an der Deponiebasis ist wegen der dort vorhandenen Auflast nicht zu erwarten. Die Festigkeit wächst eher an und verändert sich somit in günstiger Weise. Nachteilig ist dagegen die Tendenz der Tone, bei chemischer Einwirkung zu verspröden. Hier gibt es offenbar bisher noch keine systematischen Untersuchungen. Da heute die Sorption in rein mineralischen Abdichtungssystemen als nicht mehr unbedingt notwendig angesehen wird, sollte man auf empfindliche quellfähige Tonminerale verzichten. In der Kombinationsdichtung findet nur diffusiver Transport in der mineralischen Abdichtungsschicht statt. Deshalb haben hier gute sorptive Eigenschaften einen größeren Einfluß, da sie den Schadstoffaustrag erheblich verzögern.

Die Reaktionen des Tons mit Schadstoffen sind vielfältig und noch weitgehend unbekannt. Selbst wenn man nur die Wechselwirkung mit Metallen betrachtet, besteht nach McBride (1989) keine Hoffnung, daß jemals eine ausreichende Anzahl von Versuchen durchgeführt sein wird, um die Probleme experimentell zu klären. Notwendig sei ein besseres theoretisches Verständnis aller

Echle et al. (1988) rechnen aufgrund der Aufgrabungsergebnisse langfristig mit Änderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Tons. Es kann zu Koagulation in der Kolloidfraktion und damit zu verstärkter Aggregatbildung kommen, die sich ungünstig auf die Dichtigkeit auswirkt. Wegen der Abnahme der quellfähigen Tonminerale nimmt die Sorptionskapazität ab.

Farquhar & Parker (1988) berichten über Aufgrabungen an fünf Deponien, die zwischen 7 und 15 Jahren in Betrieb waren. Zusammenfassend stellen sie fest, daß Deponie-Sickerwässer die Tone bezüglich des Schadstofftransports nicht stark verändern. Bei einigen Deponien waren Na- und Cl-Ionen wesentlich tiefer als Schwermetallionen eingedrungen. Hieraus schlossen die Autoren, daß Diffusion der überwiegende Transportmechanismus gewesen war. Es wird die Vielfalt der chemischen Vorgänge im Ton bei Schadstoffeinwirkung betont und wie wenig davon bisher bekannt sei. Die Autoren sind hauptsächlich an Transportvorgängen interessiert. Änderungen bezüglich Konsistenzgrenzen, Verformbarkeit und Festigkeit werden nicht mitgeteilt.

chemischer Prozesse, um allgemeine chemische Prinzipien auf spezielle Situationen anwenden zu können. Für die Deponiepraxis bedeutet das, möglichst resistente natürliche Abdichtungsmaterialien zu verwenden bzw. entsprechend modifizierte zu entwickeln. Hierbei ist die Aufbereitung von Abfallstoffen volkswirtschaftlich besonders interessant. Auch eine möglichst hohe Trockenichte, die man durch geeignete Kornabstufung erreicht, verhindert eine starke Veränderung der Durchlässigkeit infolge Schadstoffeinwirkung.

Ein erster Schritt in Richtung auf das von McBride (1989) geforderte bessere theoretische Verständnis ist der Ansatz von Wienberg (1990a, 1990b), die Bindungen nach ihren Energiebeiträgen zu klassifizieren. Hier besteht eine Analogie zum Potentialkonzept der Bodenphysik, siehe Kapitel H Feuchtehaushalt, bei der die Bindungsenergie des Wassers im Boden quantifiziert ist und die Wasserbewegung vom Energiegradienten regiert wird. Entsprechend müßte die Aggressivität der einwirkenden Chemikalien durch Energiebeiträge quantifiziert werden. Damit könnte die physikalische Basis der Voraussagen bezüglich der zu erwartenden Veränderungen verbessert werden.

Hinsichtlich der Frosteinwirkung sollte näher untersucht werden, wie stark die Festigkeit abnimmt und wie sie nach dem Auftauen wieder zunimmt. Das ist besonders für die Standsicherheit von Böschungen wichtig.

Die verschiedenen Einwirkungen auf die Erdstoffabdichtungsschichten kann man zwar nicht ganz verhindern, man kann jedoch manche Einwirkungen durch geeignete Vorschriften bezüglich Bauverfahren und Vorbehandlung und Einlagerung des Mülls abmildern.

Allgemein besteht die Aufgabe darin, einen Erdstoff so auszuwählen oder zu modifizieren, daß er unter den zu erwartenden Beanspruchungen – chemische Einwirkung, Auflast, Temperatur – langfristig die Eigenschaften hat, die für Deponieabdichtungsschichten erforderlich sind.

## 6 Literatur

Acar, Y. B.; Seals, R. K. (1984): Clay barrier technology for shallow land waste disposal facilities. Hazardous Waste 1, S. 167-181.

Aoyama, K.; Ogawa, S.; Fukuda, M. (1985): Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing. 4th Int. Symp. Ground Freezing. 5.-7.8.1985. (ISGF'85). Sapporo, Japan. S. 217-222.

Belouschek, P.; Kügler, J.-U. (1990): Labortechnische Untersuchungen zur Rißbildung sowie zur Rißsicherung von mineralischen Dichtsystemen für Zwischen- und Deckeldichtungen. In: Deponie. Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik. S. 261-278.

Bracke, R.; Hagemann, H. W.; Echle, W.; Püttmann, W. (1991): Geochemische Veränderungen in der Tonbasisabdichtung der Deponie Geldern-Pont nach 8jährigem Deponiebetrieb. Müll und Abfall 7, S. 409-420.

Burkhardt, G.; Hommel, U. (1990): Überlegungen zur Frostsicherung mineralischer Dichtungen. In: Zeitgemäße Deponietechnik IV. Bielefeld: Erich Schmidt. S. 189-210.

Chamberlain, E. J.; Gow, A. J. (1979): Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. Engineering Geology. Vol. 13, S. 73-92.

Czurda, K. A.; Schababerle, R. (1990): Zur Frostempfindlichkeit von mineralischen Abdichtungen. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): Neuzeitliche Deponietechnik. Rotterdam: Balkema. S. 237 - 252.

Czurda, K. A.; Wagner, J.-F. (1985): Frost heave and clay expansion in freshwater clays. 4. Intern. Symposium on Ground Freezing. 5.-7. August. Sapporo. S. 129-136.

Czurda, K. A. (1990): Funktion geologischer und mineralischer Barrieren im Deponiebau. Seminar über multimineralische Deponie-Basisabdichtungen. 27.11.1990. Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz. Bingen.

Dahms, E. (1985): Zur Standortwahl und Abdichtung von Hausmülldeponien in Niedersachsen, Berichte von der 5. Nat. Tagung für Ingenieurgeologie Kiel. DGEG / DGG. S. 99-110.

Daniel, D. E.; Anderson, D. C.; Boynton, S. S. (1985): Fixed wall versus flexible wall permeameters. In: Hydraulic barriers in soil and rock. ASTM STP 874, S. 107-123.

- Düllmann, H. (1987): Geotechnische und baubetriebliche Einflüsse auf die Dichtigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton. – Ergebnisse von Praxisversuchen –. In: Fehla, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1987. S. 215-245.
- Düllmann, H. (1987a): Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen. Erfahrungsbericht über die Freilegung von Versuchsfeldern auf der Deponie Geldern-Pont. In: Seminar über Neuzeitliche Deponietechnik. 12. November 1987. Ruhr-Universität Bochum. S. 43-76.
- Düllmann, H. (1987b): Schadensanalyse mineralischer Deponiebasisabdichtungen. Versuchsfelder 1 und 2 der Deponie Geldern-Pont. Abschlußbericht. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Aachen: Bearbeitet im Auftrag des Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW. Aachen, im Mai 1987.
- Echle, W.; Cevrim, M.; Düllmann, H. (1988): Tonmineralogische, chemische und bodenphysikalische Veränderungen in einer Ton-Versuchsfläche an der Basis der Deponie Geldern-Pont. In: Czurda, K. A.; Wagner, J.-F. (Hrsg.): Tone in der Umwelttechnik. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 4, I-VII, S. 99-121.
- Farquhar, G. J.; Parker, W. (1988): Interactions of Leachates with Natural and Synthetic Envelopes. In: Baccini, P. (Ed.): The Landfill. Reactor and Final Storage. Lecture Notes in Earth Sciences. 20. Berlin: Springer. S. 175-200.
- Fernandez, F.; Quigley, R. M. (1985): Hydraulic Conductivity of Natural Clays Permeated with Simple Liquid Hydrocarbons. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 22, S. 205-214.
- Finsterwalder, K. (1988): Die Abfall-Lagerstätte für geologische Zeiträume. – Eine innovative Deponielösung –. Vortrag. Ruhr-Universität Bochum. Nov. 1988.
- Foreman, D. E.; Daniel, D. E. (1986): Permeation of compacted clay with organic chemicals. Journ. Geot. Eng. ASCE, Vol. 112, S. 669-681.
- Graham, J.; Au, V. C. S. (1985): Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses. Canadian Geotech. Vol. 22, S. 69-78.
- Hass, H. (1987): Chemikalienbeständige Einkapselung von Altlasten. Vortrag anlässlich des Lehrgangs Altdeponien/Altlasten. 05.-06.03.1987. Technische Akademie Esslingen.
- Hettiaratchi, J. P. A.; Hruday, S. E. (1987): Influence of contaminant organic-water mixtures on shrinkage of impermeable clay soils with regard to hazardous waste landfill liners. Hazardous Wastes, Hazardous Materials 4, S. 377-388.
- Hitze, R. (1987): Einsatz der schadstoffresistenten DINAGROUT-Abdichtungsmaterialien, geschildert an konkreten Beispielen der Schadstoff-Umschließung durch Schlitzwandbau und Injektionstechnik. Vortrag anlässlich des Seminars über Altlasten und kontaminierte Standorte am 22. April 1987 in Bochum. Ruhr-Universität Bochum.
- Jessberger, H. L. (1971): Bodenfrost, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bundesminister für Verkehr. Abt. Straßenbau. Bonn. Heft 125.
- Karczmarzyk, W. (1989): Kombinationsabdichtung auf der Deponie Wilsum. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Heft 16.
- Kay, B.; Perfect, E. (1988): Heat and mass transfer in freezing soils. Proc. 5th Int. Symp. Ground Freezing. Rotterdam, Holland: Balkema. Vol. 1, S. 3-21.
- Kohler, E.; Morteani, G. (1984): Bewertung des Tonbarrierenkonzeptes unter besonderer Berücksichtigung der Permeabilität und den chemischen Reaktionen zwischen Tonmineralen und organischen Lösungen. – Literaturstudie. Umweltbundesamt. Forschungsbericht 1002 03 409/01. Berlin.
- Komodromos, A.; Göttner, J. J. (1988): Beeinflussung von Tonen durch Chemikalien, Teil II: Gefüge- und Festigkeitsuntersuchungen, Müll & Abfall, S. 552-562.
- Konrad, J. M.; Morgenstern, N. R. (1980): A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal 17, S. 473-486.
- Kuhn, K.; Weiss, A. (1988): Untersuchungen zur Aufnahme von Lösemitteln durch organophilisierte Bentonite. Investigations on the Adsorption of Solvents by Organophilic Bentonite Clays. In: Czurda, K. A.; Wagner, J.-F. (Hrsg.): Tone in der Umwelttechnik. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 4, I-VII, S. 141-159.
- Ladányi, B.; Shen, M. (1989): Mechanics of freezing and thawing in soils. Frost in Geotechnical Engineering. VTT Symp. 94. 13.-15.03.89. Technical Research Centre of Finland. Espoo, Saariselkä, Finland. Vol. 1, S. 73-104.
- Madsen, F. T.; Mitchell, J. K. (1988): Chemical effects on clay fabric and hydraulic conductivity. In: Baccini, P. (Ed.): The Landfill. Reactor and Final Storage. Lecture Notes in Earth Sciences 20. Berlin: Springer. S. 201-251.
- McBride, M. B. (1989): Reactions Controlling Heavy Metal Solubility in Soils. In: Stewart, B. A. (Ed.): Advances in Soil Sciences. Vol. 10. New York: Springer. S. 1-56.

- Mesri, G.; Olson, R. E. (1971): Consolidation characteristics of montmorillonite. *Géotechnique* 21, S. 341-352.
- Mitchell, J. K.; Jaber, M. (1990): Factors controlling the longterm properties of clay liners. In: *Waste Containment Systems: Construction, Regulations and Performance*. ASCE Geot. Spec. Publ. No. 26, S. 84-105.
- Nakano, Y. (1990): Quasi-steady problems in freezing soils: 1. Analysis on the steady growth of an ice layer. *Cold Regions Science and Technology* 17, 3, S. 207-226.
- Pamukcu, S.; Tuncan, M.; Fang, H.-Y. (1990): Influence of some environmental activities on physical and mechanical behavior of clays. In: *ASTM STP 1095 Physico-Chemical Aspects of Soil and Related Materials*. S. 91-107.
- Reuter, E.; Meseck, H. (1986): Die Beeinflussung der Quelleigenschaften handelsüblicher Bentonite. *Wasser & Boden*. S. 563-567.
- Sanger, F. J. (1959): Diskussion zu Kersten, M. S.: Frost penetration: Relationship to air temperatures and other factors. *HRB Bull.* 225, S. 63-73.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (1989): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart: Enke. 12. Auflage.
- Sehrbrock, U.; Rodatz, W. (1988): Untersuchung der mineralischen Abdichtung einer Gewerbemülldeponie. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig, unveröffentlicht.
- Steffen, J. (1990): Anforderungen an die stofflichen Eigenschaften und den Einbau der Dichtungselemente in einer Kombinationsdichtung. In: Fehla, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): *Fortschritte der Deponietechnik 1990*. Neue Anforderungen an die Abfallagerung. *Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis* 36, S. 227-254.
- Stepkowska, E. T.; Skarzynska, K. M. (1989): Microstructural changes in clays due to freezing, Frost in *Geotechnical Engineering*. VTT Symp. 94. 13.-15.03.89. Technical Research Centre of Finland. Espoo, Saariselkä, Finland. Vol. 2, S. 573-582.
- UBA (1992): Expertengespräch zum Thema Sorption und Ionenaustauschkapazität am 15.01.1992 im Umweltbundesamt. Berlin.
- Wada, S. A.; Nagasato (1983): Formation of silica microplates by freezing dilute silica acid solutions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29, S. 93-95.
- Wagner, J.-F. (1988): Mineralveränderungen bei der Migration von Schwermetalllösungen durch Tongesteine. In: Czurda, K. A.; Wagner, J.-F. (Hrsg.): *Tone in der Umwelttechnik*. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe in Karlsruhe. Schriftenreihe *Angewandte Geologie Karlsruhe* 4, I-VII, S. 47-62.
- Wienberg, R. (1990a): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. – Teil 1: Unspezifische Interaktionen – *AbfallwirtschaftsJournal* 4, S. 222-230.
- Wienberg, R. (1990b): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone. – Teil 2: Spezifische Interaktionen – *AbfallwirtschaftsJournal* 6, S. 306-314.



## **L Bauverfahren, Qualitätssicherung (T. Meggyes)**

1	Einleitung (M. El Khafif, U. Aversch, K. Lenfort, B. Schütz, T. Meggyes)	117
2	Die Planungsphase (M. El Khafif, U. Aversch, K. Lenfort, B. Schütz)	117
3	Herstellung des Planums (M. El Khafif, U. Aversch, K. Lenfort, B. Schütz)	119
4	Aufbereitung der mineralischen Dichtungsmaterialien (H. Beitzel, M. El Khafif, U. Aversch, K. Lenfort, B. Schütz)	120
5	Bau der mineralischen Dichtungsschicht (M. El Khafif, U. Aversch, K. Lenfort, B. Schütz)	121
6	Herstellung der Kombinationsdichtung (M. El Khafif, U. Aversch, K. Lenfort, B. Schütz)	122
7	Qualitätssicherung (T. Meggyes)	124
8	Bergmännische Verfahren (T. Meggyes)	126
9	Offene Fragen, Wissenslücken (T. Meggyes)	127
10	Literaturverzeichnis	128

### **1 Einleitung**

Gegenstand dieses Kapitels sind die Bauverfahrenstechnik und gerätespezifische Aussagen, welche bereits Eingang in bestehende Bauweisen gefunden haben oder Einfluß auf zukünftige Bauweisen von Abdichtungssystemen nehmen könnten. Die Wahl der Bauverfahrenstechnik resultiert aus den Planungsvorgaben sowie den zur Verfügung stehenden Baugeräten. Vor allem aber wird sie durch die Topographie der Baustelle, materialspezifische Parameter und Witterungseinflüsse geprägt. Die Bauverfahrenstechnik beeinflusst entscheidend die

Verfahrensgänge Materialaufbereitung, Einbau und Verdichtung des mineralischen Dichtungsmaterials, Verlegung und Fügung der Kunststoffdichtungsbahnen sowie die Herstellung von Entwässerungseinrichtungen. Die Qualitätssicherung hat sicherzustellen, daß bestimmte Qualitätskriterien eingehalten und die Sicherheit gewährleistet werden. Zur nachträglichen Herstellung von Deponieabdichtungen müssen bergmännische Verfahren berücksichtigt werden.

### **2 Die Planungsphase**

Vor der Ausführung einer Baumaßnahme steht die Planungsphase. Die hiervon ausgehenden Auswirkungen auf die Bauverfahrenstechnik sind Gegenstand der ersten Betrachtungen. Die nachfolgend aufgeführten Erkenntnisse beruhen im allgemeinen auf Erfahrungen, die im Baubetrieb gemacht wurden.

Aufgabe der Planung ist u. a. die Festlegung der für die Ausführung relevanten Maßgaben und Anforderungen. Hierbei muß eine Vielzahl von vorliegenden Randbedingungen berücksichtigt werden, Randbedingungen aus der Standorttopographie und den Anforderungen an das zu erstellende Bauwerk, den geologischen Verhältnissen, den Materialparametern sowie aus Zeit- und Witterungseinflüssen. Dabei müssen die administrativen bzw. ge-

setzlichen Vorgaben der entsprechenden Vorschriften berücksichtigt werden. Hier werden beispielsweise Anforderungen an die Tragfähigkeit des Planums, den Aufbau der Abdichtung, die Zusammensetzung des Mineralgemisches, die auszuführenden Lagendicken, die geleistete Verdichtungsarbeit sowie die zu erzielende Dichtigkeit und Ebenheit der Oberflächen festgelegt.

Nach Jessberger (1989) sollte die Verfahrenstechnik als Bestandteil des technischen Entwurfs zur Umsetzung des Multibarrierenkonzeptes angesehen werden, in dem der Untergrund als Standort-Barriere, das Basisabdichtungssystem, der Abfallkörper, das Oberflächenabdichtungssystem, die Nutzung des Geländes nach Schließung der Deponie sowie Kontrolle und Nachsorge als weitere

Barrieren zusammenwirken. Die Verfahrenstechnik bestimmt dabei entscheidend die Dauerhaftigkeit der Dichtfunktion.

Die bei der Planung zu beachtenden Anforderungen an die Herstellung von Kombinationsdichtungen sind in Regelwerken, wie TA Abfall (1991), TA Siedlungsabfall (1993) und Richtlinie der BAM (1992) dargestellt. Die durchzuführenden Berechnungen (z. B. über Setzungen, Verformungen, Standsicherheit usw.), die Material- und Einbauparameter (Körnung, Tonanteil, Homogenität, Wassergehalt, Verdichtungsgrad,  $k$ -Wert, Schicht- und Lagendicke, sowie Beschaffenheit der PE-HD-Bahn, Dicke, Dichte, Schmelzindex, Viskosität, Warmlagerungs- und Witterungsverhalten, Permeation von Kohlenwasserstoffen, Verhalten bei Zugbeanspruchung, Widerstand gegen Weiterreißen und punktförmige Lasten, Verhalten bei niedrigen Temperaturen, Relaxationsverhalten, Nahtfestigkeit, Beständigkeit gegen physikalische-chemische, chemische und biologische Beanspruchungen usw.), die Herstellung eines Preßverbundes und der Qualitätssicherungsplan haben die Funktionstüchtigkeit des Abdichtungssystems langfristig zu sichern.

Auch die Einbindung von Schachtbauwerken oder die Ausführung von Dränagesystemen, vor allem bei Durchdringungsbauwerken, müssen bereits in der Planung Beachtung finden, als Beispiel seien die besonderen statischen Anforderungen an Schachtbauwerke genannt.

Der Planungsphase folgt die Ausschreibung der Bauleistung. Die Bewerber müssen im allgemeinen ihre Eignung nachweisen, was die Zahl der möglichen Auftragnehmer einschränkt. Drescher & Dahms (1990) fordern, daß die Vergabe möglichst nur an einen Auftragnehmer erfolgen solle, welcher als Hauptunternehmer – mit allen daraus erwachsenden vertraglichen Verpflichtungen, vor allem der Gewährleistungspflicht – fungiert. Dieser Hauptunternehmer kann dann qualifizierte Firmen als Nachunternehmer hinzuziehen. An die eingesetzten Firmen soll ein strenger Maßstab angelegt werden. Darüber hinaus wird gefordert, daß die Ausschreibung den Stand der Technik repräsentiert, welcher jedoch oftmals noch nicht in die entsprechende Normung aufgenommen wurde. Nach Schmitt (1988) gibt es Probleme bei der Festlegung des Standes der Technik.

Aufgrund vielfältiger witterungsbedingter Probleme bei der Ausführung wird von Drescher und Dahms (1990) gefordert, bereits bei der Ausschreibung die Witterungsbedingungen zu berücksichtigen. Schlechte Witterungsverhältnisse, z. B. starke Niederschläge, niedrige Temperaturen bis hin zu Frost, oder hochsommerliche Temperaturen wirken sich auf die möglichen Einbauzeiträume und die erzielbare Qualität der Dichtung aus.

Bauzeitverlängerungen durch Schlechtwetterperioden haben laut Reuter (1989) zur Folge, daß sich die bei

üblichen Baulosen geplanten Bauzeiten von einem halben Jahr schnell auf ein Jahr verlängern können. Die begonnenen Arbeiten müssen dann über die Wintermonate ruhen, da die erforderlichen Einbautemperaturen oder die notwendige Niederschlagsfreiheit nicht vorliegen. Bauzeitverzögerungen sind eher die Regel als die Ausnahme. Weitere Hinweise finden sich in Karczmarzyk (1986) und Schmitt (1988). Hier wird gefordert, daß in der Ausschreibung als Ausführungszeitraum die Monate von Mai bis Oktober vorgegeben werden, was beispielsweise durch die in diesen Zeitraum fallenden Urlaubszeiten bei den Baufirmen zu großen Problemen führt.

Eine Beschränkung der Losgrößen auf Abschnitte, die in der vorgegebenen Zeit unter Berücksichtigung von Schlechtwetterperioden herzustellen sind, wird von Warmbold (1991) angeregt. Die Ausschreibung sollte nur zum Frühjahr erfolgen. Darüber hinaus sollten seiner Auffassung nach die Tonaufbereitung und der Witterungsschutz als Hauptpositionen ausgeschrieben werden. Zweck ist, diese Positionen entsprechend ihrer Bedeutung während der Bauausführung zu berücksichtigen. Nach Warmbold (1991) ließe sich hierdurch das witterungsbedingte Risiko für den Auftragnehmer abmildern. Schmitt (1988) schlägt eine Risikoteilung zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber vor, um nicht vorhersehbare Witterungseinflüsse abzusichern. Eine Risikoübernahme durch den Auftraggeber wird auch von Ernst (1987) für den Fall vorgeschlagen, daß die Bauarbeiten witterungsbedingt oder infolge verzögerter Genehmigungsverfahren über einen längeren Zeitraum geruht haben und die schon fertiggestellten Abschnitte der Witterung ausgesetzt waren.

Die Verwendung von Zelten (Krath & Schwarz, 1993) kann den Bau von Deponieabdichtungen bei sonst ungünstigen Wetterbedingungen gemäß den EA-GDA (1990) Empfehlungen und der Richtlinie der BAM (1992) ermöglichen. Hierzu siehe auch Kapitel O, Abschnitt 6. "Abdeckung von Deponien".

Die festgelegten Anforderungen bezüglich der Qualitäten der verwendeten Materialien, der eingebauten mineralischen Dichtungsschichten, der Kunststoffdichtungsbahnen und des Entwässerungssystems sowie der Lagendicke und der Ebenheit werden durch unabhängige Kontrollinstanzen geprüft. Maßgeblich für den Erfolg der Baumaßnahme ist die baubegleitende Qualitätssicherung. In der Ausschreibung sollten die dazu notwendigen Prüfungen detailliert aufgeführt werden. Jessberger (1989), Drescher & Dahms (1990), Oeltzschner (1988a) sowie Geyer (1991) verweisen auf die Notwendigkeit der Festlegung von Kontrollprüfungen. Ein Qualitätssicherungsplan solle nach Drescher & Dahms (1990), Geyer (1991) und Drescher (1988) ferner Materialeigenschaften, Arbeitsabläufe, Toleranzen beim Einbau, witterungsbedingte Arbeitspausen sowie Art und Umfang der vorzunehmenden Schutzmaßnahmen enthalten. Die Arbeitsabläufe und Arbeitsschritte sind nach Geyer



(1991) detailliert in Bauablaufplänen darzulegen. Im Merkblatt des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (1988) wird die Dokumentation des Bauablaufs als Bestandteil der Unterlagen zur Freigabegenehmigung festgeschrieben.

Stroh (1987), Glück (1985) sowie Drescher & Dahms (1990) weisen auf die Notwendigkeit hin, für die Verlegung von Kunststoffdichtungsbahnen und Geotextilien Verlegepläne vorzuschreiben. Da Bauablaufpläne sowie Verlegepläne von baubetrieblichen Randbedingungen abhängen, können diese vorab aufgestellten Pläne lediglich als Planungsgrundlage betrachtet werden. Von Schnepel (1985) wird deshalb eine dem Baufortschritt sowie den örtlichen Gegebenheiten (Geometrie der Bahnen) angepaßte Fortschreibung der Bauablauf- und Verlegepläne gefordert.

In den Vorschriften und Richtlinien wird die Anlage eines Versuchsfeldes für die Probeverdichtung gefordert, um die maschinentechnischen Parameter auf die materialspezifischen und standortbedingten Randbedingungen abzustimmen. Im Merkblatt des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (1988) wird die Bedeutung

des Versuchsfeldes zur Festlegung der einzelnen Herstellvorgänge sowie des Geräteeinsatzes beschrieben. Nach Düllmann (1988a) werden dabei die für den Einbau günstigen Witterungsverhältnisse, die möglichen Schüttdicken, die Anzahl der notwendigen Verdichtungsübergänge, einschließlich der möglichen Arbeitsgeschwindigkeiten sowie die Art der Materialaufbereitung ermittelt.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muß die Versuchsfeldanlage eine Mindestgröße haben. Besondere Beachtung sollte nach Sehrbrock (1991) die Topographie finden; durch die Versuchsfeldanlage sowohl im Sohl- als auch im Böschungsbereich wird dem Rechnung getragen. Diese Thematik wird darüber hinaus von Karczmarzyk (1986), Warmbold (1991), Drescher (1988), Kotte (1986) und Meseck et al. (1987) behandelt.

Stehen mehrere verfahrenstechnische Alternativen zur Auswahl, so sind diese im Versuchsfeld in bezug auf die Einhaltung der gestellten Anforderungen und auf Wirtschaftlichkeit zu untersuchen und gegebenenfalls zu optimieren. Die Ausführungen von Meseck et al. (1987), Düllmann (1987a), N. N. (1989a) und Rettenberger (1990) zeigen dieses auf.

### 3 Herstellung des Planums

Die Bauausführung unterteilt sich in verschiedene Teilschritte. Begonnen wird im allgemeinen mit der Herstellung des Planums, auf welchem anschließend die mineralische Dichtung aufgebaut wird. Je nach Art der Abdichtung – Basis- oder Zwischenabdichtung – treten hierbei unterschiedliche Probleme auf. Lauf (1987) berichtet über Erfahrungen beim Bau einer Oberflächenabdichtung auf Hausmüll. Die Tragfähigkeit, ausgedrückt durch den  $E_{v2}$ -Wert oder die Proctordichte, muß so groß sein, daß die Lasten schadlos abgetragen werden können. Dies gilt nach Warmbold (1991), Laub (1987), Horn (1987), Meseck & Sondermann (1987), Blank & Blaut (1987), Jessberger (1990a) und Oeltzschner (1988b) insbesondere während des Bauzustandes, wenn das Planum von schweren Geräten befahren wird. Das Planum darf nach Oeltzschner (1988a) keine Setzungsmulden und Risse oder Spalten aufweisen, da die darauf aufzubringende Dichtungsschicht sonst reißen könnte. Derartige Störungen sind vor Einbau der mineralischen Dichtungsschicht zu beseitigen.

Die Richtlinie der BAM (1992) verlangt ein stabiles Dichtungsaufleger, das die KDB durch lokale Setzungen mit nicht mehr als 3 % mehraxialer Dehnung beansprucht. Weiterhin ist die Standsicherheit des Dichtungs-

systems, insbesondere im Böschungsbereich, durch eine geprüfte Statik nachzuweisen. Die Bemessungswerte sind (i. d. R. in einem Versuchsfeld) zu kontrollieren. Der Scherwiderstand des Böschungsaufbaus muß zur Tiefe hin ansteigen. Zwischen Böschung und Sohle sowie bei Verankerungs- und Einbindegräben darf es zu keinem Knicken in der KDB kommen. Die Oberfläche der mineralischen Dichtung muß so beschaffen sein, daß durch den Preßverbund keine mechanischen Schädigungen der KDB entstehen: Sie muß frei von un stetigen oder abrupten Änderungen und aufliegenden Körnern oder Fremdkörpern sein. Unebenheiten unter einer 4-m-Latte dürfen nicht mehr als 2 cm betragen. Die fertiggestellte Oberfläche ist vor Austrocknung, Wasseranstau, Überflutung oder Durchfrostung zu schützen.

Stroh (1987) beschreibt die Arbeitsschritte, die zur Herstellung des Planums erforderlich sind. Die Ausbildung der Planumoberfläche sowie der Transportwege wirkt sich auf die Leistungsfähigkeit der Baustelle aus – Transportvorgänge können bei guter Befahrbarkeit schneller abgewickelt werden (N. N., 1991). Eine glatte, saubere Oberfläche trägt bei Regenereignissen dazu bei, daß die Niederschläge an der Oberfläche abfließen können und nicht zu Aufweichungen des Planums führen.

## 4 Aufbereitung der mineralischen Dichtungsmaterialien

Auf dem Deponieaufstandsplanum wird die mineralische Dichtungsschicht aufgebracht. Die Qualität der mineralischen Dichtung wird im wesentlichen durch die nachfolgend genannten Kriterien bestimmt (Beitzel, 1992):

- Homogenität des Einbaumaterials
- genau eingestellter optimaler Wassergehalt
- Einbaumethode.

Zu den wichtigsten Anforderungen an mineralische Abdichtungen zählen folgende bodenmechanische Parameter:

- Wasserdurchlässigkeit
- Verdichtungsgrad
- Suffusionssicherheit
- Feinkornanteil  $< 0,002$  mm
- Kalkgehalt
- Gehalt an organischen Bestandteilen
- Verformungseigenschaften.

Die Anforderungen an mineralische Abdichtungssysteme sind im einzelnen im Anhang E der TA Abfall (1991) beschrieben. Sie können durch verschiedenartige Mineralgemische erreicht werden. In der Praxis finden i. d. R. folgende mineralische Abdichtungselemente Anwendung:

- Tone
- Schluffe
- kornabgestufte Mineralgemische.

Bei Abdichtungselementen aus Tonen treten häufig Schwankungen innerhalb einer Lagerstätte auf. Diese können sich u. a. auf die Kornverteilung, den mineralogischen Aufbau und den Gehalt an organischen Bestandteilen beziehen. Weiterhin unterliegen Tone häufig Schwankungen bezüglich des Wassergehaltes, so daß sie einer intensiven Aufbereitung bedürfen.

Abdichtungselemente aus Schluffen führen aufgrund ihrer Materialeigenschaften zu anderen bautechnischen Problemen. Häufig neigen Schluffe zu einer extremen Wasserempfindlichkeit, so daß geringe Schwankungen des Einbauwassergehaltes zu Schwierigkeiten beim Verdichtungs Vorgang führen können.

Bei kornabgestuften Mineralgemischen, die neben Bentonit überwiegend andere Füllstoffe aufweisen, stellt sich das Problem, den Zeitpunkt der Wasserzugabe so zu wählen, daß der Bentonit seine größtmögliche Quellfähigkeit erreicht.

In der baubetrieblichen Praxis zeigen sich beim Herstellen mineralischer Abdichtungsschichten aus vielfachen Gründen häufig Inhomogenitäten.

Der Gewinnung und Aufbereitung der Tone oder Mischböden kommt in bezug auf die erreichbare Qualität der Dichtungsschicht – Homogenität, Wasserdurchlässigkeit, Tragfähigkeit und Geometrie der Oberfläche – entscheidende Bedeutung zu. In einer Literaturangabe wird die Gewinnung von Ton in einem Tagebau beschrieben (N. N., 1991). Die Aufbereitung von Tonen umfaßt zum einen die Zerkleinerung größerer Tonschollen zu Stücklängen von  $\leq 3$  cm Länge (sog. Pseudokörnern) und zum anderen die Homogenisierung sowie die Wassergehaltseinstellung.

Warmbold (1991), Horn (1987), Düllmann (1988b), Dannemann (1991) und Fensch beschreiben die Verfahrenstechnik zur Tonaufbereitung. Die zur Erzielung einer ausreichenden Homogenität erforderliche Aggregatgröße der einbaufertigen Mineralgemische wird in der vorliegenden Literatur unterschiedlich betrachtet. Stellung hierzu nehmen: Oeltzschner (1988a), N. N. (1988), N. N. (1989a), Oeltzschner (1988b), Düllmann (1988b) sowie Hoffmann & Stief (1991). Auf die Wichtigkeit der Tongewinnung in bezug auf die Homogenisierung und die daraus resultierende Dichtigkeit verweisen Pierschke & Kuntsche (1990). Nach Finsterwalder (1989) gibt es bei Tonchargen, die nicht aufbereitet zur Einbaustelle gebracht und eingebaut werden, sehr große Streuungen in den Eigenschaften. Er fordert deshalb eine besondere Sorgfalt bei der Herstellung bzw. Aufbereitung der Dichtungsmaterialien.

Die Literaturstellen Meseck et al. (1987), Lauf (1987), Horn (1987), Blank & Blaut (1987), N. N. (1988), Steffen (1987), Maier (1987), Hillebrecht (1987) und Thomé-Kozmiensky (1988) beschäftigen sich mit der Bentonitzugabe zur Verbesserung der Eigenschaften grob- oder gemischtkörniger Dichtungsmaterialien. Die Anforderungen an Mischanlagen für Mineralgemische werden aufgeführt (N. N., 1988).

Das Material wird vom Gewinnungs- und/oder Aufbereitungsort zur Einbaustelle im allgemeinen mit Lastkraftwagen transportiert, die jedoch mit Planen auszurüsten sind, damit sich der eingestellte Wassergehalt während des Transports nicht verändert. Nach Warmbold (1991) verliert der Ton während des Transports und des Einbaus bis zu 2 % seiner Feuchtigkeit. Dieser Wasserverlust muß bereits bei der Aufbereitung Berücksichtigung finden. Insbesondere bei längerer Lagerung in Mieten verändert sich der Wassergehalt.

## 5 Bau der mineralischen Dichtungsschicht

Bei der Ausführung der mineralischen Dichtungsschicht kommen verschiedene Verfahrenstechniken zum Einsatz. Unterschiede ergeben sich durch die Wahl verschiedener Gerätekettens, speziell im Bereich des Einbaus und der Verdichtung. So werden zur Tonverteilung und zum Einbau sowohl Planiertrauben als auch Grader, in Randbereichen Hydraulikbagger, eingesetzt. Schürfkübeltrauben können beim Transport und Einbau von mineralischen Dichtungen ebenfalls zum Einsatz kommen (Düllmann, 1988b).

Das Material muß mit der Verfahrenstechnik eingebaut werden, deren Wirksamkeit im Versuchsfeld nachgewiesen wurde. Hierbei sind neben der Gerätetechnik die Parameter Lagendicke, Anzahl der Übergänge und die Einbauwassergehalte von entscheidender Bedeutung. Im allgemeinen wird zur Erzielung ausreichender Homogenität und den damit verbundenen kleinen Durchlässigkeitsbeiwerten mit Wassergehalten auf dem "nassen" Ast der Proctorkurve, d. h. oberhalb des für die Verdichtbarkeit optimalen Wassergehaltes gearbeitet. Von Oeltzschner (1988a), Horn (1987) und Düllmann (1988b) wird hingegen der Einbau mit natürlichem Wassergehalt beschrieben. Eine künstliche Wassergehaltseinstellung auf der Baustelle durch Beregnung führt laut Oeltzschner (1988a), Kotte (1986) und Düllmann (1988b) zu baubetrieblichen Problemen. Pierschke und Kuntsche (1990) analysieren die Folgen zu hoher Wassergehalte. Eine Wassergehaltseinstellung im Zuge der Aufbereitung des Materials vor Beginn der Dichtungsarbeiten erfordert eine Zwischenlagerung (N. N., 1988). Auf die Zusammenhänge zwischen Wassergehalt und Verdichtungsergebnissen bzw. Verdichtungsaufwand verweisen Meseck & Sondermann (1987).

Lagendicken werden in erster Linie durch die aufbringbare Verdichtungsenergie und die Tiefenwirkung der eingesetzten Verdichtungsgeräte bestimmt. Darüber hinaus muß die Geometrie der Stampffüße bzw. die Form der Polygonräder berücksichtigt werden, damit die Verdichtung eine vollständige Homogenisierung des Dichtungsmaterials bewirkt. Nach Düllmann (1988b) und Hoffmann & Stief (1991) soll die Lagendicke das 1,2- bis 1,5fache der Stampffußhöhe betragen. Weitere Hinweise auf die einzubauenden bzw. bei Bauvorhaben ausgeführten Lagendicken werden von Drescher & Dahms (1990), Karczmarzyk (1986), Oeltzschner (1988a), Stroh (1987), Meseck et al. (1987), N. N. (1988a), N. N. (1989b) und N. N. (1986) angegeben.

Das Material ist profilgenau und möglichst lasergesteuert einzubauen (N. N., 1988). Hinweise zum Einsatz und zur Wirksamkeit von Lasersteuerungen finden sich in den Literaturangaben Ulrich (1991), Leidinger (1991), Gourdon & Peyret (1991), Pietzsch (1991) sowie Tami & Zimmermann (1991).

Aussagen zur Arbeitsweise von Vibrationsverdichtern, speziell zur Wirkung stampfend und walkend arbeitender Geräte werden von Oeltzschner (1988a und 1988b), N. N. (1988) und Stroh (1987) gemacht.

Das Dichtungsmaterial wird im allgemeinen mit Walzenzügen (9–17 t), ausgerüstet mit Stampffußbandage und Vibrationsvorrichtung verdichtet. Zum Einsatz kommen auch schnellfahrende Bodenverdichter (Kompaktoren). Verdichtungsgeräte mit Glattmantelbandagen sollen nach Drescher & Dahms (1990) und Hoffmann & Stief (1991) nur zum Zwecke des Oberflächenschlusses der obersten Dichtungslage oder zum Glätten der Oberfläche bei Arbeitspausen eingesetzt werden.

Die Verdichtungswirkung reicht nach Oeltzschner (1988a und 1988b) und Stroh (1987) im allgemeinen nur bis in eine Tiefe von 20 bis 30 cm. Weitere Aussagen zu Verdichtungs- und Walztechniken enthalten die Veröffentlichungen von Henrich (1985) und Cohrs (1988, 1989 und 1991) sowie von Meseck & Sondermann (1987) und Steffen (1987). Ursachen für schlechte Verdichtungsergebnisse werden von Kotte (1986) erläutert. Die Anzahl der notwendigen Verdichtungsübergänge, die von der Lagendicke sowie vom Walzengewicht und der Schwingungserregung abhängt, variiert von vier bis acht Übergängen je Schüttlage. Aussagen dazu finden sich in den Literaturstellen von Oeltzschner (1988a, 1988b), Drescher (1988), Stroh (1987), N. N. (1988a), Düllmann (1988b), Steffen (1987), Hillebrecht (1987) und N. N. (1988b). Steffen (1987) weist darauf hin, daß der auf der Baustelle erreichbare Verdichtungsgrad eine geräteabhängige Obergrenze hat. Das heißt, daß zusätzliche, darüber hinausgehende Übergänge mit dem eingesetzten Gerät keine Erhöhung der Verdichtung mehr erbringen.

Henrich (1985) weist darauf hin, daß bindige Bodenarten mit 9 bis 17 t schweren Walzen, bei hohen Amplituden von 1,0- bis 1,8-mm-Ausschlägen sowie niedrigen Erregungsfrequenzen von 25 bis 35 Hz zu verdichten sind. Witt und Schmitt (1988) fordern für Vibrationswalzenzüge mit Stampffußbandage eine Achslast von 7 bis 10 t. Nach Lehmann (1985) sind leichte Walzen für die Verdichtung von trockenen Mischböden nicht ausreichend. Bei Verdichtung mit Kompaktoren wirken die Polygonräder bei den hohen Fahrgeschwindigkeiten schlagend und knetend (N. N., 1988a).

Warmbold (1991), Hillebrecht (1987) und Müffelmann (1987) beschreiben den Einsatz von Gummiradwalzen zur Verdichtung. Danach üben die pendelnd aufgehängten Räder eine walkende und knetende Wirkung aus. Vorteile sehen sie in der gegenüber Stampffußwalzen besseren Ebenheit der verdichteten Lagen, wodurch der Nacharbeitungsaufwand bei der Oberflächenherstellung vermindert wird. Die pendelnd aufgehängten

Räder haben gegenüber dem starren Walzenkörper den Vorteil, daß sie der Geometrie der Bodenoberfläche besser folgen können und speziell die noch nicht ausreichend verdichteten Bereiche befahren.

Steffen (1987) beschreibt den Einsatz eines Plattenverdichters, welcher, mit hoher Frequenz und Schlagzahl betrieben, zur Verdichtung einer Zwischenabdeckung eingesetzt wurde. Die Anwendung dieses Gerätes auf Deponiebaustellen ist jedoch die Ausnahme.

An Böschungen sind die Dicken der Einbaulagen zu reduzieren, da die Verdichtungswirkung der auf dem Markt erhältlichen Walzen auf Böschungsflächen geringer ist als in der Sohle. Ferner können durch die Bergfahrt der Walzen starke Materialverdrückungen entstehen. Von Witt & Schmitt (1988) wird deshalb ab einer Böschungsneigung von 1:4 der Einsatz von Zughilfen gefordert. Beobachtungen der Autoren haben ergeben, daß Böschungsflächen mit einer Neigung von 1:3 mit der Stampffußwalze noch ohne Zughilfe verdichtet werden können. Die aus dem Wasserbau bekannten leichten Hangwalzen mit einem Gewicht von 0,5 bis 2,5 t sind für die eigentliche Verdichtungsarbeit auf Deponiebaustellen nicht ausreichend. Sie werden lediglich für das Glätten von Restunebenheiten (Walzkanten) in der Oberfläche eingesetzt. Witt und Schmitt (1988) schlagen daher die Entwicklung eines speziellen Hangfertigers für Verdichtungsaufgaben vor.

Gründe der Verfahrens- und Gerätetechnik sowie nicht ausreichende Böschungsstabilität zwingen trotz eines Verlusts an Deponievolumen zu Böschungsneigungen kleiner 1:2,5. Hierzu nehmen Pierschke und Kuntsche (1990) und Witt & Schmitt (1988) Stellung. Eine Alternative zum Böschungsbau parallel zur Falllinie liegt im lagenweisen horizontalen Einbau, was von Meseck et al. (1987), Blank & Blaut (1987), Witt & Schmitt (1988) sowie Müffelmann (1987) beschrieben wird. Es

werden Bermen angelegt, die ausreichend breit und tragfähig sein müssen, so daß beim Befahren mit Baugeräten die Arbeitssicherheit gewährleistet ist. Ernst (1987) fordert dafür eine Mindestbreite von 4,5 m. Das Material wird nach den Literaturstellen N. N. (1989b) und Müffelmann (1987) geschüttet bzw. mit Seilbaggern abgesetzt und anschließend mit Walzen verdichtet. Reduzierte Lagendicken wirken sich hierbei günstig auf die Verdichtungswirkung aus. Zur Profilierung der Oberfläche kann nach Müffelmann (1987) ein Teleskopbagger eingesetzt werden.

Seit geraumer Zeit werden auf dem Markt Verdichtungskontrollgeräte angeboten, die dem Walzenfahrer bei der Beurteilung der erreichten Verdichtung eine Hilfe geben sollen. Beschreibungen zu den Grundlagen und den Erfahrungen mit Verdichtungskontrollgeräten sind von Cohrs (1988 und 1989), Gerresheim (1986 und 1987) sowie N. N. (1988) gegeben. Aussagen über Verdichtungskontrollprüfungen werden von Stroh (1987), Weiland (1988) und Hintersteiner (1987) gemacht. Darin werden verschiedene Kontrollverfahren beschrieben, teils miteinander verglichen sowie Art und Umfang der Prüfungen erläutert.

Der Oberflächenschluß der obersten Einbaulage wird im allgemeinen mit Glattmantelwalzen hergestellt. Als Geräte kommen Walzenzüge, Tandemwalzen oder Anhängewalzen in Betracht. Es kommen laut Karczmarzyk (1986), Düllmann (1988a), Hoffmann & Stief (1991), Steffen (1987), N. N. (1989b), Müffelmann (1987) sowie Schicketanz & Hoffmann (1988) aber auch Grader und Hydraulikbagger – vorzugsweise Teleskopbagger – zum Einsatz. Dabei ist darauf zu achten, daß Stampffuß-, Polygonrad- und Reifenabdrücke geschlossen werden und die geforderte Ebenheit erreicht wird. Warmbold (1991) berichtet über den Einsatz einer kleinen Tandemwalze zur Ausrundung der Kehlen, beispielsweise zwischen Sohle und Böschungsflächen.

## 6 Herstellung der Kombinationsdichtung

Eine früher übliche Technik war es, Kunststoffdichtungsbahnen direkt auf dem mehr oder weniger durchlässigen Planum auszurollen und diese miteinander zu verschweißen. Nach Schlütter (1985) und Poyda (1988) erfordert dieses das Entfernen aller Steine und spitzen Gegenstände vom Planum. Eine Abdichtung von Haus- oder Sondermülldeponien ausschließlich mit Kunststoffdichtungsbahnen entspricht nicht mehr dem Stand der Technik (TA Abfall, 1991).

Um einen Preßverbund, d. h. Planlage unter Auflast des Abfallkörpers zwischen mineralischer Dichtungsschicht und Kunststoffdichtungsbahn zu erreichen, wird von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, 1992) für die Ebenheit der mineralischen Oberfläche ein Toleranzmaß von 2 cm Höhenabweichung innerhalb einer 4-m-Distanz gefordert. Stufen auf der

Oberfläche dürfen 5 mm nicht überschreiten. Letztere Forderung bereitet nach Warmbold (1991), Geyer (1991) und Müffelmann (1987) große Probleme bei der Bauausführung. Es existiert für die Verdichtung plastischer Tone zur Zeit keine Verfahrenstechnik, welche die Forderungen nach ausreichender Verdichtung bzw. Homogenisierung und Oberflächengeometrie gleichermaßen erfüllen kann. Die Abdrücke der zur Verdichtung eingesetzten Stampffußwalzen können mit Glattmantelwalzen i. d. R. nicht vollkommen geschlossen werden. Ferner überschreiten auf plastischen Tönen die Walzkanten von Glattmantelwalzen die oben genannten Ebenheitstoleranzen. Als Möglichkeit zur einfacheren Herstellung einer ebenen Oberfläche schlägt Warmbold (1991) einen um das Maß der Stampffüße überhöhten Einbau der letzten Lage vor. Diese kann zur Herstellung des Oberflächenschlusses mit einem Grader, Bagger oder mit

Planiertrauben auf die Sollhöhe abgeschoben werden. Der überhöhte Einbau läßt sich auch anwenden, um Schäden infolge starker Niederschläge zu vermeiden: Die überhöht eingebaute, vom Regen aufgeweichte Schicht kann abgeschoben und der Bauvorgang fortgesetzt werden.

Witterungseinflüsse bilden einen entscheidenden baubetrieblichen Parameter und stellen die ausführenden Firmen oft vor große Probleme. Eine tabellarische Zusammenstellung von Witterungseinflüssen und von deren möglichen Auswirkungen findet sich bei Kruse (1989).

Niederschläge erfordern ein rechtzeitiges Abdecken der ungeschützten Dichtungsschicht, möglichst mit der planmäßig zu verlegenden Kunststoffdichtungsbahn. Wenn dieses beispielsweise aufgrund nicht rechtzeitiger Abnahme ausgeschlossen ist, muß auf Hilfsmaßnahmen zurückgegriffen werden. Neben dem bereits erwähnten überhöhten Einbau ist ein Abdecken mit UV-beständiger Industriefolie möglich, welche laut Schlütter (1985) mit witterungsbeständigen Sandsäcken gegen Windeinwirkung gesichert werden muß. Zur Ableitung des Niederschlagswassers schlägt Müffelmann (1987) vor, in der Sohlbasis entsprechend große Versickerungsflächen vorzusehen. Auf nicht abgedeckten Flächen kann es sehr schnell zu Aufweichungen kommen, die oftmals mehrtägige Bauunterbrechungen nach sich ziehen. Ein solcher Fall wird von Karczmarzyk (1986) und von Beretitsch (1988) beschrieben.

Hinweise zur Abdeckung mit Folie geben Drescher und Dahms (1990), Karczmarzyk (1986), Warmbold (1991), Stroh (1987), Horn (1987), Maier (1987), Hillebrecht (1987), N. N. (1989b), Lehmann (1985), Schicketanz (1988) und Kruse (1988) an. Es gibt auch Berichte von einer Baumaßnahme, bei der auf die Abdeckung verzichtet werden konnte (N. N., 1989a).

Meseck, Reuter und Knüpfer (1987) beschreiben Verwitterungserscheinungen bei länger gelagerten Tonen. Von Reuter (1989), Horn (1987) sowie Czurda & Schababerle (1990) werden die Einflüsse von Frostperioden auf Tone geschildert.

Zur Erreichung der vorgeschriebenen Qualitäten muß eine sofortige Verlegung der Kunststoffdichtungsbahnen auf der mineralischen Dichtungsschicht gefordert werden. Der Preßverbund erfordert eine wellenfreie Verlegung (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1992). Darüber hinaus darf die Oberfläche der mineralischen Dichtungsschicht nicht ausgetrocknet sein. Hinweise dazu finden sich bei Oeltzschner (1988b), Lehmann (1985), Kruse (1989) und Schicketanz & Lotze (1991). Die Folgen von Austrocknung, die sich in Rissen und den daraus resultierenden Wasserwegsamkeiten äußern, werden von Melchior et al. (1990) beschrieben.

Die Kunststoffdichtungsbahnen werden in Rollen angeliefert, Verformungen und Beschädigungen der Rollen müssen vermieden werden. Das gleiche gilt für

Geotextilien. Sowohl vor als auch nach der Verlegung müssen laut Gartung (1991) sowie Glück & Zöhren (1985) die Bahnen auf Beschädigungen überprüft werden. Sie sind entweder vorkonfektioniert, was von Hillebrecht (1987), Schicketanz & Hoffmann (1988) und N. N. (1989) beschrieben wird, oder werden auf der Baustelle auf Maß geschnitten. Beschreibungen zur Art der Verlegung finden sich in den Arbeiten von Karczmarzyk (1986), Warmbold (1991), Ernst (1987), Stroh (1987), Glück (1985), Schnepel (1985), Schlütter (1985), Poyda (1988), Hoffmann & Stief (1991), Thomé-Kozmiensky (1988), N. N. (1989b), Schicketanz & Hoffmann (1988), Schicketanz & Lotze (1991) und N. N. (1989c). Bestimmungen und Auflagen für den korrekten Einbau der Dichtungsbahnen in die Kombinationsdichtung sind in den BAM-Zulassungen (Niedersächsenlerlaß, 1988) bzw. der BAM-Richtlinie (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1992) erläutert.

Als durchschnittliche Tagesleistung für die Verlegung von Kunststoffdichtungsbahnen wird eine Fläche von ca. 1500 m<sup>2</sup> angegeben (N. N., 1989b). Die Einbauleistung bei der mineralischen Dichtungsschicht sollte sich an der Verlegeleistung der Kunststoffdichtungsbahnen orientieren. Dies zeigt sich in der schon vorstehend aufgeführten, von Stroh (1987) geäußerten Forderung nach Beschränkung auf relativ kleine Abschnitte. Zum Einbau der Kunststoffdichtungsbahn siehe auch Kapitel E.

Beschreibungen verschiedener Schweißverfahren, z. B. des Extrusions-, Heizkeil- oder Heißluft-Schweißens finden sich in den folgenden Literaturstellen: Karczmarzyk (1986), Ernst (1987), Glück & Zöhren (1985), Schnepel (1985), Schlütter (1985), Poyda (1988), N. N. (1989b), Schicketanz & Hoffmann (1988), Schicketanz & Lotze (1991) und N. N. (1989c). Glück & Zöhren (1985), Schnepel (1985), Poyda (1988), N. N. (1989b), Schicketanz & Hoffmann (1988) und N. N. (1989c) schildern die verschiedenen gebräuchlichen Prüfverfahren. Es gelten hier die einschlägigen Richtlinien des DVS (DVS-Richtlinie 2203 und 2225.) Zu Schweißverfahren siehe auch Kapitel E.

Eine Schadensanalyse bei Deponiebasisabdichtungen mit mineralischen Dichtstoffen und Kunststoffdichtungsbahnen findet sich in der Arbeit von Hoffmann & Stief (1991).

Die oberste Schicht des Abdichtungssystems bildet die Filter- oder Dränageschicht, bestehend aus einem Kies-Sand-Gemisch oder aus gebrochenem Material. Um die Gefahr der Beschädigung durch die Dränschicht zu vermeiden und die Glattlage zu erreichen, sollten die Kunststoffdichtungsbahnen direkt nach der Abnahme mit einer Schutzschicht abgedeckt werden. Als Schutzschicht werden oft Geotextilien verwendet. Ein sicherer und beständiger Schutzschichtaufbau wird mit einem 1200 g/m<sup>2</sup>-Vliesstoff und einer zusätzlichen lastverteilenden mineralischen Schutzlage erreicht (Regelaufbau nach

dem LAGA-Merkblatt M3, 1990). Eine Alternative zu Geotextilien bieten Schichten aus Feinsand (Poyda, 1988). Hierbei muß die Erosionsstabilität sichergestellt werden. Schutzschichtsysteme, die mineralische Stoffe und Geokunststoffe kombinieren, und damit einen einfachen, erosionsstabilen Einbau ermöglichen, sind inzwischen erhältlich. Ein Überblick über die Anforderungen an Geotextilien wird von Müller et al. (1992) gegeben. In jedem Fall ist bei der Verlegung bzw. Schüttung dieser Schicht darauf zu achten, daß sie zur Vermeidung von Beschädigungen nicht mehr befahren wird. Probleme in Form von verschobenen Geotextilmatten ergeben sich beim Einbau der Filterschicht nach Schicketanz & Lotze (1991) durch das Befahren mit bereiften Planiergeräten. Ausführlicheres zu Schutzschichten siehe in Kapitel D.

Rettenberger (1990) und Schicketanz & Lotze (1991) sowie N. N. (1989c) beschreiben den Vor-Kopf-Einbau der Filter- bzw. Dränageschicht. Das Material für diese Filterschicht sollte so zusammengesetzt sein, daß über lange Zeit ein Zusetzen durch Ausschwemmungen oder Ausschlammungen aus dem Müllkörper nicht zu erwarten ist. Die Gefahr des Eintrags von Schlamm in die

Filterschicht durch Einbau mit Raupenfahrzeugen wird von Schicketanz & Lotze (1991) beschrieben.

Die Dränage umfaßt die Sickerwassersammlung in Dränageleitungen und Sammelschächten sowie die Abführung der Sickerwässer aus dem Müllkörper (vgl. Kapitel C). Um eine einwandfreie Zuführung des Sickerwassers zu den Sammelleitungen und ein anschließendes Abführen zu gewährleisten, wird für die jeweiligen Einzugsflächen ein ausreichendes Quergefälle und für die Gesamtfläche ein entsprechendes Längsgefälle gefordert. Angaben dazu werden von Oeltzschner (1988b), Hoffmann & Stief (1991) sowie Hillebrecht (1987) gemacht. Aussagen über Verlegung und Fügen von Dränagerohren finden sich in der Arbeit von Hillebrecht (1987). Erläuterungen zu Ausführung und Planung von Sickerwassersammelschächten können den Literaturstellen von Stroh (1987), Ney (1987) sowie Fey & Sorg (1988) entnommen werden.

Eine Zusammenstellung der Bauverfahrenstechnik bei der Herstellung von Deponieabdichtungssystemen wurde von Aversch & El Khafif (1992) veröffentlicht.

## 7 Qualitätssicherung

Qualität bezeichnet das Maß für die Einhaltung geforderter Eigenschaften von Materialien, Produkten und Leistungen (Jessberger, 1985; Andreottola et al., 1991). Sie ist der Grad der Eignung, einem bestimmten Verwendungszweck zu genügen. Die Qualitätssicherung im Bauwesen dient der Gewährleistung der Sicherheit. Ein System gilt als sicher, wenn es der, um die Sicherheit erhöhten, zu erwartenden Beanspruchung standhält. Das Sicherheitskonzept bedeutet bei mineralischen Dichtungen, daß definierte Grenzwerte eingehalten werden müssen.

Die Qualität des Gesamtbauwerkes einer Deponie setzt die ordnungsgemäße Qualität der Einzelbauteile voraus. Die Qualitätssicherung hat hierbei sicherzustellen, daß die entsprechend dem Stand der Technik festgelegten Qualitätskriterien eingehalten werden. Sie muß sich sowohl auf die Qualität des eingesetzten Materials als auch auf die Qualität der Ausführung beziehen. Die Wahrscheinlichkeit von Material- und Herstellungsfehlern soll durch intensive qualitätssichernde Maßnahmen auf ein Minimum gesenkt werden (Düllmann, 1989; Jessberger, 1990b).

Vor der Herstellung der Deponieabdichtungssysteme ist ein Qualitätssicherungsplan aufzustellen (Spigolon & Kelley, 1984; DIN 55350; Düllmann, 1986, 1989, 1992; EPA, 1986, 1988; TA Siedlungsabfall, 1993; Andreottola et al., 1991), der mindestens zu enthalten hat:

- Aufstellung, Durchführung und Kontrolle der Qualitätssicherung

- die Ergebnisse der Eignungsprüfungen der Materialien
- die Maßnahmen zur Qualitätslenkung (Herstellungsverfahren)
- die Maßnahmen zur Qualitätsüberwachung und -prüfung
- die Art der Dokumentation der Herstellung.

Die Qualitätssicherung erfolgt in drei Stufen (DIN 18 200):

- Eigenprüfung des Herstellers (Bauherr)
- Fremdprüfung (unabhängiges Ingenieurbüro bzw. Institut)
- Überwachung durch die zuständige Behörde (stichprobenartig).

Die als Regeldichtung eingeführte Kombinationsdichtung ist neben günstigen Konvektions- und Diffusions-eigenschaften redundant, d. h. daß bei Ausfall einer Komponente eine zweite gleichwertige in Funktion treten kann (Düllmann, 1992). Außerdem wirken die Kunststoffdichtungsbahn und die mineralische Dichtung hydraulisch und chemisch zusammen. Die Funktionsfähigkeit des Deponieabdichtungssystems ist in der Ausführungsphase durch qualifizierte Qualitätssicherung zu erreichen. Das kann durch Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Deponieabdichtungen geschehen. Durch Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Material- und Herstellungsfehlern wird die Gesamtsicherheit der Deponie erhöht. In die Qualitätskontrolle sind die mine-

ralische Dichtungsschicht, die Kunststoffdichtungsbahn, die Schutz- und Filterschichten, das Arbeitsplanum sowie die Entwässerungs- und Kontrollsysteme mit einzubeziehen. Die Qualitätssicherung hat sicherzustellen, daß die Qualitätskriterien sowohl für das Gesamtbauwerk, als auch für die einzelnen Bauteile eingehalten werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Qualitätssicherung sind Bestandteil der Abnahmenachweise. Für alle Baustoffe und -verfahren sind Eignungsnachweise zu erbringen. Vor Baubeginn ist die Eignung der Materialien, der Baugeräte und -verfahren in einem Probefeld zu überprüfen. Die Ergebnisse der Eignungsprüfungen stellen die Bezugsgrößen im Qualitätssicherungsplan dar.

Mit der Einführung neuester Entwicklungen der Deponieabdichtungstechnik in die Prüfpraxis, welche ein hochgradig einheitliches sicherheitstechnisches Niveau erfordert, kommen wichtige Aufgaben auf eine amtliche Prüf- und Zulassungsstelle zu. Dafür soll nur eine Institution in Betracht kommen, die selbst auf dem Gebiet der Materialforschung tätig ist. Dadurch wird sichergestellt, daß optimal erscheinende Problemlösungen durch neue, andersartige und bessere Lösungen ersetzt werden können, ohne daß Zugeständnisse an die Wirksamkeit der Deponieabdichtung gemacht werden müssen (August & Holzlöhner, 1989).

Bei Kombinationsdichtungen werden i. d. R. Eigen- und Fremdprüfungen für die Kunststoffdichtungsbahn und die mineralische Dichtung getrennt ausgeführt. Die Eigen- und Fremdprüfung umfaßt:

- Ermittlung der Material- und Einbaukriterien im Versuchsfeld,
- Prüfung bei der Verarbeitung der Baustoffe,
- Überprüfung aller qualitätsbestimmenden Arbeiten, Stoffeigenschaften und Funktionen.

Der unabhängige Fremdprüfer übernimmt die Verantwortung für die Herstellung. Nach Vorlage der Ergebnisse von Eigen- und Fremdüberprüfung bei der Überprüfungsbehörde erfolgt die Abnahme von Teilleistungen durch den Fremdüberwacher. Die Eigenschaften der bereits abgenommenen Teile dürfen nachträglich nicht verändert werden. Die Fremdüberwachung soll so geplant werden, daß Unterbrechungen der Bauarbeiten weitgehend vermieden werden. Die wichtigsten Ergebnisse der Kontrolluntersuchungen sollten vorliegen, bevor mit Folgearbeiten begonnen wird (Meißner & Tausch, 1990).

Mit der Qualitätssicherung soll erreicht werden, daß sowohl das ganze Abdichtungssystem als auch seine einzelnen Elemente planmäßig hergestellt werden und funktionstüchtig sind.

Die Prüfungen der mineralischen Dichtschicht umfassen Eingangs- und Verarbeitungsprüfungen der Baustoffe,

sowie die Überprüfung qualitätsbestimmender Arbeiten und Stoffeigenschaften. Folgende Untersuchungen und Prüfungen sind durchzuführen (Düllmann, 1986, 1988a; Jessberger, 1987, 1990b):

- Materialkenngrößen wie Kornverteilung, Zustandsgrenzen/Konsistenzgrenzen, Wasseraufnahme, Wassergehalt
- Wassergehalt beim Einbau, Homogenität, Anzahl der Walzengänge, Wasserzugabe
- Kleinstückigkeit, Frästiefe, Menge der Zusätze
- Dicke der Lagen, Ebenflächigkeit, Soll-Höhenlagen
- Erreichte Verdichtung und Homogenität je Lage durch Ermittlung von Dichte und Wassergehalt, Kornverteilung und ggf. Plastizität sowie durch optische Beobachtung
- Hydraulische Stabilität (Suffusions- und Erosionsstabilität)
- Durchlässigkeit
- Mineralogische und chemische Analyse
- Probeverdichtung.

Dichtigkeit ist die wesentlichste Eigenschaft der mineralischen Dichtschichten (Düllmann, 1986, 1987a). Die erzielbare Dichte hängt von der Verdichtungsarbeit und dem Wassergehalt ab; der Zusammenhang wird durch die Proctorkurven dargestellt. Die durch den  $k$ -Wert ausgedrückten Dichtungseigenschaften hängen von dem Grad der Bindigkeit, dem Einbauwassergehalt und dem Verdichtungsgrad ab. Das Minimum der Durchlässigkeit liegt bei einem etwas höheren Wassergehalt als dem optimalen Wassergehalt bei Proctordichte. Der Einbauwassergehalt soll das Minimum der Durchlässigkeit gewährleisten. Die geologisch bedingten Materialstreuungen haben auch Einfluß auf die Dichtigkeit und Verdichtbarkeit bindiger Erdstoffe (Düllmann, 1986, 1987b, 1989; EPA, 1986). Mit zunehmender Bindigkeit beeinflusst die Homogenität des durch Verdichtung erzielbaren Materialgefüges maßgeblich die Dichtigkeit.

Die Qualitätssicherung der Herstellung und Verlegung der Kunststoffdichtungsbahn umfaßt (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1992): Rohstoff-Eingangskontrolle; Eigenüberwachung und Qualitätskontrolle bei der Bahnenherstellung und Eigenüberwachung bei Verlegung bzw. Einbau durch die Verlegefirma.

Die folgenden Kenngrößen der Kunststoffdichtungsbahnen werden bei der Eigenüberwachung der Herstellung geprüft (Niedersächserlaß, 1988; Glück, 1989; Düllmann, 1992; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1992):

- Dichte, Schmelzindex, Rußgehalt, flüchtige Bestandteile

- Dicke, äußere Beschaffenheit, Geradheit und Planlage
- Schrumpfverhalten bei Warmlagerung, mechanische Kennwerte im Zugversuch, Widerstand gegen Weiterreißen.

Bei der Fremdüberwachung erfolgen noch ergänzende Prüfungen.

Die Fremdüberprüfung der Verlege- und Schweißarbeiten der Kunststoffdichtungsbahnen bezieht sich auf die

Überwachung der Ordnungsmäßigkeit der Eigenüberwachung und Einhaltung der Bestimmungen und Auflagen für den Einbau in die Kombinationsdichtung sowie auf die Prüfung kritischer Stellen (Dichtigkeit, Fügenähte, Reparaturstellen).

Zur Qualitätssicherung bei der Herstellung und beim Einbau der Kunststoffdichtungsbahnen, ausführlicher siehe Kapitel E.

## 8 Bergmännische Verfahren

Altlasten und Altablagerungen, bei denen bereits erprobte Sicherungsmaßnahmen, wie die Oberflächenabdichtung und die Dichtwand, das Fortschreiten der Kontamination nicht zufriedenstellend unterbinden können, erfordern die Herstellung einer nachträglichen Basisabdichtung (Eichmeyer & Pape, 1991; Eichmeyer et al., 1993). Dies ist i. d. R. durch den Einsatz bergmännischer Verfahren zu erreichen. Im folgenden sollen beispielhaft einige bergmännische Verfahren zur nachträglichen Sohlabdichtung von Altlasten kurz dargestellt werden.

Das Verfahren **Basisabdichtung Kunz (BAK)** verwendet einen Tunnelvortriebsschild, mit dem von einer Startgrube ausgehend ein kreisförmiger Tunnel mit einem Durchmesser von 3,6 m unter der Altlast aufgefahren wird (Eichmeyer & Pape, 1991; Eichmeyer et al., 1993; Hertle et al., 1992b). Hinter der Vortriebsmaschine wird ein Stahlrohr mit 2 m Durchmesser eingebaut; der entstehende Ringraum wird mit pumpfähigem, mineralischem Dichtmaterial verfüllt. Nach Erreichen der Zielbaugrube wird das Stahlrohr ausgebaut und der entstehende Hohlraum ebenfalls verfüllt. Unter der gesamten Altlastfläche werden nebeneinander solche Tunnel aufgefahren und verfüllt. Diese überschneiden sich, wodurch eine zusammenhängende Basisabdichtung hergestellt wird. In einigen Tunneln wird das Stahlrohr nicht ausgebaut und der Kernraum nicht verfüllt; die so entstandenen Hohlräume dienen als Kontrollgänge, von denen aus Überwachung, Injektionen, Drainagebohrungen etc. vorgenommen werden können. Die BAK-Basisabdichtung ist eine rein mineralische Dichtung. Das Verfahren ist überall dort einsetzbar, wo ein maschineller Tunnelvortrieb möglich ist.

Das **Heitkamp-Verfahren** arbeitet mit einer streifenweisen Unterfahrung der Altlast (Eichmeyer et al., 1993; Hollenberg et al., 1993). Ausgehend von einer Startgrube erfolgt der Vortrieb mit einem Messerschild, in ihm sind eine Teilschnittmaschine, die Fördereinrichtungen und die Arbeitskammer untergebracht. In letzterer erfolgt der Einbau der Basisabdichtung. Die mineralische Dichtschicht wird lagenweise über Austragsförderer eingebracht, und durch eine aufgehängte Vibrationswalze verdichtet. Auf der mineralischen Dichtschicht wird eine Kunststoffdichtungsbahn verlegt und verschweißt. Hier-

auf kann eine Dränageschicht oder Versatzmaterial eingebracht werden. Die Gesamthöhe des Abdichtungssystems beträgt 3,4 m. Das Verfahren kann in Lockerböden und in mittelhartem Gestein angewendet werden.

Bei dem **Paurat-Verfahren** wird die Altlast mit einem Langfrontabbauverfahren, dem im Steinkohlenbergbau bewährten Strebbau, unterfahren (Eichmeyer et al., 1993; Paurat, 1992). Unter der Längsachse der Altlast wird eine Strecke, aus einer Vorbohrung heraus, aufgefahren. Zwischen dieser Strecke und je einem Graben an den Altlastlängsseiten wird je ein Streb mit einem Schrägwalzenlader, Stegkettenförderer und selbstschreitendem, hydraulischem Strebausbau eingerichtet. Als Basisabdichtung wird mineralisches Dichtmaterial mit dichtungverbesserndem Zusatz ("DynagROUT") als Blasversatz eingebracht. Ober- und unterhalb der mineralischen Dichtschicht soll jeweils eine Rohrdrainage eingebaut werden (die untere zur Kontrolle der Dichtigkeit). Der Einbau einer Kunststoffdichtungsbahn ist nicht vorgesehen. Standfeste, mit einem Walzenschrämlader schneidbare Gesteine stellen das hauptsächliche Anwendungsgebiet dar, Lockerböden müßten zunächst verfestigt werden.

Beim **Richter-Verfahren** erfolgt eine streifenweise Unterfahrung der Altlast – wie beim Heitkamp-Verfahren (Eichmeyer et al., 1993; Richter, 1992). Der Richter-Roboter – im wesentlichen eine Schildvortriebsmaschine – arbeitet im Verbund mit zwei Tunnelrohren: Er zieht sich entlang der vor ihm liegenden Tunnelröhre und drückt sich an der hinter ihm liegenden ab. Er versetzt die auf seiner Vorderseite einlaufenden Tunnelringe so, daß sie auf seiner Rückseite um Arbeitsbreite verschoben als komplettes Tunnelrohr herauskommen. Die Längsachse des aufgefahrenen Tunnels ist im Raum gekrümmt, d. h. die Altlast wird muldenförmig vollkommen unterfahren, und es erübrigt sich die vertikale Umschließung. Das Material für die mineralische Schicht wird über Tage hergestellt und in den Roboter gepumpt. Auf der mineralischen Schicht wird eine Kunststoffdichtungsbahn verlegt. Oberhalb der Kunststoffdichtungsbahn kann entweder eine zweite mineralische Dichtung oder eine Dränschicht eingebaut werden. Anwendungsmöglichkeiten bestehen in Lockerböden und mittelharten Gesteinen.



Das **Schwerteinbauverfahren** wurde von den Firmen Hüls Troisdorf, Kunz und Ed. Züblin entwickelt (Eichmeyer et al., 1993; Herle et al., 1992a) und ist sowohl in Lockerböden als auch in standfestem Gestein anwendbar. Mit einem Abstand von 10-20 m werden Tunnelrohre unter der Altlast durchgepreßt. Zwischen je zweien dieser Rohre wird ein Stahlkörper, das "Schwert", vorgezogen, der Abbau- und Fördereinrichtungen enthält. Im Schwert wird eine Kunststoffdichtungsbahn quer zu den Tunnelrohren eingezogen und verschweißt. Ober- und unterhalb der Kunststoffdichtungsbahn wird mineralische Dichtmasse eingepumpt. Die Tunnelrohre werden entweder verfüllt oder zu einem Kontrollgang ausgebaut. Die vertikale Umschließung erfolgt durch Schlitzwände.

Nach dem von der Ed. Züblin AG entwickelten **Hochdruckinjektions-Verfahren** (Nussbaumer, 1990) werden Vorpreßtunnel von Schächten außerhalb der Altlast aufgeföhren. An einem Ende der Tunnel wird eine

Querverbindung hergestellt, in die ein Düsenkörper installiert wird. Zum Düsenkörper fördern Hochdruckpumpen Bentonit-Zement-Suspension mit einem Druck von 30-50 MPa. Die aus den Düsen austretenden Suspensionsstrahlen zerlegen den Boden und stellen durch intensives Mischen ein Suspension-Boden-Gemisch her. Der Düsenkörper wird durch den aufgelockerten Boden an einer Seilführung parallel zur Querverbindung und mit geeignetem Vorschub quer zu ihr bewegt. Dadurch entsteht unter der Altlastfläche eine geschlossene Dichtungssohle, die nach Erhärtung der Suspension undurchlässig ist.

Die Methoden zur nachträgliche Sohlabdichtung von Altlasten weisen noch einen hohen Entwicklungsbedarf auf, desgleichen wird ihr praktischer Einsatz begrenzt sein (Eichmeyer et al., 1993). Die hohen Kosten der bergmännischen Verfahren stellen ein erhebliches Problem dar. Sie können nur in Kauf genommen werden, wenn akute Umweltgefährdung zu befürchten ist.

## 9 Offene Fragen, Wissenslücken

Folgender Forschungsbedarf ist auf dem Gebiet der Bauverfahren und der Qualitätssicherung ersichtlich (Averesch, El Khafif, 1992):

- speziell für bindige Böden konstruierte Baugeräte
- Entwicklungsbedarf an der Verfahrenstechnik
- Berücksichtigung der Witterungseinflüsse bei der Bauablaufplanung
- exakte Messung der Homogenität
- billigere und zerstörungsfreie Meßmethoden der Schichtdicke
- eine Schnellmeßmethode des  $k$ -Wertes.

Die bergmännischen Verfahren basieren auf bewährten Technologien und Maschinen im Bergbau, Forschungsbedarf besteht insbesondere auf folgenden Gebieten (Eichmeyer et al., 1993):

- Herstellung eines Dichtungssystems nach TA Abfall (alle Verfahren)

- Dichtigkeit der mineralischen Dichtung an einbaubedingten Fugen (alle Verfahren)
- Messerschildkonstruktion (Heitkamp-Verfahren)
- Blasversatztechnik, Strebaubau, Grundwasser-, Gas- und Sickerwasserprobleme (Paurat-Verfahren)
- Einbringen des Dichtmaterials, Zurückschneiden der Kunststoffdichtungsbahn sowie Einhalten der Raumkurve (Richter-Roboter)
- Abbau- und Fördereinrichtungen sowie Vorschub (Schwerteinbauverfahren).

Bei der Bewertung der bergmännischen Verfahren sind folgende Aspekte zu berücksichtigen (Eichmeyer et al., 1993):

- Durchführbarkeit des Bergbauverfahrens
- Einbringen des Abdichtungssystems
- Arbeitssicherheit
- Kosten.

## 10 Literatur

Andreottola, G.; Cannas, P.; Muntoni, A. (1991): Quality control assurance plan for a sanitary landfill: a proposal model for the Italian situation. Proceedings Sardinia 91. Third International Landfill Symposium. 14.-18. October 1991. S. Margherita di Pula (Cagliari), Italy. S. 1039-1069.

August, H.; Holzlöhner, U. (1989): Begutachtung von Deponieabdichtungssystemen als Grundlage für eine Zulassung. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1989. Berlin: Erich Schmidt. S. 125-140.

Averesch, U.; El Khafif, M. (1992): Aspekte der Bauverfahrenstechnik bei der Herstellung von Deponiebasisabdichtungen. Abdichtungen von Deponien und Altlasten. S. 285-297. EF Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH.

Beitzel, H. (1992): Verfahrenstechniken zur Herstellung von mineralischen Abdichtungen im Deponiebau. (Manuskript).

Beretitsch, St. (1988): Risikofaktor Boden – Wie aussagekräftig ist die Bezeichnung "toniger Sand" im Erdbau? Baumaschinen und Bautechnik. Feb., S. 29-33.

Blank, P.; Blaut, H. (1987): Erfahrungen mit der Bentonit-Einmischdichtung mit anstehendem Boden beim Bau der Mülldeponie Gelnhausen-Haider. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, Jan., S. 117-122.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten. Berlin.

Cohrs, H. H. (1988): Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser. Hoch- und Tiefbau. Aug., S. 30-31.

Cohrs, H. H. (1989): Von Meßschreibern und "denkenden" Verdichtern. Baumaschinendienst. Juni, S. 516-521.

Cohrs, H. H. (1991): Innovative Technologien bei der Asphalt- und Bodenverdichtung. Baumaschinentechnik 4, Aug., S. 174-182.

Czurda, K. A.; Schababerle, R. (1990): Zur Frostempfindlichkeit von mineralischen Abdichtungen. In: Neuzeitliche Deponietechnik 1. A.A. Balkema/ Rotterdam/ Brookfield. 1990. S. 237-252.

Dannemann, H.; Kruse, Th. (1991): Qualitätssicherung bei einer Oberflächenabdichtung für eine Hausmülldeponie. In: Prüfmethode an mineralischen Deponieabdichtungen. Tagung Haus der Technik. Essen.

Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (Hrsg.) (1990): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA. Berlin: Ernst & Sohn.

Drescher, J. (1988): Deponiedichtungen für Sonderabfalldeponien. Arbeitspapier Teil 2. Müll und Abfall. Aug, S. 338-347.

Drescher, J.; Dahms, E. (1990): Deponieabdichtungssysteme nach dem Stand der Technik. In: Abfallwirtschaft und Deponietechnik 1990. Veröffentlichungen des Fachgebietes Abfallwirtschaft und Recycling. Universität Kassel. S. 301-322.

Düllmann, H. (1986): Mineralische Deponiebasisabdichtungen – Anforderungen an die Eignungsprüfung und Qualitätskontrolle. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, 24, S. 205-242. Aachen: RWTH.

Düllmann, H. (1987a): Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen – Erfahrungsbericht über die Freilegung von Versuchsfeldern auf der Deponie Geldern-Pont. In: Seminar über Neuzeitliche Deponietechnik. 12. Nov. 1987. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Ruhr-Universität Bochum. S. 43-76.

Düllmann, H. (1987b): Qualitätskriterien für die Beurteilung von Deponieabdichtungen aus natürlichen bindigen Erdstoffen. Ber. 6. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie. Aachen. S. 51-62.

Düllmann, H. (1987c): Geotechnische und baubetriebliche Einflüsse auf die Dichtigkeit von Deponieabdichtungen aus Ton – Ergebnisse von Praxisversuchen. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1987. Berlin: Erich Schmidt. S. 215-245.

Düllmann, H. (1988a): Grundsätze der Qualitätssicherung bei mineralischen Deponieabdichtungen. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1988. S. 111-141.

Düllmann, H. (1988b): Beurteilung von bindigen Böden für mineralische Abdichtungen – Ergebnisse von Großversuchen. In: 3. Fachgespräch. Umwelttechnik. Technische Abteilung. Philipp Holzmann AG. Frankfurt/Main. S. 1-31.

Düllmann, H. (1989): Qualitätssicherung durch Qualitätskontrolle – ein wesentliches Element des Sicherheitskonzepts von Deponien. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie. 32. Aachen: RWTH. S. 415-444.

- Düllmann, H. (1992): Qualitätssicherung beim Einbau von Kombinationsdichtungen. 8. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).
- EA-GDA (1990): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA. DGEG (Hrsg.): Berlin: Ernst & Sohn.
- Eichmeyer, H.; Pape, J. (1991): Untersuchung der Eignung bergmännischer Verfahren für die nachträgliche Sohlabdichtung von Deponien. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 173-179.
- Eichmeyer, H.; Boehm, W.; Bredel, S. (1993): Untersuchung der Eignung bergmännischer Verfahren für die nachträgliche Sohlabdichtung von Deponien. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 2. Arbeitstagung 17.-19.03.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 261-270.
- El Khafif, M.; Aversch, U. (1991): Bauverfahrenstechnik bei der Herstellung von Deponieabdichtungssystemen. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 167-172.
- EPA (1986): Construction quality assurance for hazardous waste and disposal facilities. OSWER Report No. EPA/530-SW-86-031. Land Pollution Control Division, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA (1988): Lining of waste containment and other impoundment facilities. Report No. EPA/60/2-88/052. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- Ernst, F. (1987): Erweiterung der Hausmülldeponie Ville. In: Seminar über neuzeitliche Deponietechnik. 12.11.1987. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Ruhr-Universität Bochum. S. 283-300.
- Fensch, L. : Verbesserte mineralische Dichtungsschichten für Abfalldeponien. Strabag Bau AG.
- Fey, T.; Sorg, F. (1988): Neuartige Schachtbauwerke für Deponien. Bauwirtschaft, März, S. 209-211.
- Finsterwalder, K. (1989): Beurteilungskriterien für mineralische Deponieabdichtungen – Berücksichtigung von Konvektion, Diffusion und Sorption. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1989. S. 103-115.
- Fischer, D.; Schenkel, W. (1990): Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland, der Schweiz und Österreich. Müll und Abfall 22 (1), S. 2-13.
- Gerresheim, J. P. (1986): Automatische Kontrolle nur ein Wunschtraum? – Im Erdbau dürften sich Meßsysteme an der Maschine durchsetzen. Straßen- und Tiefbau. Juli, S. 30.
- Gerresheim, J. P. (1987): Verdichtungstechnik in Theorie und Praxis. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Feb., S. 90-93.
- Geyer, G. (1991): Bau und Betrieb der Sonderabfalldeponie Billigheim. Wasser und Boden. Sept., S. 534-537.
- Glück, L. (1989): Qualitätssicherung. 5. Fachtagung "Die sichere Deponie". Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 79-86.
- Glück, L.; Zöhren, J. (1985): Kunststoffbahnen als Abdichtungsmittel im Grundwasserschutz. In: Knipschild, F. W. (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 22, S. 33-41.
- Gourdon, J.-L.; Peyret, F. (1991): Modelling and controlling the road finishing process. In: Tagungsband der I.S.A.R.C. Stuttgart. Jan., S. 467-478.
- Henrich, H. (1985): Grundlagen der Bodenverdichtung – Welches Verdichtungsgerät für welchen Boden? Baumaschinendienst. März, S. 163-169.
- Hertle, E.; Hausner, S.; Härle, D. (1992a): Nachträgliche Herstellung einer Basisabdichtung mit dem Schwerteinbauverfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 509-524.
- Hertle, E.; Hausner, S.; Poschenrieder, M. (1992b): BAK-Verfahren – Basisabdichtung Kunz – Nachträgliche Herstellung einer Dichtsohle unter Altlasten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 524-541.
- Hillebrecht, E. (1987): Planung und Ausführung einer Kombinationsdichtung – Mineralische Basisabdichtung mit Kunststoffdichtungsbahnen für die Hausmülldeponie des Vogelberg Kreises, Deponie Bastwald. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, Jan., S. 94-105.

- Hintersteiner, E. (1987): Verdichtungskontrolle im Straßenbau. Baumaschinendienst. Juni, S. 422-427.
- Hoffmann, H.; Stief, K. (1991): Schadensanalyse von Deponiebasisabdichtungen mit mineralischen Dichtstoffen und Kunststoffdichtungsbahnen. Müll und Abfall. Juli, S. 404-408.
- Hollenberg, T.; Holtmann, A.; Löwe, D. (1993): Bergmännische Verfahren zur Basisabdichtung von Altlasten. AbfallwirtschaftsJournal 1, S. 83-88.
- Horn, A. (1987): Mineralische Basisabdichtungen für Abfalldeponien, Planung – Bemessung – Bauausführung – Prüfung. In: Beiträge zur Deponietechnik. Mitteilung des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr. München. Heft 7, Jan., S. 3-33.
- Jessberger, H. L. (1985): Qualitätssicherung beim Einbau von mineralischen Deponiedichtungen. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1985. Berlin: Erich Schmidt. S. 67-92.
- Jessberger, H. L. (1987): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Bautechnik 64, Berlin: Ernst & Sohn. S. 289-303.
- Jessberger, H. L. (1989): Sicherheitsbetrachtungen bei Deponien. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1989. S. 11-47.
- Jessberger, H. L. (1990a): Anforderungen an mineralische Abdichtungen. In: Anforderungen an mineralische Abdichtungen. Arbeitsgrundlage für den Arbeitskreis "Mineralische Deponieabdichtungen". Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Ruhr-Universität Bochum.
- Jessberger, H. L. (1990b): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA-Empfehlungen. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): Neuzeitliche Deponietechnik, 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990. Rotterdam: Balkema.
- Karczmarzyk, W. (1986): Planung und Ausführung einer Kombinationsdichtung mit Kunststoffbahnen für eine Hausmülldeponie. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, Jan., S. 106-112.
- Kirschner, R.; Kreit, V. (1991): Verwendung von Geokunststoffen im Deponiebau. Entsorgungspraxis. Nov., S. 686-695.
- Kotte, G. (1986): Verdichtungsmaschinen im Straßenbau – Fehler und Probleme bei der Verdichtung von Erdstoffen. Straßen- und Tiefbau. Juli, S. 28-29.
- Krath, U.; Schwarz, T. (1993): Kombinationsdichtungsbau im Winter am Beispiel der Zentralen Mülldeponie Eiterköpfe. Müll und Abfall 5, S. 366-374.
- Kruse, Th. (1989): Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 29.
- Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA 1990): Merkblatt M3 – Die geordnete Ablagerung von Abfällen. Deponiemerkblatt, Neufassung des gleichnamigen LAGA-Merkblattes von 1979. Entwurf, Stand Februar 1990.
- Lauf, G. (1987): Mineralische Oberflächenabdichtungen. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, S. 55-57.
- Lehmann, G. (1985): Einbaukriterien für mineralische Stoffe als Dichtungsschichten. In: Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik. 2. Grundbauseminar 1985. Universität – Gesamthochschule Essen. S. 166-175.
- Leidinger, G. (1991): Session 3.2-2, Components for Construction Robots 2. Application of electrohydraulic Control, Systems with Earth Moving Machinery. In: Tagungsband der I.S.A.R.C. Stuttgart. Jan., S. 665-683.
- Maier, G. (1987): Abdichtungen auf der Deponie Bornum. In: Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, Jan., S. 89-94.
- Meißner, H.; Tausch, N. (1990): Fremdüberwachung als Beitrag zur Qualitätssicherung. Vortrag am 4. Erfahrungsaustausch, 15.-16.11.1990. Verbundvorhaben Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten am Beispiel der Deponie Georgswerder. Freie und Hansestadt Hamburg: Umweltbehörde, Amt für Altlastensanierung.
- Melchior, S.; Berger, K.; Rook, R.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (1990): Testfeld- und Traceruntersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Oberflächen-dichtsysteme für Deponien und Altlasten, Zeitschrift der dt. geol. Ges. Hannover. 141, S. 339-347.
- Meseck, H.; Reuter, E.; Knüpfer, J. (1987): Ausführungsbeispiele mineralischer und kombinierter Abdichtungssysteme. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie – Ablagerung von Abfällen. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 448-459.
- Meseck, H.; Sondermann, W. (1987): Eignungsprüfung und Güteüberwachung mineralischer Deponieabdichtungen. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, S. 34-42.

- Müffelmann, H. (1987): Erfahrungen beim Einbau von Ton als Deponiebasisabdichtung. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, S. 113-116.
- Müller, W.; Müller, U.; Preuschmann, R.; Tatzky-Gerth, R. (1992): Zulassung von Kunststoff-Komponenten für Deponieabdichtungssysteme – Dichtungsbahnen und Schutzsysteme. 8. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). S. 31-44.
- Niedersächserlaß (1988): Runderlaß 207-62812/21 vom 24.6.1988. Abdichtungen von Deponien für Siedlungsabfälle.
- N. N. (1986): Deponiebau – eine Zukunfts-Baufgabe für Spezialisten. Steinbruch und Sandgrube. April, S. 245-250.
- N. N. (1988): Deponiebau – Umweltamt geht auf Nummer sicher. Steinbruch und Sandgrube. Nov. 1988. S. 618-619.
- N. N. (1988): Merkblatt des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung. Juni 1988: Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle.
- N. N. (1988): Mischen von Abdichtmassen aus Bodenmaterialien – Mischanlagen in neuen Einsatzgebieten. Baumaschinendienst. Dez., S. 701-702.
- N. N. (1989a): Sonderabfall-Deponie Mainflingen. Tiefbau- BG. April, S. 250.
- N. N. (1989b): Hausmülldeponie Wilsum. Tiefbau- BG. April, S. 247-248.
- N. N. (1989c): Deponie Ablar. Tiefbau- BG. April, S. 251-252.
- N. N. (1991): Dauerbaustelle. Hoch- und Tiefbau. Nov, S. 29-30.
- National Rivers Authority, North West Unit (1989): Earthworks on Landfill Sites.
- North West Waste Disposal Officers Landfill Liners Sub-Group (1988): Guidelines on the Use of Landfill Liners.
- Ney, P. (1987): Schäden an Schächten in Deponien – Konsequenzen für die Bemessung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie 2 – Ablagerung von Abfällen. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 506-515.
- Oeltzschner, H. (1988a): Einrichtung von Deponien – Ausführung, Prüfung und Kontrollen im geotechnischen Bereich. Baustoff Recycling und Deponietechnik. Feb, S. 9-18.
- Oeltzschner, H. (1988b): Anforderungen an Basisabdichtungen einschließlich Deponieaufstandsflächen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie – Ablagerung von Abfällen 2. EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik GmbH. S. 326-342.
- Paurat, R. (1992): Sicherung kontaminierter Erdschichten mit dem Paurat-Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 557-572.
- Pierschke, K. J.; Kuntsche, K. (1990): Standsicherheit von mineralischen Abdichtungen auf steilen Böschungen. In: Jessberger (Hrsg.): Neuzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 161-170.
- Pietzsch, D. (1991): Simplification of soil-compaction with vibratory rollers. Tagungsband der I.S.A.R.C. Stuttgart. S. 489-504.
- Poyda, F. (1988): Hochpolymere Abdichtungsmaterialien im Erd- und Wasserbau sowie Umweltschutz. Baupraxis. Sept., S. 8-17.
- Rettenberger, G. (1990): Erfahrungen mit verschiedenen Systemen der Deponieoberflächenabdichtung. Abfallwirtschaft und Deponietechnik '90. Veröffentlichung des Fachgebietes Abfallwirtschaft und Recycling. Universität Kassel. S. 371-379.
- Reuter, E. (1989): Frostempfindlichkeit mineralischer Deponieabdichtungen. Wasser und Boden. März, S. 134-136.
- Richter, H. (1992): Das Richter-Verfahren zur Sicherung von Altlast-Deponien und kontaminierten Standorten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 543-554.
- Schicketanz, R.; Hoffmann, G. (1988): Bau einer Kombinationsdichtung auf der Deponie Singhofen. Teerbauveröffentlichungen. Nr. 34, S. 77-82.
- Schicketanz, R.; Lotze, E. (1991): Erfahrungen mit der Fremdprüfung von Kombinationsdichtungen. Fortschritte der Deponietechnik 1991. Seminar Haus der Technik. Essen.

- Schlütter, A. (1985): Konstruktive Hinweise für die Ausführung von Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. In: Knipschild, F. W. (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 22, S. 42-48.
- Schmitt, G.-P. (1988): Vertragsprobleme bei der Verwirklichung einer Hausmülldeponie. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie – Ablagerung von Abfällen 2. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 192-211.
- Schnepel, D. (1985): Behördliche Überwachung und Abnahme beim Einbau von Deponiebasisabdichtungen. In: Knipschild, F. W. (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 22, S. 22-28.
- Sehrbrock, U. (1991): Fremd- und Eigenüberwachung – Methoden und Erfahrungen. In: Prüfmethode an mineralischen Deponiedichtungen. Seminar Haus der Technik Essen.
- Simons, H.; Reuter, E. (1985): Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 18.
- Spigolon, S. J.; Kelley, M. F. (1984): Geotechnical assurance of construction of solid facilities. Interagency No. AD-96-F-2-A077. Solid and Hazardous Waste Research Division, Municipal Environmental Research Laboratory. Cincinnati: Environmental Protection Agency.
- Steffen, H. (1987): Herstellung von mineralischen Basisabdichtungen. In: Meseck, H. (Hrsg.): Mineralische Deponieabdichtungen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 24, S. 21-33.
- Stief, K. (1985a): Anforderungen an die Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen. In: Knipschild, F. W. (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 22, S. 9-12.
- Stief, K. (1985b): Doppelte Deponiebasisabdichtungssysteme. Müll und Abfall. 17 (8), S. 253-258.
- Stief, K. (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll und Abfall 18 (1), S. 15-20.
- Stroh, D. (1987): Erfahrungen bei der Ausführung einer Kombinationsdichtung. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): Seminar über neuzeitliche Deponietechnik. 12. Nov. 1987. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Ruhr-Universität Bochum. S. 219-255.
- TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.
- Tami, K.; Zimmermann, M. (1991): Session 3.0, Supervision & Control, Wheeled robots to overcome ground unevenness in construction areas. In: Tagungsband der I.S.A.R.C. Stuttgart. S. 159-176.
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (1988): Deponie – Ablagerung von Abfällen (Einführung). In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie – Ablagerung von Abfällen 2. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 1-145.
- Ulrich, A. (1991): Session 1.2, Road Construction, Automatic Levelling in Road Construction. In: Tagungsband der I.S.A.R.C. Stuttgart. S. 467-478.
- Warmbold, R. (1991): Einflüsse der Überwachungskontrollen auf den Baubetrieb und die Herstellkosten. In: Prüfmethode an mineralischen Deponiedichtungen. Essen: Haus der Technik.
- Weiland, G. (1988): Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle im Straßenbau mit radiometrischen Sonden. Baumaschinen und Bautechnik. April, S. 88-89.
- Witt, K. J.; Schmitt, G. P. (1988): Abdichtung von Böschungen und Steilwänden – Probleme und Lösungsansätze. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie – Ablagerung von Abfällen 2. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 425-439.







# M Zusammenwirken von Komponenten, Systemverhalten

(M. Brune)

1	Standsicherheiten im Deponiebau (T. Meggyes, M. Brune)	135
1.1	Problemstellung	135
1.2	Standsicherheit der Abdichtungssysteme	136
1.2.1	Einführung	136
1.2.2	Zusammenwirken der Komponenten des Abdichtungssystems	137
1.2.3	Bisherige Untersuchungen zur Standsicherheit von Abdichtungssystemen auf Böschungen	138
1.3	Standsicherheit des Deponiekörpers	138
1.4	Standsicherheit von Steilwandabdichtungen	140
1.5	Standsicherheit von Deponieschächten	141
1.6	Offene Fragen, Wissenslücken	141
2	Leckdetektion	141
2.1	Bedeutung der Leckdetektion bei Deponieabdichtungen	141
2.2	Aufgaben eines Leckdetektionssystems an der Deponiedichtung	142
2.3	Bisher entwickelte Leckdetektionssysteme	142
2.4	Offene Fragen, Wissenslücken	144
3	Risikoanalyse für Deponien	145
3.1	Bedeutung der Risikoanalyse für Deponien	145
3.2	Definition der Begriffe Risiko und Risikoanalyse	145
3.3	Bisherige Risikostudien für Kraftwerke und Industrieanlagen	145
3.4	Bisherige Risikostudien für Deponien und andere Bauwerke mit passiven Bauelementen	145
3.5	Offene Fragen, Wissenslücken	147
4	Literatur	147

## 1 Standsicherheiten im Deponiebau

### 1.1 Problemstellung

Deponien sind ingenieurtechnische Bauwerke: Sie sind so zu planen und zu berechnen, daß sie kontrollierbar und überprüfbar sind und langfristig eine hohe Standsicherheit aufweisen. Unter Standsicherheit wird bei Deponien die Sicherheit gegen das Abrutschen des gesamten Deponiekörpers bzw. einzelner Böschungen der Deponie auf möglichen Gleitflächen verstanden (Kruse, 1989). Die Standsicherheit kann zahlenmäßig mit dem Standsicherheitsbeiwert gekennzeichnet werden:

$$\eta = \frac{\text{Summe rückhaltender Kräfte}}{\text{Summe antreibender Kräfte}} \quad (1)$$

Bei Standsicherheitsuntersuchungen sind die Wechselwirkungen zwischen Deponiekörper und Abdichtungssystemen mitzuberücksichtigen. Es gibt Standsicherheitsprobleme in der Bauphase und die langzeitige Standsicherheit. Bei letzterer ist wegen der geforderten Lebensdauer von Deponien die Alterung der beteiligten Materialien zu beachten.

In der Geotechnik unterscheidet man grundsätzlich zwischen Standsicherheitsproblemen und Verformungsproblemen (Setzungen). Bei Verformungsproblemen besteht Standsicherheit; bei Deponieabdichtungen kann jedoch die Funktionsfähigkeit schon bei nicht standsicherheitsgefährdenden Verformungen beeinträchtigt sein, siehe Kapitel G. Große Verformungen des Abfall-

körpers können einen Einfluß auf die Standsicherheit haben (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1990).

## 1.2 Standsicherheit der Abdichtungssysteme

### 1.2.1 Einführung

Für die verschiedenen Bau- und Betriebsphasen sind mehrere Standsicherheitsnachweise zu erbringen (Kruse, 1989; Drescher, 1990, 1992; Stief & Engelmann, 1992):

- Standsicherheit der im anstehenden Untergrund zu profilierenden Böschungen (DIN 4084), die üblichen Neigungen sind: 1:1,5 bis 1:4
- Stabilität des Auflagers: zulässige Ablagerungsgeschwindigkeit ist anzugeben
- Verformung des Auflagers: Berechnung der Setzungen
- Standsicherheit der Basisabdichtung in der Bauphase gegen
  - Abgleiten des Dränmaterials von der KDB
  - Abrutschen der KDB mit dem Dränmaterial
  - Überbeanspruchung der Schutzschicht durch Zug
  - Abrutschen der mineralischen Dichtschicht selbst
- dauerhafte Zugspannung in der KDB
- Aufnahme der Spreizspannung in den Komponenten Erdstoffdichtung, KDB usw. des Basisabdichtungssystems
- Stabilität der Grubensohle (hydraulischer Grundbruch)
- Standsicherheit der Oberflächenabdichtung (wie bei der Basisabdichtung)
- Funktionstüchtigkeit der Entwässerungssysteme
- Setzungsverlauf der Sickerwasserrohre
- Verformung der Sickerwasserrohranschlüsse.

Maßgebender Parameter für die Standsicherheit ist die Scherfestigkeit. Die Scherfestigkeit eines Bodens stellt den größten Widerstand gegen Scherbeanspruchung dar und hängt von der wirksamen Normalspannung, der Beschaffenheit der Bodenteilchen und der Bodenzusammensetzung ab. Nach dem Erreichen der maximalen Scherfestigkeit nimmt der Scherwiderstand des Bodens bis zum Erreichen der Gleitfestigkeit bzw. Restscherfestigkeit ab (Kézdi, 1964). Das Reibungsverhalten, das die Scherfestigkeit des Bodens grundsätzlich bestimmt, wird bei nichtbindigen Böden durch die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körnern geprägt (Kézdi, 1964; Terzaghi & Peck, 1961). Auf das Rei-

bungsverhalten von bindigen Böden haben die enthaltenen Tonminerale und deren mineralogische Struktur einen entscheidenden Einfluß (zu den Eigenschaften der Tonminerale siehe Kapitel N, Abschnitt 4.1). Das Scherverhalten von Böden wird durch die experimentell ermittelten Scherspannungs-Verschiebungs- und Scherspannungs-Normalspannungs-Diagramme dargestellt; letztere werden durch den Mohr-Coulombschen Zusammenhang beschrieben:

$$\tau_F = \sigma' \tan \varphi' + c' \quad (2)$$

mit	$\tau_F$	Scherfestigkeit des Bodens
	$\sigma'$	wirksame Normalspannung
	$\varphi'$	Reibungswinkel des Bodens
	$c'$	Kohäsion des Bodens.

Der Strich hinter den Symbolen  $\sigma$ ,  $\varphi$  und  $c$  bezeichnet die im drainierten Zustand maßgebenden Werte.

Ein Böschungsbruch tritt ein, wenn eine Böschung mit einem Teil des umgebenden Erdreichs einen Gleitkörper bildet und auf einer Gleitfläche, auf welcher der Scherwiderstand des Bodens überwunden wird, abrutscht (Düllmann & Seppelfricke, 1992). Bei geschichtetem Baugrund und einer differenzierten Böschungsgeometrie empfiehlt sich die Anwendung des Lamellenverfahrens nach Krey & Bishop. Abdichtungssysteme in Deponien werden durch ihr Eigengewicht, durch die Lasten aus den darüber aufgetragenen Abfallschichten und durch den Strömungsdruck des in den Entwässerungsschichten abfließenden Wassers beansprucht. Besteht zwischen den einzelnen Elementen des Abdichtungssystems kein ausreichender Verbund, können die böschungsparellen Gewichtskomponenten das Abrutschen von Teilen bzw. der gesamten Abdichtung verursachen. Es ist nachzuweisen, daß die hangabwärts gerichteten Beanspruchungen in jeder Trennfläche aufgenommen und schließlich in die standsichere Böschung abgeleitet werden können. Der Nachweis ist für jedes Dichtungselement und jede Berührungsebene zu führen. Der Standsicherheitsbeiwert in Gleichung (1) lautet in konkreterer Formulierung (Düllmann & Seppelfricke, 1992):

$$\eta = \frac{T_{fk}}{\sum T_k + S} \quad (3)$$

mit	$T_{fk}$	maximal übertragbare haltende Schubkraft im Bruchzustand in der Sohle der k-ten Schicht der Dichtung
	$\sum T_k$	Summe der Schubkräfte der Schichten des Abdichtungssystems

Für die Gleitsicherheit einer geeigneten Kombinationsdichtung sind nicht nur die physikalischen Bodenkennwerte der einzelnen Schichten von entscheidender Bedeutung, sondern in gleicher Weise die Verbundeigenschaften zwischen den einzelnen Systemkomponenten. Wenn diese im Hinblick auf die Reibungsbeiwerte ihrer Grenzflächen nicht sorgfältig ausgewählt werden und nicht genau aufeinander abgestimmt werden, kommt es zu Rutschungen im Verlaufe der Grenzflächen mineralische Dichtung – Dichtungsbahn, Dichtungsbahn – Schutzschicht bzw. an darüberliegenden Grenzflächen im Abdichtungssystem. Zudem können im Böschungsbereich unzulässige Zugbeanspruchungen auf die KDB einwirken, wenn der Reibungsbeiwert zwischen Dichtungsbahn und darunterliegender mineralischer Dichtung im Verhältnis zu den Reibungsbeiwerten der darüberliegenden Grenzflächen zu gering ist. Die KDB darf aber nur für begrenzte Zeiten zur planmäßigen Aufnahme von Zugspannungen herangezogen werden; diese Funktionen müssen langfristig ggf. Geogitter übernehmen (Düllmann & Seppelfricke, 1992; Günther, 1991). Aus diesem Grund werden Dichtungsbahnen mit Profilierung (sandrauhe Oberfläche, Spikes, quadratische Stege, Noppen und dergleichen) für den Böschungsbereich angeboten. Dadurch kann der Reibungsbeiwert zwischen KDB und mineralischer Dichtung gezielt auf die örtlichen Gegebenheiten eingestellt werden. Alle Profilierungen bzw. Strukturierungen der Oberfläche der Dichtungsbahn sind kunststoffgerecht vorzunehmen, damit einerseits die Langzeitfestigkeit, andererseits das Alterungsverhalten der Dichtungsbahn nicht wesentlich nachteilig beeinflusst wird.

Ein anhaltender Einstau der Entwässerungsschicht beeinträchtigt die Standsicherheit des Dichtungssystems ebenfalls erheblich. Daher muß das Entwässerungssystem so bemessen werden, daß dieser Fall nicht eintritt (siehe Kapitel C, Abschnitte 2.1.2 und 2.1.3).

### 1.2.2 Zusammenwirken der Komponenten des Abdichtungssystems

In Setzungsversuchen mit einseitiger Bodenreibung (Steffen, 1985) wurde die Beanspruchung der KDB bei starken lokalen Setzungen des Auflagers simuliert. Dazu lag die KDB in der betreffenden Versuchsanordnung einer Bodenschicht, welche den unteren Teil der Apparatur ausfüllte, fest auf. Für den Preßverbund sorgte eine Beaufschlagung der KDB mit Druckluft von oben. Der untere Teil der Apparatur war so beschaffen, daß Bodenmaterial abgelassen werden konnte (Boden mit Schluff- und Tonanteilen ist nicht geeignet), um während eines Versuchsdurchgangs einen Setzungstrichter unter der KDB zu bilden. Erfäßt wurden hierbei die Maße der Setzungsmulde sowie die Dehnungsverteilung an der Dichtungsbahn außerhalb der Setzungsmulde. Nicht erfäßt wurde die Dehnungsverteilung und Verformung

der Dichtungsbahn während des Setzungsvorgangs im Setzungsmuldenbereich, sondern es wurde von den Maßen der Setzungsmulde auf die mittlere Dehnung der KDB im Versagenszustand geschlossen.

Unter Anwendung der bodenmechanischen Betrachtungsweise auf die Kombinationsdichtung ermittelte Kruse (1989) in Kastenscherversuchen mit Scherflächen von 10 cm x 10 cm und 30 cm x 30 cm Reibungsbeiwerte ( a) Reibungswinkel, bezogen auf die Maximalscherspannungen, b) Adhäsion) nach folgendem Zusammenhang:

$$\tau_{DB} = \sigma' \tan \delta' + a' \quad (4)$$

mit	$\tau_{DB}$	Scherfestigkeit zwischen Boden und KDB
	$\sigma'$	wirksame Normalspannung
	$\delta'$	Reibungswinkel zwischen Boden und KDB
	$a'$	Adhäsion zwischen Boden und KDB

für PE-HD-Dichtungsbahnen mit 6 unterschiedlichen Oberflächenprofilierungen (Spikes, große Quadrate, kleine Quadrate, sandrauh, geriffelt und glatt) gegen Sande mit unterschiedlicher Körnungslinie, gegen einen Schluffboden sowie gegen einen Tonboden. Bei den bindigen Böden wurde außerdem der Wassergehalt variiert. Der Vergleich der bezogenen Reibungsbeiwerte (Verhältnis zwischen Tangens Reibungswinkel KDB – Boden und Tangens innerer Reibungswinkel des Bodens) sowie der Adhäsionswerte ergab, daß die Scherfestigkeit zwischen Dichtungsbahn und nichtbindigen Böden durch Oberflächenstrukturierungen, insbesondere durch Spikes, Karos und eine sandrauhe Struktur entscheidend erhöht wird. Gegenüber den bindigen Böden kam der Vorteil der Karo- und der sandrauh Profilierung nur bei optimaler Verdichtung und optimalem Wassergehalt des Bodens (entsprechend den Forderungen der TA Abfall) sowie bei höheren Normalspannungen signifikant zum Tragen. Bei geringeren Normalspannungen hingegen wurde die Scherfestigkeit Dichtungsbahn – Ton sowie Dichtungsbahn – Schluff durch eine Spikes-Profilierung der KDB eindeutig am stärksten erhöht. [Hierzu ist jedoch anzumerken, daß Dichtungsbahnen mit ausgeprägten spikeartigen Strukturen nicht zugelassen werden (vgl. Kapitel O, Abschnitt 2.5.3)]. Aufbauend auf den ermittelten Reibungsbeiwerten, schlägt Kruse einen Abdichtungsaufbau für Deponieböschungen vor, diskutiert maximal zulässige Böschungsneigungen und gibt Empfehlungen zur Herstellung der Basisabdichtung im Böschungsbereich. Von Scherversuchen zur Bestimmung von Reibungsbeiwerten zwischen KDB und nichtbindigen sowie bindigen Böden berichten außerdem Balthaus & Meseck (1987), Meseck (1987) und Foik & Günther (1989). Da aus diesen Arbeiten jedoch keine anderen Aussagen resultieren als aus der hier be-

schriebenen, wird auf deren Beschreibung an dieser Stelle verzichtet.

Saathoff (1990), der in vergleichbaren Scherversuchen zusätzlich die Reibungsbeiwerte in Verbindung mit der Grenzscherspannung (der Gleitreibung entsprechend) bestimmte, betont, daß die von Kruse (1989) beobachtete hohe Scherfestigkeit der Spikes-Bahn gegenüber bindigen Böden in erster Linie auf deren hohe Adhäsionswerte zurückzuführen sei und vornehmlich einen verbesserten Haftreibungswiderstand bewirke. Die Versuche nach Saathoff ergaben für die Grenzfläche Geotextil-Boden, daß die Scherfestigkeit entscheidend von den bodenmechanischen Kenngrößen des Bodens (Kornverteilung, Wassergehalt, Lagerungsdichte) abhängt, aber kaum von der Oberflächenbeschaffenheit des Geotextils. Der Vergleich unterschiedlich strukturierter Dichtungsbahnen sowohl gegenüber mechanisch verfestigten als auch gegenüber thermisch verfestigten Vliesen ergab, daß die sandrauhe Bahn eindeutig die höchsten Gleiterscherspannungen aufnehmen konnte. Die Güte der Verzahnung zwischen KDB und Geotextil wird in geringerem Grade, so zeigte sich, von der Art des Geotextils (Vlies oder Gewebe, Spinn- oder Endlosfaser, mechanisch oder thermisch verfestigt, Flächengewicht) mitbestimmt.

Salomo & Krause (1989) führten vergleichbare Scherversuche mit einer sandrauen PE-HD-Dichtungsbahn unterschiedlichen Rauheitsgrades gegen einen Testsand sowie u. a. gegen zwei verschiedenartige Schutzvliese des Flächengewichts von ca. 1000 g/m<sup>2</sup> durch. Die Versuche mit Testsand zeigten, daß der bezogene Reibungswinkel (= Verhältnis zwischen Reibungswinkel KDB-Sand und innerem Reibungswinkel des Sandes) der Dichtungsbahn mit maximal möglichem Rauheitsgrad fast doppelt so hoch war wie der bezogene Reibungswinkel zwischen der glatten Bahn und Sand. Diese beachtliche Steigerung des bezogenen Reibungswinkels durch die Sand-Oberflächenstrukturierung aus aufgesprühtem Bahnenwerkstoff war auch gegenüber den getesteten Schutzvliesen zu verzeichnen, mit dem Unterschied, daß für die Bahn mit maximaler Rauheit sogar der dreifache bezogene Reibungswinkel, verglichen mit der glatten Bahn, bestimmt wurde. Aus den Versuchsergebnissen leiten Salomo & Krause ab, welche Böschungsneigung mit welchem Rauheitsgrad der Dichtungsbahn realisiert werden kann.

### 1.2.3 Bisherige Untersuchungen zur Standsicherheit von Abdichtungssystemen auf Böschungen

Standsicherheitsuntersuchungen von Pierschke & Kuntze (1990) über die steilstmöglichen Böschungen mit mineralischen Abdichtungsschichten bei Kraftwerksrückstands-Deponien zeigen, daß Neigungen bis 1:2,5 bei kurzer Standzeit (Betriebsböschungen) und bis 1:4,0 mit langer Standzeit (Randböschungen) praktikabel sind. Wird die Betriebsböschung von 1:2,5 auf 1:3,0 ab-

geflacht, kann der Standsicherheitsbeiwert von 1,4 auf 1,2 herabgesetzt werden. Bei der Untersuchung wurde berücksichtigt, daß die Toneinbringung mit Schürfkübelraupen und die Verdichtung mit seilgerätgezogenen, mannlosen Anhängewalzen erfolgt. Zum Abgleiten der schon hergestellten Abdichtungsflächen kam es nur in einigen Fällen, wenn der Einbauwassergehalt aus betriebstechnischen oder Witterungsgründen zu hoch war.

Auf der Sonderabfalldeponie Kettleman Hills, California, ereignete sich im März 1988 ein größerer Böschungsbruch, der mit Rutschungen von bis zu 11 m Länge in Hangrichtung verbunden war. Der Deponieabschnitt, in dessen Bereich die Böschung gebrochen war, wurde erst seit Anfang 1987 betrieben. Es zeigte sich, daß die Böschung auf Grenzflächen zwischen Komponenten des Basisabdichtungssystems abgerutscht war. Das betreffende Basisabdichtungssystem mit einer oberen und einer unteren Kombinationsdichtung, mit oberem Dränsystem aus Kiesdränschicht und Geonet, mit Kontrolldränsystem und obendrein 6 geotextilen Filter- bzw. Schutzschichten (vgl. Kapitel B, Abschnitt 2.6) bot zahlreiche potentielle Gleitflächen. Zwecks Analyse der genauen Schadensursachen ermittelten Mitchell et al. (1990) zunächst experimentell Reibungsbeiwerte für die Grenzflächen zwischen den Dichtungskomponenten, die für die Basisabdichtung der Deponie Kettleman Hills eingesetzt worden waren. Bei den Experimenten handelte es sich um Kastenscherversuche mit der Scherfläche 7 cm x 7 cm sowie um Herausziehversuche etwas größeren Maßstabs, in denen der eine Reibungspartner (z. B. die KDB) beidseitig unter Auflast zwischen den anderen Reibungspartnern eingespannt ist und seitlich aus der Versuchsanordnung herausgezogen wird. Letztere Versuchsreihe diente der Kontrolle der Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe. Als die kritischsten Grenzflächen, d. h. als die mit den geringsten Reibungsbeiwerten, erwiesen sich die Grenzflächen KDB-Geotextil, KDB-Geonet und KDB-mineralische Dichtung (letzteres gilt nur bei zu hohem Wassergehalt der mineralischen Dichtung). Ausgehend von den ermittelten Reibungsbeiwerten, zeigen Mitchell et al. auf, daß die Böschung der Deponie Kettleman Hills erheblich zu steil angelegt worden war, und stellen Überlegungen an, welche Methodik für die Standsicherheitsberechnung für Deponien die geeignetste ist.

## 1.3 Standsicherheit des Deponiekörpers

Die Stabilität des Deponiekörpers hat sicherzustellen, daß die Integrität und die Funktionsfähigkeit der Dichtungssysteme (samt Entwässerungssystem und Gasfassung) weder in Zwischenzuständen noch im Endzustand beeinträchtigt werden (Drescher, 1990; Stief & Engelmann, 1992). Probleme stellen dabei Unsicherheiten bezüglich der Kennwerte des Abfalls, die Inhomogenität und das viskoplastische Verhalten des Deponiekörpers dar. Aufgrund der Unsicherheit hin-

sichtlich der Stoffparameter des Abfalls schreibt die TA Siedlungsabfall (TA Abfall, Teil 2, 1993) vor, daß die Annahmen für die Kennwerte alle 2 Jahre zu überprüfen und ggf. die Stabilitätsberechnungen zu wiederholen sind. Aus demselben Grunde schlagen Steinkamp et al. (1992) bei mangelnder Kenntnis der relevanten Parameter einen Sicherheitsbeiwert von  $\eta = 2,0$  statt des üblichen Wertes von  $\eta \geq 1,4$  (nach DIN 4084) vor, da die Standsicherheitsberechnung am Deponiekörper mit bodenmechanischen Verfahren aus den genannten Gründen lediglich eine Näherungslösung liefern kann: Die Voraussetzungen (zuverlässige Materialkennwerte, kreisförmige, stetige Gleitlinien als Bruchfläche und die Gültigkeit der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung) sind dafür nur selten erfüllt.

Unter äußerer Standsicherheit der Deponie versteht man die dauernde Funktionstüchtigkeit von Bauteilen – vor allem den Abdichtungssystemen – und den sicheren Bestand (Außenwirkung) des Deponiekörpers. Die innere Standsicherheit wird durch die Festigkeit der Abfälle und durch die Güte des Einbaus bestimmt. Unterschreiten die Abfallkennwerte eine kritische Schwelle, so können Instabilitäten innerhalb des Deponiekörpers zur Gefährdung der äußeren Stabilität führen (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1990; Drescher, 1990; Jessberger, 1990b).

Die Geometrie und das nutzbare Volumen einer Deponie hängen in erster Linie von der Abfallfestigkeit und von der Abfallverformung ab (Drescher, 1990). Abfälle mit hohem organischem Anteil (z. B. Hausmüll oder Klärschlamm) weisen erhebliche zeitliche Festigkeitsänderungen infolge des Abbaus der organischen Substanz auf. Nach den GDA-Empfehlungen E 2-6 und E 3-6 (Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1990) können die Abfallstoffe in bodenähnliche, körnige und nicht bodenähnliche Gruppen unterteilt werden; die Verwendung bodenmechanischer Ansätze läßt sinngemäß bei der ersten Gruppe zuverlässigere Ergebnisse erwarten. Nach Jessberger (1990a) werden

- die Scherfestigkeit,
- die Dichte sowie
- der Steifemodul

am häufigsten zur Kennzeichnung des Abfalls herangezogen. Der Steifemodul wird zur Erfassung des Zusammendrückungsverhaltens verwendet. Jessberger (1990a) und Gay (1990) geben Meß- und Erfahrungswerte für die Scherparameter an: Der Reibungswinkel bewegt sich zwischen  $10^\circ$  und  $40^\circ$ , die Kohäsion zwischen 0 und  $50 \text{ kN/m}^2$ . Die Dichte des abgelagerten Hausmülls (ohne Bauschutt und Erdaushub) nimmt mit der Tiefe von  $600 \text{ kg/m}^3$  bis auf  $1.000 \text{ kg/m}^3$  zu, bei einem 15-cm-Lagen Einbau beträgt sie unabhängig von der Einbautiefe  $1.200 \text{ kg/m}^3$  (Wiemer, 1982). Aufgrund des hohen Gehalts an faserhaltigem Material kann der

Abfall erhebliche Zugspannungen übertragen (Kölsch, 1992). Das Scherverhalten von Klärschlamm ist stark vom Konsolidierungszustand abhängig (Gay, 1990). Recycling und Aufbereitung werden künftig die festen Abfälle nach Art und Menge reduzieren. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen auf die langfristige Standfestigkeit des Deponiekörpers sind kaum abzuschätzen. Die Masse der abzulagernden Klärschlämme wird dagegen voraussichtlich infolge erhöhter chemischer Belastung des Wassers und infolge einer verbesserten Abwasserreinigung zunehmen. Die Zunahme des Klärschlammanteils im Müll verringert jedoch die Scherfestigkeit und fordert z. T. andere Deponietechniken (Spillmann, 1990).

Um die Zuverlässigkeit der Standsicherheitsberechnung zu erhöhen, ist die Streuung der Stoffparameter in der Zukunft durch Vorbehandlung (Sortierung, Zerkleinerung und Verrottung) herabzusetzen (Jessberger, 1990a). Collins (1990) zeigt, daß die Vorbehandlung nicht nur genauere Stoffparameter liefert, sondern auch das Abfallvolumen erheblich reduziert. Die Zerkleinerung und Homogenisierung des Hausmülls in Drehtrommeln vor der Ablagerung ist sowohl für die mechanischen Eigenschaften des Deponiekörpers als auch für die Entgasung des Deponiekörpers vorteilhaft (Meggyes, 1993).

Wasser- und Gasanfall können die Standsicherheit von Restmülldeponien gefährden: Leichter Restmüll (nach der Wertstoffauslese) kann Porengrößen im Kapillarbereich aufweisen. Die Porenöffnungen lassen sich durch Wassermenisken schließen. Das entwickelte Gas bewirkt Auftrieb, wodurch die Deponie möglicherweise ihre Standsicherheit verliert. Als Gegenmaßnahme werden die Entwässerung des Deponiekörpers und die Vermeidung der sauren Abbauphase empfohlen (Spillmann, 1992).

Drescher (1990, 1992) empfiehlt folgende Berechnungsparameter für die Standsicherheitsberechnung am Deponiekörper:

Siedlungsabfälle (Hausmüll):

- Anfangswerte

innerer Reibungswinkel	$\varphi = 30^\circ$
Kohäsion	$c = 20 \text{ kN/m}^2$
Dichte: Frischmüll	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
Rottemüll	$\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$

- Endwerte

innerer Reibungswinkel	$\varphi' = 25^\circ$
Kohäsion	$c' = 0 \text{ kN/m}^2$
Dichte	$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$

Schlämme (kommunale Klärschlämme und organische Schlämme aus der Produktion):

- Anfangswerte: je nach Zusammensetzung und Konditionierung
- Endwerte: je nach Konditionierung
  - innerer Reibungswinkel  $\varphi' = 15 \text{ bis } 25^\circ$
  - Kohäsion  $c' = 0 \text{ kN/m}^2$
  - Dichte  $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$

Sonstige Schlämme: je nach Zusammensetzung und Konditionierung, für die einaxiale Druckfestigkeit muß gelten:  $q_u \geq 25 \text{ kN/m}^2$ , und das rheologische Verhalten muß beachtet werden.

Zur Parameterbestimmung können folgende Methoden verwendet werden (Drescher, 1992):

- direkte und indirekte Feld- und Labormethoden
- Rückrechnung aus bestehenden Deponien
- Verformungsmessung des Deponieuntergrundes und des Deponiekörpers.

Für den Deponiekörper sind folgende rechnerische Standsicherheitsnachweise zu erbringen (Drescher, 1990, 1992; Stief & Engelmann, 1992):

- Standsicherheit des Deponiekörpers während der und nach der Betriebsphase: kein Gleiten bzw. Abrutschen des Deponiekörpers
- Böschungsstandsicherheit für verschiedene Verfüllungszustände und für den Endzustand
- Verformungen: Eigensetzungen des Deponiekörpers.

Der zeitliche Setzungsverlauf biologisch vorbehandelten Hausmülls setzt sich nach Ramke (1992) aus Sofort-, Primär- und Sekundärsetzung zusammen. Die Ursachen der Setzung sind:

- Verdichtung
- Entwässerung
- Massenschwund.

Die einzelnen Mechanismen der Verdichtung sind (Ramke, 1992):

- Zusammendrücken der Feststoffteilchen
- dichtere Lagerung der einzelnen Körner
- Zerstörung tragender Strukturen
- Eindringen von Feinpartikeln in die Hohlräume.

Aufgrund zahlreicher Messungen hat Gertloff (1992) eine empirische Formel für den zeitlichen Setzungsverlauf von Deponien aufgestellt:

$$s = s_k(1 - c_k^t) + s_l(1 - c_l^t) \quad (5)$$

mit	$s$	Setzung bei $t$
	$t$	Zeit
	$s_k$	Endbetrag der Kurzzeitsetzung (1–4 Jahre)
	$s_l$	Endbetrag der Langzeitsetzung (10–40 Jahre)
	$c_k$ und $c_l$	Zeitkonstanten (Geschwindigkeit und Dauer des Setzungsverlaufs).

Für die Messung von Verformungen infolge von Setzungen hat Collins (1992) eine Schlauchwaage entwickelt, mit der geodätische Höhenmessungen in Rohren durchgeführt werden können (siehe auch Kölsch & Collins, 1992). Oltmanns & Wyrwa (1992) berichten über Inklinometermessungen in Gasbrunnen und Schächten.

## 1.4 Standsicherheit von Steilwandabdichtungen

Immer häufiger werden Deponien in offengelassenen Steinbrüchen angelegt (Amann et al., 1990; Amann et al., 1991; Möller, 1990; Ruppert, 1992). Die Untersuchung der Standsicherheit stellt hier einen besonderen Fall dar: Die Standsicherheit soll außer für die Steilwandabdichtung (eine annähernd vertikale Kombinationsdichtung) auch für einzelne Felskeile und die Gesamtwand untersucht werden. Dabei wird die Finite-Elemente-Methode angewendet (Amann et al., 1991; Krajewski & Großmann, 1992). Für das Gestein nimmt Amann ein linear-elastisches, für die Trennfläche ein linear-elastisch-viskoplastisches Verhalten an. Es wird die Coulombsche Bruchbedingung angesetzt. Zur Erhöhung der Sicherheit müssen einzelne Felskeile häufig durch Spritzbeton und Anker gesichert werden, bestimmte Teilflächen der Steilwand müssen meßtechnisch überwacht und Kluft- sowie Oberflächenwässer abgeleitet werden (Amann et al., 1990; Amann et al., 1991).

Die von Ruppert (1992) beschriebene Steilwandabdichtung besteht aus folgenden Bauelementen:

- Steilwandsicherung (Anker, Stahlseile, Maschendraht)
- Drainage (Abstandhaltung)
- Vlies
- Mineralische Dichtschicht (1,60 m breit, in 20-cm-Lagen)
- PE-HD-Bahn
- Vlies
- Mineralische Dämmplatten
- Gabionen.

Der Bau der Steilwandabdichtung ist mit dem Abfall einbau verknüpft: Der Antransport der Baumaterialien erfolgt über den Abfallkörper.

Krubasik (1992) berichtet über ein Steilwandabdichtungssystem aus Stahlbeton-Fertigteileplatten und PE-HD-Noppenplatten. Die Betonplatten werden an Felsankern befestigt und mit Schotter hinterfüllt; die Fugen ausgemörtelt bzw. mit angeschweißten PE-HD-Streifen abgedeckt.

## 1.5 Standsicherheit von Deponieschächten

Die Standsicherheitsuntersuchung von Deponieschächten soll unter Beachtung folgender Lasten erfolgen (Sasse, 1992):

- Horizontaler Erddruck: Belastung aus einseitiger Abfallschüttung (z. B. im Böschungsbereich)
- Vertikale Belastung aus Eigengewicht und negativer Mantelreibung
- Verkehr von Einbaufahrzeugen
- Imperfektionen: Außermittigkeiten, Schiefstellungen, Herstellungstoleranzen
- Temperatureinwirkungen, insbesondere bei Kunststoffschächten
- Medienangriff: Abminderung der zulässigen Spannung wegen korrosiver Wirkung des Abfalls
- Zeitabhängiges Festigkeitsverhalten insbesondere von organischen Werkstoffen (z. B. Kunststoffe).

Da sich die Berechnungsansätze für die Schachtbemessung im Erdreich nicht einfach auf Schächte im Abfallbereich übertragen lassen, und da sowohl räumlich als auch zeitlich sehr unterschiedliche Kräfte auf solch einen Schacht einwirken, sollten Schächte im Deponiekörper möglichst vermieden werden. Ist dies nicht vermeidbar, sollten sie aus viskoelastischen und korrosionsbeständigen Materialien unter Anwendung flexibler Konstruktionen gebaut werden (weiteres hierzu siehe Kapitel C, Abschnitt 2.1.4).

## 2 Leckdetektion

### 2.1 Bedeutung der Leckdetektion bei Deponieabdichtungen

Die Funktion eines Leckdetektionssystems für Deponieabdichtungen besteht darin, das Vorhandensein von Wasser (bei Oberflächenabdichtungen) bzw. von Schadstoffen in wäßriger Lösung oder in der Gasphase (bei Basisabdichtungen) anzuzeigen, welche unerwünschterweise durch die Dichtung getreten sind. Das Leck soll räumlich eingegrenzt werden, damit gezielte Reparaturmaßnahmen vorgenommen werden können.

Während in Deutschland die TA Abfall (1991) ein Leckdetektionssystem für Oberflächenabdichtungen von

### 1.6 Offene Fragen, Wissenslücken

Aus den beschriebenen bisherigen Untersuchungen resultiert folgender wesentlicher Forschungsbedarf:

- Formulierung von einheitlichen Randbedingungen und Entwicklung von Prüfverfahren zur Ermittlung der Verbundeigenschaften von Kombinationsdichtungen.
  - Vergleichende Bestimmung von Reibungsbeiwerten zwischen den verschiedenen Grenzflächen des Abdichtungssystems (unter gleichzeitiger Erfassung der Dehnungsverteilung in der KDB, mit größeren Scherflächen als bisher).
  - Untersuchung des Einflusses starker lokaler Setzungen auf die Kombinationsdichtung (Erfassung der Spannungs- bzw. Dehnungsverteilung der KDB im Bereich der Setzungsmulde, Berücksichtigung des Einflusses beidseitiger Reibung an der KDB).
- (Auf die bisher genannten Punkte wird im Rahmen des BMFT-Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme" verstärkt eingegangen (Haack, 1991 und 1993)).
- Ermittlung zuverlässiger, genauer Stoffparameter für Standsicherheitsberechnungen am Abfallkörper.
  - Ermittlung der zeitlichen Änderung der Eigenschaften des Mülls und der Abdichtungskomponenten.
  - Entwicklung von Methoden, die das Einstellen vorgegebener Stoffparameter des Mülls ermöglichen.
  - Weiterentwicklung der Methoden der Abfallvorbehandlung (Sortierung, Zerkleinerung, Verrottung).
  - Entwicklung von Methoden zur Vermeidung des Einstaus von Entwässerungsschichten (vgl. auch Kapitel C).

Sonderabfalldeponien fordert, ist ein solches Detektionssystem für Basisabdichtungssysteme nicht zwingend vorgeschrieben. Diese Entscheidung ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß Reparaturmaßnahmen an der Basisabdichtung als schwer realisierbar angesehen werden, insbesondere bei höheren Abfallüberdeckungen. – Anders in den USA. Dort ist es bereits seit ca. 6 Jahren Stand der Technik, Sonderabfalldeponien mit einer Leckdetektionseinrichtung an der Basisabdichtung auszustatten. Hiervon wird im nächsten Abschnitt noch die Rede sein. Nach Ansicht der Verfasser ist auch eine Leckdetektionsmöglichkeit an der Basisabdichtung generell wünschenswert, damit Leckagen in der Dichtung erkannt werden, wenn sie entstehen, und nicht erst

dadurch, daß der Grundwasserleiter schon deutlich kontaminiert ist. Vorausgesetzt, Reparaturmaßnahmen sind durchführbar und werden sofort vorgenommen, bestehen bei Vorhandensein einer Leckdetektion Chancen, schwerere und weiträumigere Kontaminationen des Untergrunds zu verhindern.

## 2.2 Aufgaben eines Leckdetektionssystems an der Deponiedichtung

Ein Leckdetektionssystem soll möglichst folgende Informationen geben:

- 1) Beschaffenheit der Substanzen, welche durch die Dichtung treten (Handelt es sich um Oberflächenwasser oder Schadstoffe in wäßriger Lösung? – Welche Schadstoffe treten auf?)
- 2) Menge an durchtretender Substanz, d. h. in der Regel Sickerwasser, pro Flächen- und Zeiteinheit: Diese Information ist bei Oberflächenabdichtungen für eine Wasserbilanzierung wichtig, welche in Deutschland vom Gesetzgeber für die Nachsorgephase von Sonderabfalldeponien gefordert wird (TA Abfall, 1991). Generell ist dieser Parameter ein Maß für den Schaden, der durch das Leck/die Lecks hervorgerufen wird.
- 3) Lage des/der Lecks sowie
- 4) Fläche des/der Lecks: Reparaturen setzen voraus, daß der zu reparierende Bereich klar eingegrenzt wird.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der geeignetsten Leckdetektionsmöglichkeit. Kriterien für eine Eignung der Verfahren an Deponieabdichtungen sind vor allem:

- Ortungsgenauigkeit.
- Ansprechempfindlichkeit.
- physikalisch-chemisch-biologische Beständigkeit der erdgebundenen Bauelemente.
- Wie gut läßt sich das System in das Dichtungssystem integrieren, ohne dessen Funktion zu beeinträchtigen (z. B. den Preßverbund bei der Kombinationsdichtung)?
- Wie gut paßt der Bauablauf für das Leckdetektionssystem in den Bauablauf beim Deponiedichtungsbau?
- Wie einfach bzw. wie schwer ist das System zu bedienen und zu warten?
- Kann bei einer Deponieerweiterung auch die detektierte Fläche entsprechend erweitert werden?
- Wirtschaftlichkeit. Das heißt, in welchem Verhältnis stehen die Kosten für Bau und Betrieb zum Nutzen (s. vorhergehende Kriterien)?

Im nächsten Abschnitt werden verschiedene entwickelte Leckdetektionsverfahren vorgestellt und hinsichtlich

ihrer Praktikabilität kritisch betrachtet. Abschnitt 2.4 soll noch bestehenden Forschungsbedarf auf diesem Gebiet aufzeigen und auf gegenwärtige Forschungsaktivitäten hinweisen.

## 2.3 Bisher entwickelte Leckdetektionssysteme

### Leckdetektionssysteme mit begehbaren Einbauten

Die wirksamste Methode der Leckdetektion ist auch gleichzeitig die aufwendigste. Sie basiert auf der Anlage ganzflächig an der Basis begehbare Deponien, also auf ausgesprochenen Deponiebauwerken. Diese "Hochsicherheitsdeponien" (vgl. Thomé-Kozmiensky, 1987; Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1990; Stief, 1985), die beispielsweise von den Firmen Hochtief, STRABAG Bau, Züblin AG und DYWIDAG Umweltschutztechnik GmbH (zu letzterem siehe Rudat, 1988) angeboten werden, sind in der Regel Stahlbetonkonstruktionen, die zweischalig angelegt sind. Das heißt, die innere Betonschale beherbergt die Basisabdichtung und darüber den Abfall. Diese innere Schale ist mit Betonträgern, die bis zu mehreren Metern hoch sein können, auf eine äußere Stahlbetonschale gestützt. Der so gewonnene Hohlraum bietet die Möglichkeit, die innere Schale fast ganzflächig auf Dichtheit zu überwachen. Reparaturmaßnahmen können äußerst gezielt und relativ unbeeinträchtigt vorgenommen werden. Trotz der hervorragenden "Transparenz" von Basisabdichtungssystemen solcher Deponiebauwerke können die Bau- und Betriebskosten dieser Anlagen (Einlagerungskosten zwischen 100,- und 200,- DM pro m<sup>3</sup> Abfall nach Schätzungen der Züblin AG) nur für hochgradig umweltgefährdende Sonderabfälle gerechtfertigt werden.

Ein mit den "Hochsicherheitsdeponien" verwandtes Konzept ist das der teilbegehbaren Deponien wie etwa das System Holtmann (Birkner, 1989) oder ein System der Philipp Holzmann AG (Holzmann AG, 1986). Bei ersterem System sind unterhalb der Deponiebasis, also auch unterhalb des eigentlichen (primären) Abdichtungssystems in Abständen von 50-100 m parallele begehbare Stollen des Durchmessers 2 m angeordnet. In diese Stollen münden rechtwinklig Kontrolldränrohre, die als Halbrohre ausgebildet sind und in einem seitlichen Abstand von ca. 2,5 m auf die untere (sekundäre) Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aufgeschweißt sind. Den Raum zwischen unterer KDB und oberer primärer Dichtung füllt Dränkie; somit ist diese Schicht zusammen mit den Kontrolldränagen analog zum "Secondary Leachate Collection and Removal System" US-amerikanischer Sondermülldeponien zu sehen (s. u.). Wird ein Abfluß aus dem Stollen bemerkt, kann nach dem wasserführenden Kontrolldränrohr gesucht werden. Anschließend muß das Deponiepersonal innerhalb des wasserführenden Dräns mit einer Sonde die Leckagestelle eingrenzen. Der Leckagebereich (Ortungsgenauigkeit nach Birkner, 1989 ca. 3 m<sup>3</sup>) kann dann beispielsweise mit Hilfe einer Dichtmasseninjektion



repariert werden. Das System der Holzmann AG funktioniert in ähnlicher Weise. Beiden Verfahren ist gemeinsam, daß sie teure Einbauten unterhalb der Deponiebasis erfordern. Die Lecküberwachung und die Leckagesuche ist mit hohem Personaleinsatz verbunden. Die hieraus resultierenden hohen Kosten lassen diese Konzepte – wie bei den "Hochsicherheitsdeponien" – wiederum nur bei hochgradig umweltgefährdenden Abfällen interessant erscheinen.

### **Doppelte Abdichtung mit dazwischenliegendem Kontrolldränsystem**

Seit ca. 6 Jahren ist es in den USA Stand der Technik, Sonderabfalldeponien mit einer doppelten Basisabdichtung zu versehen, die aus einem "top liner", also einer oberen Dichtung sowie einem "bottom liner", einer unteren Dichtung besteht (vgl. Kapitel B). Zwischen den beiden Dichtungssystemen ist ein Kontroll-Dränsystem angeordnet, welches "Secondary Leachate Collection and Removal System" (kurz S-LCRS) genannt wird und zusätzlich zum eigentlichen Dränsystem, welches über dem "top liner" angeordnet ist, existiert. Dieses S-LCRS wird in Kapitel C im Abschnitt 2.2 genauer beschrieben. Die Überwachung eines solchen Kontrolldränsystems besteht darin, regelmäßig die Abflüsse aus den verschiedenen Kontrolldränrohren zu erfassen. Die Ansprechempfindlichkeit dieser Kontrolldränagen ist nach Bonaparte & Gross (1990) hinreichend, gemessen an den Leckageberechnungen von Giroud & Bonaparte (1989 a und b) für Kunststoffdichtungsbahnen und Kombinationsdichtungen. Nach Bonaparte & Gross (1990) sollte jedoch ein "Abfluß-Grundrauschen" von 200 l/(ha·d) zugrundegelegt werden, wobei man erst bei Abflußwerten oberhalb dieses "threshold value" von Leckagen ausgehen sollte (vgl. Kapitel C, Abschnitt 2.2).

Auch in Europa wird bei einer Reihe von Sonderabfalldeponien, vor allem in Deutschland, Großbritannien und Italien von solch einer Art der Leckdetektion an der Basisabdichtung Gebrauch gemacht (Egloffstein & Burkhardt, 1993). Bei bestimmten Systemen (z. B. System "Sarna", realisiert bei einer Schweizerischen zwei Südtiroler Sonderabfalldeponien) besteht die Möglichkeit, an die Kontrolldränschicht einen permanenten Unterdruck anzulegen, um so eine höhere Ansprechempfindlichkeit zu erzielen. Um die Ortungsgenauigkeit zu erhöhen, sehen die Konstrukteure solcher Kontrolldränagesysteme teilweise eine Einteilung der Kontrolldränschicht in Kammern bzw. Felder vor.

Vorteile solcher Kontrolldränschichten sind:

- Vergleichsweise geringe Kosten für den Betrieb,
- die Baumaßnahmen sind gut in den gesamten Bauablauf für die Abdichtung integrierbar,
- die Bauelemente sind ebenso langzeitbeständig wie die eines üblichen Dränsystems,

- das System ist sehr einfach zu überwachen.

Der schwerwiegendste Nachteil dieser Leckdetektionssysteme aus doppelter Dichtung mit dazwischen liegender Kontrolldränage besteht darin, daß die erzielbare Ortungsgenauigkeit nur gering ist, gemessen am hohen Bauaufwand (Bau eines zusätzlichen Dränsystems und eines zusätzlichen Dichtungssystems). Selbst wenn man die Kontrolldränrohre in Abständen von nur wenigen Metern verlegt, sagt das "Ansprechen" bestimmter Rohre mit bestimmten Flußraten noch nichts darüber aus, wo sich das Leck in Richtung der Rohrstränge befindet. Hier hilft im Zweifelsfall nur eine Befahrung der wasserführenden Kontrolldränrohre mit einer Sonde, um das Leck für eine Reparatur wirklich hinreichend eingrenzen zu können. Dieses bedingt wiederum einen hohen Personaleinsatz und damit hohe Betriebskosten.

Als weiterer Nachteil ist zu nennen, daß es häufig sehr schwierig ist, die Abflüsse zu interpretieren, d. h. den Anteil von wirklichem Leckagewasser auszumachen, wenn Konsolidierungswasser aus einer darüberliegenden mineralischen Dichtung bzw. Infiltrationswasser aufgrund eines erhöhten Grundwasserspiegels eine Rolle spielen (Bonaparte & Gross, 1990).

### **Leckdetektionssysteme mit fernüberwachbaren Einbauten**

Die bisher entwickelten Verfahren zur Leckdetektion, bei denen die Dichtheit meßtechnisch fernüberwacht wird, sind zur Zeit der Fertigstellung dieses Berichtes noch nicht auf Deponien angewendet worden bzw. befinden sich in in der Erprobungsphase.

Das Prakla-Seismos-Verfahren wurde 1987 zum Patent angemeldet (Weigl, 1987 und Weigl, 1988). Dabei werden Potentialdifferenzen innerhalb der obersten Bodenschichten unterhalb der Basisabdichtung erfaßt. In einem groben Raster, d. h. mit Abständen bis zu 100 m, werden vor dem Bau der Deponiebasis Potentialsonden in den anstehenden Boden eingebaut. Vier Basiselektroden bzw. -sonden sorgen für das Bezugspotential. Bei der Messung werden die Potentialdifferenzen für die verschiedenen Potentialsonden erfaßt. Die Meßdaten können sofort elektronisch verarbeitet werden und liefern für einen bestimmten Meßzeitpunkt jeweils einen Kurvenzug, in dem die Potentialdifferenz gegen die fortlaufende Zahl für die jeweilige Potentialsonde aufgetragen ist. Entscheidend ist das ständige zeitliche Verfolgen solcher Kurven. Eine Veränderung des Wassergehaltes im Boden etwa unter einer Leckage würde sich in der Veränderung der Kurve an der Stelle ausdrücken, die der nächstgelegenen Potentialsonde zuzuordnen ist. Der Vorteil des Verfahrens besteht in einem geringen Investitionsaufwand; auch der laufende Betrieb ist relativ wenig aufwendig. Absolut problematisch ist die geringe Ortsauflösung, bedingt durch das grobe Elektrodenraster, die hohe Störanfälligkeit der Messungen sowie die hohe Unsicherheit bei der Interpretation der Kurven, die ein erhebliches Maß an Erfahrungen voraussetzt. Für eine

eindeutige Lokalisation einer engbegrenzten Fehlstelle in der Deponieabdichtung scheint dieses Verfahren nicht geeignet zu sein.

Ein anderes, ähnlich funktionierendes Verfahren ist am Southwest Research Institute, San Antonio, Texas entwickelt worden (Darilek & Parra, 1989). Hierbei geht es um eine Leckeingrenzung an Kunststoffdichtungsbahnen. Mittels einer Spannungsquelle und über Basiselektroden erhält der Boden unterhalb der zu prüfenden KDB ein Bezugspotential. Das Bezugspotential wird also in ähnlicher Weise erzeugt wie beim Prakla-Seismos-Verfahren. Anders als bei diesem werden aber anstelle festinstallierter Potentialsonden bewegliche Potentialelektroden in "scanning-Manier" dicht oberhalb der KDB in zwei Dimensionen bewegt. Die Potentialelektroden müssen sich dabei in wäßriger flüssiger Phase befinden. Das Auswertergebnis dieser computergestützten Potentialdifferenzmessungen ist eine Karte der Kunststoffdichtungsbahn von dem gesamten vermessenen Deponieabschnitt, welche die Isolinien der verschiedenen ermittelten Potentialdifferenzen enthält. Eine Leckage ist dadurch gekennzeichnet, daß sie auf der Karte von einer relativ hohen Dichte quasi konzentrischer Isolinien umgeben ist; vergleichbar einem steilen Berg, der sich auf einer topographischen Karte durch ein ähnliches Muster an Höhenlinien auszeichnet. Nach Angaben von Darilek & Parra (1989) können nach Auswertung solcher Kartierungen Lecks in ihrer Größe eingeschätzt werden. Lecks mit dem Durchmesser 0,8 mm sollen nach Angaben der Autoren noch erkannt werden können. Leider ist dieses System nur auf KDB-Dichtungen vor der eigentlichen Inbetriebnahme des Dichtungssystems anwendbar; d.h. diese Methodik ist in erster Linie für eine Qualitätsprüfung der neu eingebauten Dichtungsbahn denkbar, denn die Potentialelektroden müssen auf der KDB bewegt werden. Dieses ist also kein Verfahren zur Dichtungsüberwachung während des Deponiebetriebs oder darüber hinaus.

Hinsichtlich einer ganz anderen Detektionstechnik, dem Time-Domain-Reflectometry-Verfahren (TDR), existieren Erfahrungen vor allem in der Ölindustrie, wo es mit Erfolg zur Dichtigkeitskontrolle an Tanks eingesetzt wird (vgl. auch Waller & Davis (1984) sowie Waller & Singh (1983)). Eine solche Technik wird auch von der TELEKOM bei der Kabelüberwachung angewandt. Dafür gängige Sensorkabel, die auf Dielektrizitätsänderungen im umgebenden Medium ansprechen (Gore & Co GmbH, 1990), zeigen Lecks an einer Deponiedichtung nur an, wenn organische Substanzen in eigener flüssiger Phase (nicht mit Wasser mischbar) hindurchtreten. Wäßrige Lösungen werden nicht detektiert. Dieses Verfahren ist zwar prinzipiell bei Deponien durchführbar (vgl. Waller & Singh, 1983). Ein erheblicher Nachteil ist aber das Nichtansprechen auf wäßrige Lösungen. An den Deponiedichtungen hat man es jedoch in aller Regel mit wäßrigen Lösungen bzw. Emulsionen zu tun. Was das Verfahren darüber hinaus für Deponien schwer realisierbar macht, ist die hohe erforderliche Dichte der parallel zu verlegenden Sensorkabel, denn die

Ansprechempfindlichkeit hängt stark von der Verlegedichte ab.

Darüber hinaus gibt es Überlegungen, Deponiedichtungen mit Hilfe von Feuchtesensoren zu überwachen, die die Leitfähigkeit der mineralischen Dichtung anzeigen (Ernst, 1990). Problematisch bei diesem Konzept ist, daß die Meßresultate nicht eindeutig interpretierbar sind. Die Meßergebnisse liefern keine Aussage über die Herkunft des Wassers. Außerdem ist das Überwachungs-raster bei einer erschwinglichen Anzahl von Feuchtesensoren zu grob für eine genaue Ortsauflösung.

Ein weiteres Überwachungskonzept von Deponiedichtungen basiert auf Erfahrungen aus anderen Bereichen, erweist sich aber als nicht praktikabel für Deponien: das akustische Überwachungsverfahren (Stammler & Bol, 1986; Waller & Davis, 1984; Schmidt, 1989).

Von der Firma Siemens ist das Leckageortungssystem LEOS entwickelt worden, welches bisher bevorzugt bei der Überwachung von Rohrleitungen der mineral ölverarbeitenden Industrie eingesetzt wird (Firmenprospekt der Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, 1991). Kernstück dieses Systems ist ein dreischichtiger Sensorschlauch, welcher für gasförmige Stoffe diffusiv durchlässig ist. Detektierbare Substanzen sind somit Gase oder Stoffe, die auch bei Temperaturen unwesentlich über 0 °C noch einen signifikanten gasförmigen Anteil aufweisen: verschiedene aliphatische und cyclische Kohlenwasserstoffe, halogenierte Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Ketone, Ester sowie organische Stickstoffverbindungen. Reines Wasser kann nicht detektiert, sondern nur über die Zugabe eines Tracers erfaßt werden. Nicht erfaßt werden außerdem organische Säuren sowie anorganische Verbindungen, beides wichtige Substanzgruppen im Sickerwasser. Der Schlauch wird als Schleife gelegt, welche über eine Überwachungs- bzw. Detektorstation führt. Lt. Firma Siemens stellt sich im Schlauchinneren binnen relativ kurzer Zeit ein getreues Abbild der Gaskonzentrationsverteilung der Schlauchumgebung ein. Mit Hilfe einer Pumpe kann der Gasinhalt des Schlauchs zu einer Zirkulation mit definierter Geschwindigkeit gebracht werden, sodaß sich der gesamte Gasinhalt eines Schlauchs in einer bestimmten Zeit an den substanzgruppenspezifischen Halbleitersensoren der Detektorstation vorbeibewegen kann. Aus der Höhe der von den Sensoren verursachten Peaks kann auf die Leckgröße, von der Zeit des Auftretens auf die Position des Lecks geschlossen werden. So erkannte "Schadstoffwolken" können ggf. auch verprobt und der Gaschromatographie unterzogen werden. Egloffstein & Burkhardt (1993) berichten von Planungen, dieses System auf Oberflächen- und Basisabdichtungen von Abfalldeponien anzuwenden.

## 2.4 Offene Fragen, Wissenslücken

Führt man sich noch einmal die in Abschnitt 2.2 aufgeführten Kriterien für die Praktikabilität eines Leckortungssystems vor Augen und betrachtet daraufhin

die beschriebenen Konzepte, so ist ein Forschungsbedarf dahingehend zu erkennen, Leckdetektionssysteme zu entwickeln, die die Eigenschaften hohe Ortungsgenauigkeit, hohe Ansprechempfindlichkeit, Langzeitbeständigkeit der erdgebundenen Bauelemente, einfache Bedienbarkeit sowie möglichst geringe Kosten optimal in sich vereinen.

### 3 Risikoanalyse für Deponien

#### 3.1 Bedeutung der Risikoanalyse für Deponien

Erst seit ca. einem Jahrzehnt kann man von einer Deponie als von einem technischem Bauwerk sprechen. Die Weiterentwicklung der technischen Komponenten von Deponien, insbesondere der Dichtungssysteme, ist immer noch in vollem Fluß. Aufgrund fehlenden Wissens über Materialeigenschaften, vor allem in puncto Langzeitverhalten, sowie über das Zusammenwirken der verschiedenen technischen Komponenten ist noch weitgehend ungeklärt, welche Gefährdung bzw. welches Risiko von einer Deponie bei einem bestimmten Abdichtungsaufbau und einer bestimmten Betriebsweise wirklich auf die Umwelt ausgeht. Dabei wäre es sehr wichtig, unterschiedliche Betriebsweisen und unterschiedliche technische Deponiekonzepte, vor allem verschiedene Dichtungsstrukturen risikoanalytisch vergleichen zu können. Im Gegensatz zum Anlagenbau (z. B. für Chemieanlagen und Kernkraftwerke) fehlen vergleichbare risikoanalytische Untersuchungen bisher für Deponien.

Die Entwicklung einer risikoanalytischen Methodik zum Vergleich verschiedener Deponiekonzepte erscheint noch aus einem weiteren Grund sehr wünschenswert: Die TA Abfall (1991) sowie die TA Siedlungsabfall (1993) schreiben zwar einen bestimmten Dichtungsaufbau – die Kombinationsdichtung – als Standarddichtungssystem fest. Alternative Dichtsysteme sind aber dennoch zugelassen, "wenn nachgewiesen wird, daß sie gleichwertig sind". Dieses Kriterium wurde aber bisher nicht in konkrete Einzelanforderungen umgesetzt. Alternative Dichtungssysteme können also zur Zeit nicht in ihrer Dichtwirkung quantitativ mit der Kombinationsdichtung verglichen werden. Hierzu kann ein Sicherheitskonzept einen entscheidenden Beitrag leisten.

#### 3.2 Definition der Begriffe Risiko und Risikoanalyse

Das Risiko ist allgemein definiert als das Maß für den möglichen Verlust bei einer unsicheren Unternehmung (DUDEN). Ein quantifizierbares Risiko ist dabei ein meßbarer Schaden, der bei einer bestimmten unsicheren Unternehmung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt. Die am häufigsten verwendete mathematische Definition des Risikobegriffs ist die des Risikos als

Ein Forschungsvorhaben innerhalb des BMFT-Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme" befaßt sich damit, ein neues Verfahren für die Dichtigkeitsüberwachung von Deponieabdichtungen bis zur Anwendungsreife zu entwickeln, welches besser als bisher Effektivität und Wirtschaftlichkeit miteinander verbinden soll (Hahn & Rödel, 1991; Hahn et al., 1993).

Produkt aus Schadenshöhe und Eintrittswahrscheinlichkeit desselben Schadens:

$$R(W, S) = W \times S$$

Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $W$  entspricht bei technischen Anlagen der Gesamtausfallwahrscheinlichkeit, abhängig von den Ausfallwahrscheinlichkeiten der einzelnen Funktionselemente. Die Schadensgröße  $S$  entspricht dem quantifizierbaren Schaden, bewirkt durch den Ausfall der Anlage, bei einer Deponie beispielsweise das Maß an Emissionen durch die Basisabdichtung. Das Arbeitsgebiet der Risikoanalyse besteht nun darin,

- die Größe  $W$  mit einem Wahrscheinlichkeitsmodell sowie
- die Größe  $S$  mit einem Schadensmodell zu quantifizieren.

#### 3.3 Bisherige Risikostudien für Kraftwerke und Industrieanlagen

Die detailliertesten Studien dieser Art stammen aus der Kerntechnik (Gesellschaft für Reaktorsicherheit, 1981) und aus der chemischen Industrie (Hauptmanns et al., 1987). In diesen Studien werden vornehmlich Systeme, die aus aktiven Komponenten bestehen, analysiert. Das heißt, diese aktiven Bauteile weisen unterschiedliche, eindeutig definierte Betriebszustände auf, und man kann ihnen aus Meßergebnissen und Erfahrungen statistisch gut abgesicherte Einzelversagenswahrscheinlichkeiten zuordnen. Weiterhin ist für diese Untersuchungen charakteristisch, daß sie sich vornehmlich auf die Betriebsphase der betreffenden Anlage konzentrieren.

#### 3.4 Bisherige Risikostudien für Deponien und andere Bauwerke mit passiven Bauelementen

Vier Sicherheitsbetrachtungen, von Kavernen (Bilfinger & Berger, 1987), für Staudämme (Idel, 1988), für ungesicherte Felsböschungen im Rheinischen Schiefergebirge (Genske, 1988) sowie für eine geplante (nicht mehr aktuelle) Hochdeponie (Öko-Institut e. V., 1986), in denen Systeme mit überwiegend passiven Bauelementen betrachtet werden, verdeutlichen die Schwierigkeit, pas-

siven Bauelementen, wie sie auch bei Deponien generell vorherrschen, Ausfallwahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Diese passiven Bauelemente sind dadurch gekennzeichnet, daß sie einzig durch ihr Vorhandensein ihre Funktion erfüllen. Zum einen fehlten in den genannten Arbeiten für die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten für Ausfallursachen passiver Bauelemente Kenntnisse physikalischer Gesetzmäßigkeiten, d. h. welches sind die für die Funktion des Bauteils maßgeblichen Kenngrößen, wovon hängen sie ab, wann führen diese zu einem Versagen des Bauteils? Zum anderen mangelte es an Meßdaten von Materialkenngrößen, sodaß diese Meßdaten nur sehr unzureichend statistisch (auf Verteilungsart, Streuung und dergleichen) ausgewertet werden konnten. Beides – die physikalisch-deterministische Analyse und die stochastische Beschreibung der wesentlichen Parameter, ist aber nach Idel (1988) sowie nach Genske (1988) vonnöten, um zu hinreichend abgesicherten Einzelausfallwahrscheinlichkeiten zu kommen. Eine weitere Schwierigkeit bei den vier genannten Arbeiten war, daß sich nur sehr ungenügend Versagensgrenzen für die passiven Bauteile definieren ließen, oberhalb derer diese als ausgefallen betrachtet werden können.

Die EPA (1986) entwickelte ein Schema zur Festlegung von Grenzwerten für Konzentrationen bestimmter Schadstoffe im Deponiekörper. Dabei werden zunächst Grenzwerte für die entsprechenden Schadstoffe an den Schutzziele (z. B. in einem Trinkwassereinzugsgebiet) festgelegt. Daran anknüpfend, werden mittels eines Schadstofftransportmodells die zulässigen Emissionen aus der Abfallablagerung rückberechnet. Problematisch an dieser Methodik ist, daß maßgebliche standortspezifische Parameter für die Emissionsberechnungen, also z. B. Materialkennwerte, nur als Realisierung von Zufallszahlen angesehen werden, während die physikalischen Zusammenhänge, in denen die Kennwerte stehen, weitgehend unberücksichtigt bleiben.

Aufbauend auf diese Erfahrungen und auf Anregungen von Bamberg & Van Zyl (1986), von Eisenbeis et al. (1986) und von Van Ree & Loxham (1987) entwarf Demmert (1988) ein in sich geschlossenes risikanalytisches Modell für Deponien. Dazu gehörte zum einen

- die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit der Kontamination des Grundwassers bzw. des Untergrunds unter einer Deponie (Gesamtausfallwahrscheinlichkeit  $W$ ) und zu anderem
- der Vorschlag einer Methodik, wie man den zu erwartenden Schaden quantitativ bewertet (Schadenshöhe  $S$ ).

In einer qualitativen Ausfalleffektanalyse (modifiziert nach DIN 25448) für eine Deponie mit einem Aufbau nach TA Abfall (zu der Zeit in Vorbereitung) werden zunächst für jede Systemkomponente (z. B. Kunststoffdichtungsbahn der Basisabdichtung) a) mögliche Ursa-

chen für das Versagen und b) die Auswirkungen des Versagens auf das Gesamtsystem zusammengetragen.

Gleichzeitig macht Demmert Vorschläge für Versagensdefinitionen für die verschiedenen Deponieelemente. So wird für die mineralische Dichtung als Versagensgrenze eine Durchflußmenge pro Flächeneinheit empfohlen, die einem  $k$ -Wert von  $5 \cdot 10^{-10}$  m/s und einem Sickerwassereinstau von 30 cm, also einem dementsprechenden hydraulischen Gradienten  $i$ , entspricht (nach  $Q = k \cdot i \cdot A$ ). Für die Kunststoffdichtungsbahn schlägt Demmert eine Versagensgrenze von (Anteil Fläche an Fehlstellen) =  $1 \text{ cm}^2/1 \text{ m}^2 = 10^{-4}$  vor. Dieses ist – so auch Demmert – eine willkürliche Grenze und bedarf der Diskussion. Bei einer Kombinationdichtung verringert sich die oben angegebene Versagensgrenze für die alleinige mineralische Dichtschicht um den Faktor  $10^4$ . Die Versagensdefinitionen für die restlichen Deponiekomponenten entsprechen eher Totalausfällen. Das Versagen der Entwässerungsschicht ist so definiert, daß die Wasseraufstauhöhe über der Basisabdichtung die Schichtdicke des Entwässerungssystems übersteigt.

Aufbauend auf Ausfalleffektanalyse und die definierten Ausfallwahrscheinlichkeiten wird eine Fehlerbaumanalyse nach DIN 25424 für eine gesamte Deponie bestimmten Aufbaus (einschließlich Deponiekörper und Untergrund) vorgenommen – allerdings basierend auf fiktiven Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Ausfallursachen für jeweils ein Bauelement. Die Einzelwahrscheinlichkeiten der ca. 200 aufgeführten Versagensursachen für die Deponieelemente werden entsprechend ihrer logischen Verknüpfung (ODER- oder UND-Verknüpfung) "verrechnet", bis man ganz oben im Baum beim TOP-Ereignis ("Kontamination des Grundwassers und Untergrunds") angelangt ist und eine resultierende Wahrscheinlichkeit für dieses Ereignis erhält.

Zur Ermittlung der Schadensgröße schlägt Demmert einen idealisierten Bewertungskatalog vor, der sich an folgenden 4 Punkten orientiert:

- 1) Menge ausgetretenen Sickerwassers
- 2) Sickerwasserqualität
- 3) Beschaffenheit des Untergrunds
- 4) Lage der Deponie

Demmert hält die Angabe von Gesamtrisikowerten für Deponien nur im Vergleich für sinnvoll und hilfreich, etwa um verschiedene Dichtungssysteme in ihrem Risiko zu vergleichen. Im Zuge von "Sensitivitätsanalysen", d. h. dem vergleichenden Durchrechnen des Fehlerbaums mit verschiedenen Dichtungsaufbauten (Kombinationsdichtung mit 6 Lagen à 25 cm mineralischer Dichtung, einzelne mineralische Dichtung (6 Lagen à 25 cm) und doppelte mineralische Dichtung (12 Lagen à 25 cm) zum Vergleich) kam Demmert bei der Kombinationsdichtung

zu den signifikant geringsten Wahrscheinlichkeiten für das TOP-Ereignis.

Bogárdi et al. (1989 und 1990) greifen das Problem der Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten im Zusammenhang mit der mineralischen Deponieabdichtung auf. Am Beispiel des  $k$ -Wertes verdeutlichen sie, daß zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, daß  $k \leq k_{zulässig}$ , die Kenngröße  $k$  einer eingebauten mineralischen Dichtung sowohl aus Testfeld-Direktmessungen stochastisch beschrieben werden muß (Verteilungsart, Mittelwert, Streuung,  $k$ -Wert, der mit 95%iger Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird) als auch rechnerisch aufgrund von Messungen weiterer Bodenparameter in einem Testfeld bestimmt werden muß. Andernfalls sei der Wert der Versagenswahrscheinlichkeit nicht genügend fundiert für weitere risikoanalytische Betrachtungen. Des Weiteren betonen Bogárdi et al. die große Bedeutung der Qualitätssicherung. Diese sei erst der Garant dafür, daß die Materialeigenschaften der mineralischen Dichtung, worauf die Wahrscheinlichkeitswerte basieren, auch tatsächlich eingehalten werden.

### 3.5 Offene Fragen, Wissenslücken

Die vorgestellten Veröffentlichungen zeigen folgenden noch bestehenden Forschungsbedarf auf, um zu aussagekräftigeren Risikoanalysen für Deponien zu kommen (vgl. Demmert & Jessberger, 1990):

- 1) Gewinnung fundierten Datenmaterials zur Ermittlung der Funktionssicherheit der Deponiebauelemente (maßgebliche Materialkennwerte, deren Abhängigkeit von anderen Einflußgrößen, stochastische Beschreibung der maßgeblichen Materialkennwerte),
- 2) Entwicklung einer Methodik, um verschiedenartige Abdichtungssysteme in ihrer Funktionssicherheit vergleichend bewerten zu können (vgl. TA Abfall, 1991 sowie TA Abfall, Teil 2, 1993: Gleichwertigkeitsklausel),
- 3) Einbeziehung der Nachbetriebsphase in die Risikoanalyse,
- 4) Berücksichtigung von Alterungseffekten der Dichtungselemente,
- 5) Berücksichtigung der räumlichen Verteilung von Fehlstellen in den Abdichtungselementen,
- 6) Rechnung mit Stofftransportmodellen, die neben der Konvektion auch die Diffusion und die Sorption berücksichtigen.

Diesen Fragestellungen widmet sich verstärkt ein Forschungsvorhaben innerhalb des BMFT-Verbundvorhabens "Deponieabdichtungssysteme" (Jessberger et al., 1991; Jessberger et al., 1993).

## 4 Literatur

- Amann, P.; Guth, W.; Weidinger, G. (1990): Geotechnische Gesichtspunkte bei der Planung und Ausführung der Deponie Wirmsthal/Bad Kissingen. Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe. S. 85-95.
- Amann, P.; Krajewski, W.; Edelmann, L. (1991): Planung und Bau einer 60 m tiefen Deponie im Festgestein. 7. Internationaler Kongreß über Felsmechanik, DGEG, Aachen.
- August, H. (1986): Untersuchungen zur Wirksamkeit von Kombinationsdichtungen. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1986. Berlin: Erich Schmidt.
- August, H. (1987): Dichtigkeit von Dichtungsbahnen und Dichtungssystemen gegenüber Schadstoffen. In: 3. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süd-deutsches Kunststoffzentrum (SKZ).
- Balthaus, H.; Meseck, H. (1987): Geomechanisches Verhalten von Kunststoff-Dichtungsbahnen. Bautechnik 2, S. 58-63.
- BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin) (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten.
- Bamberg, S. A.; Van Zyl, D. (1986): Probabilistic Risk Analysis in Waste Disposal. In: Geotechnical & Geohydric Aspects of Waste Management. Fort Collins.
- Behnen, K.; Neuhaus, G. (1984): Grundkurs Stochastik. Eine integrierte Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und mathematische Statistik. Stuttgart: Teubner.
- Bilfinger & Berger (1987): LPG-Kaverne Punkt B.106400, Sicherheitsbetrachtungen. Mannheim.
- Birkner, K.-F. (1989): Kontrollierbare Deponie-Basisabdichtung. Umwelt 5, S. 246-247.
- Bogárdi, I.; Kelly, W. E.; Bárdossy, A. (1989): Reliability Model for Soil Liners – Initial Design. Journal of Geotechnical Engineering 115, Heft 5.
- Bogárdi, I.; Kelly, W. E.; Bárdossy, A. (1990): Reliability Model for Soil Liners – Postconstruction. Journal of Geotechnical Engineering 116, Heft 10.
- Bonaparte, R.; Gross, B. A. (1990): Field Behaviour of Double-Liner Systems. In: Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance. Geotechnical Special Publication (ASCE) 26, S. 52-83.

- Collins, H.-J. (1990): Erfahrungen bei der Vorbehandlung von Hausmüll (Sortieren, Zerkleinern, Verrottung). In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): *Neuzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990*. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 193-207.
- Collins, H.-J. (1992): Verformungsmessungen in Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 149-172.
- Darilek, G.; Parra, J. (1989): EPA Project Summary – The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners. *Journal of Hazardous Materials* 21, S. 177-187.
- Demmert, S. (1988): Risikoanalyse für Deponien. Diplomarbeit. Ruhr-Universität Bochum, Institut für Grundbau und Bodenmechanik (unveröffentlicht).
- Demmert, S.; Jessberger, H. L. (1990): Konzept zur risikoanalytischen Betrachtung von Abfalldeponien. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): *Neuzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990*. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 97-113.
- Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (Hrsg.) (1990): *Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Dewiere, L. (1985): Estimation and Detection of Leaks beneath Landfills. Centre d'Informatique Geologie, Ecole des Mines de Paris.
- DIN 25 424: Fehlerbaumanalyse.
- DIN 25 448: Ausfalleffektanalyse.
- Drescher, J. (1990): Standsicherheitsnachweise für Deponien. In: Rodatz, W.; Beckefeld, P.; Sehrbrock, U. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 19.-20.03.1990*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 31, S. 1-12.
- Drescher, J. (1992): Ermittlung von Basisdaten für die Stabilitäts- und Verformungsnachweise von Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 11-27.
- Düllmann, H.; Seppelfricke, C. (1992): Standsicherheit von Deponie-Abdichtungssystemen auf Böschungen. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 285-303.
- Egloffstein, T.; Burkhardt, G. (1993): Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien. VDI-Seminar "Deponiedichtungssysteme nach TA Abfall", Nr. 43-14-01. 15.-16.06.1993, München.
- Ehrig, H. J. (1980): Beitrag zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Mülldeponien. Veröffentlichungen des Institutes für Stadtbauwesen. Technische Universität Braunschweig, Heft 26, 2. erweiterte Auflage.
- Eisenbeis, J. J.; Montgomery, R.; Sanders, T. G. (1986): A Risk Assessment Methodology for Hazardous Waste Landfills. *Geotechnical & Geohydrological Aspects of Waste Management*. Fort Collins. S. 417-426.
- EPA (1986): *Superfund Health Assessment Manual*. Office of Solid Waste, Washington, D.C.
- Ernst, K. (1990): Feuchtemessung in der Deponieüberwachung. Firmenschrift SMG, Bad Bevensen.
- Fehlau, K.-P.; Stief, K. (1988): *Fortschritte der Deponietechnik 1988*. Berlin: Erich Schmidt.
- Firmenprospekt der Siemens AG, Bereich Energieerzeugung, Erlangen (1991): *LEOS Leckage-Erkennungs- und -Ortungssystem*.
- Foik, G.; Günther, K. (1989): Bemessungsgrundlagen für PE-HD-Bahnen auf Böschungen. In: 5. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).
- Gay, G. C. W. (1990): Scherparameter von Müll und Klärschlamm. In: Rodatz, W.; Beckefeld, P.; Sehrbrock, U. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 19.-20.03.1990*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 31, S. 43-54.
- Genke, D. D. (1988): Ansatz für ein probabilistisches Sicherheitskonzept ungesicherter Felsböschungen im Rheinischen Schiefergebirge. Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Bautechnik, Bericht Nr. 8, Wuppertal.
- Gertloff, K.-H. (1992): Setzungsmessungen bei Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 137-148.
- Gesellschaft für Reaktorsicherheit (1981): *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachbände 1-3*. Köln.
- Giroud, J. P.; Bonaparte, R. (1989a): Leakage through Liners Constructed with Geomembranes – Part I "Geomembrane Liners". *Geotextiles and Geomembranes* 8, Heft 2, S. 27-67.

- Giroud, J. P.; Bonaparte, R. (1889b): Leakage through Liners Constructed with Geomembranes – Part II "Composite Liners". *Geotextiles and Geomembranes* 8, Heft 2, S. 78-111.
- GORE & Co GmbH (1990): Firmenschrift der W.L. Gore & Co. GmbH.
- Günther, K. (1991): Einsatzkriterien für geneigte Kombinationsdichtungen. In: *Zeitgemäße Deponietechnik V. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*. Bielefeld: Erich Schmidt. S. 319-331.
- Haack, A. (1991): Erarbeitung von Vorschlägen zur Ausbildung von Deponieabdichtungen – theoretische und versuchstechnische Untersuchung. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): *BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569)*. 1. Arbeitstagung 23.-25.9.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S.191-198.
- Haack, A. (1993): Erarbeitung von Vorschlägen zur Ausbildung von Deponieabdichtungen – theoretische und versuchstechnische Untersuchung. Erste Versuchsergebnisse. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): *BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569)*. 2. Arbeitstagung 17.-19.03.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S.185-209.
- Hahn, H.; Becker, I.; Rödel, A. (1993): Entwicklung eines Verfahrens für die Dichtigkeitsüberwachung und Leckortung an Deponieabdichtungen. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): *BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569)*. 2. Arbeitstagung 17.-19.3.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 223-237.
- Hahn, H.; Rödel, A. (1991): Entwicklung eines Verfahrens zur Dichtheitsüberwachung und Leckortung an Deponieabdichtungen. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): *BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569)*. 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 209-216.
- Hartung, G. (1987): *Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. München, Wien: Oldenbourg.
- Hauptmanns, U.; Herttrich, M.; Werner, W. (1987): *Technische Risiken-Ermittlung und Beurteilung*. Berlin: Springer.
- Holzmann AG (1986): Patent DE 3604600 A1.
- Idel, K. H. (1988) (Koordinator): *Sicherheitsuntersuchungen auf probabilistischer Grundlage für Staudämme (4 Bände)*. Abschlußbericht. Studie im Auftrag des BMFT. Essen: Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau.
- Jessberger, H. L. (1990a): Stoffeigenschaften von Abfall im Hinblick auf Standsicherheitsuntersuchungen an Abfalldeponien. In: Jessberger (Hrsg.): *Neuzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990*. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 171-191.
- Jessberger, H. L. (1990b): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA-Empfehlungen. In: Jessberger (Hrsg.): *Neuzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990*. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 9-25.
- Jessberger, H. L.; Demmert, S.; Heibroock, G. (1991): Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für Deponieabdichtungssysteme, unter Berücksichtigung des Verhaltens der abgelagerten Stoffe in der Deponie und des Schadstofftransportes in Abdichtung und Untergrund. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): *BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569)*. 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S.181-189.
- Jessberger, H. L.; Demmert, S.; Heibroock, G. (1993): Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für Deponieabdichtungssysteme, unter Berücksichtigung des Verhaltens der abgelagerten Stoffe in der Deponie und des Schadstofftransportes in Abdichtung und Untergrund. In: August, H.; Holzlöhner, U.; Meggyes, T.; Brune, M. (Hrsg.): *BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569)*. 2. Arbeitstagung 17.-19.03.1993. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 211-221.
- Kézdi, A. (1964): *Bodenmechanik, Bd 1 - 3*. Budapest, Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Knipschild, F. W. (1985): *Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen*. Beiheft zu Müll und Abfall. Nr. 22. Berlin: Schmidt.
- Kölsch, F. (1992): Überlegungen zum Tragverhalten faserhaltiger Abfälle in Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau*. Fachseminar 30.-31.3.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 69-80.
- Kölsch, F.; Collins, H.-J. (1992): *Kontinuierliche Höhenvermessung von nicht begehbaren Rohren*. Untersuchungen auf Deponien und in Abwasserleitungen. *Bauingenieur* 67, Heft 6, S. 303-305.
- Krajewski, W.; Großmann (1992): *Planung und Überwachung der Steilwandabdichtung Wirmsthal*. In: Prühs, H. (Hrsg.): *Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien – 1992 – 8. Nürnberger Deponieseminar*. Nürnberg: Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt Bayern, S. 343-359.

Krubasik, K. (1992): Wandabdichtungssystem für Deponien in Steinbrüchen. In: Prühs, H. (Hrsg.): Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien – 1992 – 8. Nürnberger Deponieseminar. Nürnberg: Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt Bayern, S. 363-376.

Kruse, Th. (1989): Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 29, S. 1-147.

Kruse, Th.; Voigt, Th. (1990): Reibungsverhalten von Kunststoffdichtungsbahnen. In: Rodatz, W.; Beckefeld, P.; Sehrbrock, U. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 19.-20.3.1990. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 31, S. 13-29.

Landesamt für Wasser und Abfall NRW (1985): Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen. Düsseldorf.

Meggyes, T. (1993): Über die Deponietechnik in Großbritannien. Müll und Abfall 3, S. 168-177.

Meseck, H. (1987): Geomechanisches Verhalten von Kunststoffdichtungsbahnen. In: 3. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).

Mitchell, J. K.; Mitchell, R. A. (1991): Stability of Landfills. In: Conferenze di Geotechnica di Torino, XV Ciclo, 19.-21.11.1991, Torino.

Mitchell, J. K.; Seed, R. B.; Seed, H. B. (1990): Stability Considerations in the Design and Construction of Lined Waste Repositories. In: Landva, A.; Knowles, G.D. (Hrsg.): ASTM STP 1070, Geotechnics of Waste Landfills, Theory and Practice. American Society for Testing and Materials, S. 209-224.

Möller, H. (1990): Abdichtungen von Steilhängen. In: Rodatz, W.; Beckefeld, P.; Sehrbrock, U. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 19.-20.03.1990. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 31, S. 31-41.

Öko-Institut e. V. (1986): Risikountersuchungen im Rahmen der Planung einer Hochdeponie für Sonderabfälle in Hessen (2. Teil). Studie im Auftrag der Hessischen Industriemüll GmbH., Darmstadt.

Oltmanns, W.; Wyrwa, P. (1992): Inklinometermessungen bei Deponien – Ein Erfahrungsbericht. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 173-195.

Peters, W.; Schultz, D. W.; Duff, B. M. (1982): Electrical Resistivity Techniques for Locating Liner Leaks. Nat. Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, S. 250-260.

Pierschke, K. J.; Kuntsche, K. (1990): Standsicherheit von mineralischen Abdichtungen auf steilen Böschungen. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): Neuzzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 161-170.

Ramke, H.-G. (1992): Druck-Setzungs-Verhalten biologisch vorbehandelten Hausmülls. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 81-118.

Ramke, H.-G.; Brune, M. (1990): Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit von Entwässerungsschichten in Deponiebasisabdichtungssystemen. Ergebnisse des F+E-Vorhabens 145 0457 3 der Technischen Universität Braunschweig. Der Bundesminister für Forschung und Technologie. Projektträger: Umweltbundesamt.

Rettenberger, G. (1989): Lecküberwachung an einer Oberflächenabdichtung. Abfallwirtschaft 1, Heft 10, S. 62-66.

Rettenberger, G.; Urban-Kiss, S. (1990): Oberflächenabdichtungssysteme mit Kunststoffen – Versuche an der Sonderabfalldeponie Gerolsheim. In: 6. Fachtagung Die sichere Deponie. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).

Rudat, D. (1988): Zweischalige Deponiesysteme. Wasserwirtschaft 78, Heft 10, S. 414-418.

Ruppert, F.-R. (1992): Standsicherheiten und konstruktive Ausführung von Steilwandabdichtungen. Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig.

Saathoff, F. (1990): Zum Scherverhalten von Geokunststoffen. Bauingenieur 65, S. 195-207.

Saathoff, F.; Bassen, R.; Kohlhasse, S. (1986): Anwendungsorientierte Untersuchungen von Deponie-Dichtungssystemen. Mitteilungen des FRANZIUS-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 62.

Salomo, K. P.; Krause, R. E. (1989): Das Verhalten profilierter Kunststoffdichtungsbahnen in geomechanischer, chemischer und physikalischer Hinsicht. Müll und Abfall 8, S. 405-415.

Sasse, T. (1992): Neubau und Sanierung von Schächten in Deponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.):



- Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 197-224.
- Schmidt, C. (1989): Möglichkeiten zur Leckfeststellung und -ortung am Beispiel der Sondermülldeponie Gerolsheim. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Geographisches Institut (unveröffentlicht).
- Schmucker, K. J. (1984): Fuzzy Sets, Natural Language and Risk Analysis. Washington: Computer Science Press.
- Spillmann, P. (1990): Einfluß der Lastumlagerung von Müll auf Klärschlamm auf die Standsicherheit. In: Rodatz, W.; Beckefeld, P.; Sehrbrock, U. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 19.-20.03.1990. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 31, S. 55-72.
- Spillmann, P. (1992): Auswirkungen von Wasser- und Gasanfall auf die Standsicherheit von Restmülldeponien. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 119-135.
- Stammler, M.; Bol, J. (1986): Studie zur vergleichenden Bewertung von Überwachungssystemen für Deponien. Forschungsbericht T 86-134. Der Bundesminister für Forschung und Technologie.
- Steffen, H. (1985): Report on Two-Dimensional Strain Behaviour of Geomembranes with and without Friction. International Conference on Geomembranes 1985, Denver, Colorado, USA.
- Steinkamp, S.; Reuter, E.; Negelmann (1992): Meß- und Untersuchungsprogramm zur Standsicherheit der Zentraldeponie Hannover. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.03.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S. 29-67.
- Stief, K. (1985) (Hrsg.): Deponiebasisabdichtung. Müll und Abfall, Beiheft 15.
- Stief, K. (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll und Abfall 1, S. 15-20.
- Stief, K.; Engelmann, B. (1992): Die Bedeutung der Stabilität einer Deponie in der TA Abfall. In: Hemker, O.; Voigt, Th. (Hrsg.): Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar 30.-31.3.1992. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 37, S.1-9.
- TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.
- TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. (1961): Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Springer. Berlin.
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (1987) (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 790-846.
- Van Ree, F.; Loxham, M. (1987): Risikoanalyse als essentielle Grundlage für den rationellen Entwurf von Abdichtungsmaßnahmen. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): 3. Bochumer Altlastenseminar.
- Waller, M. J.; Davis, J. L. (1984): Assessment of Innovative Techniques to Detect Waste Impoundment Liner Failings. EPA-Report: EPA-600/2-84-041.
- Waller, M. J.; Singh, R. (1983): Leak Detection Techniques and Repairability Options for Lined Waste Impoundment Sites. Nat. Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites. S. 147-153.
- Weigl, M. (1987): Patent DE 3716846 A1.
- Weigl, M. (1988): Self-Potential Surveys on Waste Dumps, Theory und Practice. Firmenschrift der Prakla-Seismos AG, Hannover.
- Wiemer, K. (1982): Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Zimmermann, H. J. (1985): Fuzzy Set Theory and its Applications. Boston, Dordrecht, Lancaster: Klumer-Nijhoft Publishing.



## N Dichtwände (T. Meggyes)

1	Einführung	153
2	Bauarten	154
2.1	Einphasen-Schlitzwand	154
2.2	Zweiphasen-Schlitzwand	154
2.3	Kombinierte Dichtwand	156
2.4	Dichtwandkammersysteme	156
2.5	Bohrpfahlwand und Düsenstrahlwand	156
2.6	Schmalwand	156
2.7	Stahlspundwand	157
2.8	Gerammte Schlitzwand (nach Jessberger)	158
2.9	Injektionswand und Gefrierwand (nach Jessberger)	158
3	Baustoffe, Bauteile	159
3.1	Dichtwandmaterialien für Schlitzwände	159
3.2	Gasdränagen	160
4	Eigenschaften	160
4.1	Physikochemische Eigenschaften der Dichtwandsuspensionen	160
4.2	Mechanische Eigenschaften und Durchlässigkeit von Dichtwandmassen	162
4.3	Sedimentation, Filtration und Penetration von Dichtungssuspensionen	164
4.4	Beständigkeit von Dichtwänden	164
5	Qualitätsprüfung von Dichtwänden und Bohrpfehlen	166
6	Kosten	166
7	Offene Fragen, Wissenslücken	167
8	Literatur	167

### 1 Einführung

Dichtwände sind unterirdische Bauwerke geringer Dicke, die nach verschiedenen bautechnischen Verfahren erstellt werden. Sie entstehen:

- durch Abteufen schlitzförmiger Hohlräume unter Verwendung von stützenden Flüssigkeiten, die sich entweder selbst verfestigen und dabei die sogenannte Schlitzwand bilden (Einphasenschlitzwand), oder die nach dem Abteufen des Schlitzes durch mehr oder minder erhärtende Dichtwandbaustoffe ersetzt werden (Zweiphasenschlitzwand);
- durch Freirütteln/-rammen eines dünnen schmalen Raumes mit einem Werkzeug und Verfüllen des betreffenden Raumes beim Wiederziehen des Werkzeuges mittels dicker Suspension (wie bei der Schmalwand);

– durch Einrammen von Fertigteilen (bei Spundwänden, z. B. aus Stahl);

– durch Herstellen sich überschneidender Bohrpfehle (mit Hilfe von Bohrrohren oder unter Verwendung von Dickspülung als Stützflüssigkeit zum Offenhalten des Bohrloches bis zum Ausbetonieren, wodurch Bohrpfehlwände entstehen).

Die Idee der Anwendung einer Stützflüssigkeit stammt aus der Rotary-Tiefbohrtechnik (Bohrflüssigkeit), wobei sie bis auf Tiefen von mehreren tausend Metern – allerdings ohne Anspruch auf Aushärtung – verwendet wird.

Die Dichtwände sollen eine horizontale Schadstoffausbreitung im Untergrund verhindern (Jessberger & Geil, 1991; Jessberger, 1992; EA-GDA, 1993)

- bei einer Grundwasserströmung durch den Kontaminationskörper
- bei Vorliegen mobilisierbarer flüssiger Schadstoffe oberhalb des Grundwasserspiegels
- bei einer Migration gasförmiger Schadstoffe in der ungesättigten Bodenzone
- bei Schichtwasserzutritt zum Kontaminationskörper
- zur Begrenzung hydraulischer Maßnahmen
- zur Abschottung eines Reaktionsraumes für In-situ-Dekontamination.

Dichtwände zur Abdichtung des Untergrundes kamen um 1950 mit der Entwicklung der Schlitzbauweise und

des Schmalwandverfahrens auf (Arz, 1988). Sie hatten ihre ursprüngliche Anwendung im Stauanlagen- und Dammbau, wo sie zur Abdichtung der stärker durchlässigen Schichten eingesetzt wurden. Seit Anfang der siebziger Jahre verwendet man sie auch zur seitlichen Einkapselung von Altlasten. Um den besonderen Anforderungen im Bereich des Deponiebaus und der Altlastensanierung zu genügen, wurden "Kombinationsdichtwände" mit eingestellten Spundwänden oder eingehängten Kunststoffbahnen entwickelt.

Eine systematische Übersicht der Dichtwandssysteme ist in *Tabelle 1* (Jessberger, 1992; EA-GDA, 1993) zusammengestellt.

## 2 Bauarten

### 2.1 Einphasen-Schlitzwand

Bei der Herstellung von Einphasenschlitzwänden wird der Boden in Dicken von 0,4 bis 1 m lamellenweise mit Schlitzgreifern oder Schlitzwandfräsen ausgehoben. In den EA-GDA (1993) wird eine Mindestdicke von 0,6 m empfohlen. Zur Stützung des offenen Schlitzes wird eine Dichtsuspension verwandt, die nach Aushärtung die Dichtwand bildet. Die Stützflüssigkeit ist also gleichzeitig die spätere Wandmasse. Bei größeren Tiefen (über 20 m) ist es zweckmäßig, die Vertikalität der Dichtwand mit Inklinometersonden zu überprüfen (Stroh & Sasse, 1987). Um eine Dichtwand herzustellen, werden mehrere Lamellen nach dem Pilgerschrittverfahren aneinandergereiht. Zunächst wird der Boden für die Lamellen 1, 3, 5 usw., d. h. für die Primärelemente, ausgehoben, und die so entstandenen Hohlräume werden gleichzeitig mit der Dichtwandmasse aufgefüllt. Mit einem zeitlichen Nachlauf von 36 bis 48 h erfolgt der Aushub der Sekundärelemente 2, 4, 6 usw. In der Zwischenzeit findet das Ansteifen der Primärelemente statt. Sobald sich die zur endgültigen Dichtmasse erhärtete Stützflüssigkeit in stichfestem Zustand befindet, kann der Aushub der Sekundärlamellen erfolgen, wobei der Greifer in die noch weiche Masse der Primärlamellen mit einer Überschneidung von 30 bis 60 cm einschneidet. Da der Härtungsvorgang der Dichtmasse in den Primärlamellen noch nicht abgeschlossen ist, ergibt sich ein guter Verbund mit der Dichtmasse der Sekundärlamellen. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber dem Zweimassenverfahren, bei dem durch die Verwendung von Abschalrohren ausgeprägte Fugen entstehen. Im Einphasenverfahren entfällt der Austausch und die Entsorgung der Stützflüssigkeit, so können auch keine Fehlstellen auftreten.

Die Einphasenwand bietet bei gleichem Durchlässigkeitsbeiwert größere Sicherheit gegenüber den Schmalwänden aufgrund größerer Wanddicke und des Wegfalls der Fugen. Der Bodenaufschluß beim Aushub und das sichere Einbinden in eine undurchlässige Schicht sind weitere Vorteile. Das Einphasenverfahren wird in Deutschland bevorzugt verwendet.

### 2.2 Zweiphasen-Schlitzwand

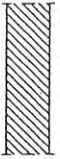





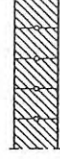



Die Zweiphasen-Schlitzwand wird in zwei Arbeitsgängen hergestellt. Zunächst wird der Boden durch das Aushubwerkzeug ausgehoben, unter Stützung der Schlitzwandungen mittels einer reinen Bentonitsuspension. Im zweiten Arbeitsgang wird die Stützflüssigkeit im Kontraktorverfahren durch die Dichtwandmasse ersetzt. Zur Begrenzung der einzelnen Lamellen werden stirnseitig Abschalrohre verwendet.

Beim Ziehen von langen Abschalrohren und beim Verdrängen der Stützflüssigkeit durch die Dichtmasse können Probleme bzw. Mängel auftreten. Wird die Stützflüssigkeit nicht vollkommen verdrängt, verbleiben Fehlstellen im Fugenbereich in der sonst recht dichten Wand. Wichtig ist hier, daß die Dichte der Dichtmasse die der Stützflüssigkeit um mindestens  $500 \text{ kg/m}^3$  übersteigt, damit eine effektive Verdrängung stattfindet.

In der Frästechnik entfallen die Abschalrohre (Nussbaumer, 1990). Die Schlitzwandfräse wurde Anfang der 80er Jahre entwickelt, um sehr tiefe Schlitzwände herzustellen und harte Bodenschichten wirtschaftlich zu durchfahren. Die mit der Schlitzwandfräse erzielbaren Vorteile sind:

- hohe Genauigkeit: die Abweichung von der Sollachse beträgt ca. 1 %
- bessere Dichtigkeit durch einen verbesserten Fugenschluß, da die Fräse die hergestellten Primärlamellen anfräst, mit denen sich die Sekundärlamellen dann gut verzahnen.

Unter Anwendung einer elektrohydraulisch angetriebenen Doppelschneckenfräse und gerichteter Sprengungen wurde über Dichtwände bis 84 m Tiefe und 10,5 km Länge berichtet (Mielcarek & Fischer, 1986; VE Braunkohlenkombinat Senftenberg, 1986). Die Erdstoffförderung erfolgte nach dem Air-Lift-Prinzip, die erstellten Dichtwände dienten zur Abriegelung von Grundwasserzuflüssen zu Braunkohlentagebauen. Nach

Prinzip	Dichtwand-system	Grundriß	Böden	Material	Tiefe (m)	Dicke (m)	Material k-Wert (m/s)	Erfahrungen
Aushub des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Schlitzwand Einphasen-Verfahren		begrenzt anwendbar bei Torf/Huminsäuren	Bentonit-Zement-Suspensionen mit/ohne Füllstoff	ca. 35	0,4-1,5	$\leq 1 \times 10^{-10}$	Altdeponie seit 15 Jahren
	Schlitzwand Zweiphasen-Verfahren		wie vor	Bentonit-Suspensionen, Erdbeton	> 50	0,4 - 1,5	$< 5 \times 10^{-10}$	Altdeponie 7 Jahre
	Schlitzwand Kombinationsdichtung		wie vor im Einphasen-/Zweiphasen-Verfahren	Bentonit-Zement-Suspensionen, Kunststoff-Dichtungsbahnen (z.B. PEHD)	ca. 30	> 0,6	Dichtwandmasse $< 5 \times 10^{-10}$	Altdeponie 7 Jahre
	überschnittene Bohrfahrlwand		keine Einschränkungen bei verrohrtem Bohrvorfahren	Erdbeton, Beton	ca. 20	0,6-0,8	$< 5 \times 10^{-10}$	Deponie 1 Jahr
Verdrängung des anstehenden Bodens und Einbau eines Abdichtungsmaterials	Schmalwand		rammfähige bzw. rüttelfähige	Bentonit-Zement-Suspensionen mit Füllstoff	18-23	0,05-0,20	$\leq 1 \times 10^{-9}$	Deponie 5 Jahre
	Spundwand			Stahl	15-20	0,01-0,02	-	Altlast 5 Jahre
	gerammte Schlitzwand			Erdbeton, Beton	15-20	0,01-0,02	$\leq 1 \times 10^{-9}$	Altlast 6 Jahre
Verringerung der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens	Injektionswand		in injizierbaren	Zement-, Ton-Zement-Suspensionen, Silikat-Gele	> 100	einstellbar	$\leq 1 \times 10^{-9}$	Wasser-/Grundbau
	Düsenstrahlwand (HDI) 1)		auch in sehr feinkörnigen	Bentonit-Zement-Suspensionen mit/ohne Füllstoff	> 100	> 0,8	$\leq 1 \times 10^{-10}$	Wasser-/Grundbau
	Gefrierwand			flüssiger Stickstoff, Gefrieranlage	> 100	> 0,8-1,0	-	Spezialtiefbau u. Schachtbau

1) mit teilweiser Verdrängung des anstehenden Bodens

Tabelle 1 Dichtwandssysteme und Erfahrungswerte (Jessberger, 1992)

Mielcarek & Fischer (1986) sowie Seitz & Horn (1990) sind 100 m Tiefe mit der Schlitzwandfräse erreichbar.

## 2.3 Kombinierte Dichtwand

Im Ein- und Zeiphasenverfahren können Elemente zur Erhöhung der Festigkeit und/oder Verbesserung der Dichteigenschaften in die Dichtwand eingebaut werden. Die auf diese Weise hergestellten Dichtwände nennt man kombinierte Dichtwände. Als Beispiele können hier Spundwände (Jessberger & Geil, 1992) und Kunststoffbahnen (Boyes, 1986) sowie Glaswände genannt werden. Der Einbau dieser Elemente erfolgt unmittelbar nach Fertigstellung der Dichtwand in die noch frische Bentonit-Zement-Suspension. Für das Absenken von Kunststoffbahnen sind spezielle Einbauvorrichtungen erforderlich. Um eine optimale Dichtwirkung zu erreichen, werden die Dichtungsbahnen über spezielle Schloßkonstruktionen, sog. Schlösser, miteinander verbunden (Meseck, 1987a; Stroh & Sasse, 1987). Die Schlösser können nach Erhärten der Dichtwandmasse nachträglich verschweißt und kontrolliert werden (Meseck, 1987a; Nussbaumer, 1987). Gläser und Beitinger (1987) berichten über Kunststoffelemente, die aus zwei Kunststoffbahnen mit dazwischen liegendem Dränkörper bestehen und die Kontrolle einer eventuellen Permeation durch die erste Dichtungsbahn ermöglichen. Glaswände in kombinierten Dichtwänden gewährleisten eine hohe Dichtigkeit, ihr Nachteil sind die begrenzte Länge und das Fugenproblem. Spundwände werden auch mit Bohrpfählen im Schloßbereich kombiniert (Jessberger & Geil, 1992; Düllmann et al., 1993).

## 2.4 Dichtwandkammersysteme

Sehr tief liegende undurchlässige Schichten sind mit Dichtwänden in vielen Fällen nur sehr aufwendig zu erreichen. Die Deponie Georgswerder in Hamburg und die Deponie Rautenweg in Wien sind zwei bekannte Beispiele: Die geologische Sperrschicht steht bei beiden Deponien in 70 bis 100 m Tiefe an. Zur Umschließung der Deponie Rautenweg wurde erstmals ein Dichtwandkammersystem angewandt und zusätzlich mit hydraulischen Maßnahmen kombiniert (Arz & Weber 1987; Brandl, 1989). Hier wurden zwei im Abstand von 8 m parallel verlaufende Dichtwände alle 50 bis 70 m durch Dichtwandquerschotte verbunden, wodurch Dichtwandkammern mit einer Grundfläche von 400 bis 600 m<sup>2</sup> entstanden. In jeder Kammer wurde ein Brunnen abgeteuft, der durch Pumpen einen Wasserspiegel um 0,5 m tiefer als außerhalb der Deponie gewährleistet. Innerhalb der Deponie wird der Wasserspiegel um weitere 0,2 m niedriger gehalten als in den Kammern. Das Dichtwandkammersystem bietet folgende Vorteile:

- Nach Fertigstellung der Einkapselung kann jede Kammer durch eine Probeabsenkung auf Dichtigkeit geprüft werden.
- Die Dichtwände müssen nicht bis in die geologische Sperrschicht eingebunden werden. Es reicht, sie bis

zu einer Bodenschicht niedriger Durchlässigkeit (z. B.  $k = 5 \cdot 10^{-6}$  m/s) abzuteufen, die eine kostenoptimierte Aufrechterhaltung des Wasserspiegels ermöglicht. Der Ersparnis beim Bau der Dichtwände stehen die Pumpenkosten gegenüber.

- Nicht bis zur Sperrschicht abgeteufte Dichtwände wurden auch zur Einkapselung von auf der Grundwasserfläche schwebenden Erdölprodukten verwendet, welche das Grundwasser kontaminierten (Spooner et al., 1985).
- Undichtigkeiten können an einer Zunahme der Wasserzufuhr zum Brunnen rechtzeitig erkannt werden. Sowohl durch Schließung der Leckage als auch durch Erhöhung der gepumpten Wassermenge kann eine Verunreinigung der Umgebung verhindert werden.

Doppelwandige Dichtwände aus Spundwandprofilen (Arndts, 1993) stellen eine spezielle Art Dichtwandkammersystem mit ähnlichen Vorteilen dar.

## 2.5 Bohrpfahlwand und Düsenstrahlwand

Bohrpfahlwände werden aus überschneidenden Ortspfählen – mit oder ohne Verrohrung – hergestellt. Zunächst werden die Primärpfähle (1, 3, 5 usw.) abgeteuft, anschließend folgt die Herstellung der Sekundärpfähle (2, 4, 6 usw.). Durch die Aufbohrung der Primärpfähle bzw. das Ineinandergreifen der Nachbarpfähle wird die Dichtigkeit der Bohrpfahlwand gewährleistet. Die große Anzahl der Verbindungsstellen birgt jedoch die Gefahr, daß undichte Stellen auftreten (Weber, 1990; Jessberger, 1992).

Dichtwände können auch aus überschneidenden Soilcrete-Säulen hergestellt werden (Tóth, 1989; Kutzner, 1991; Jessberger, 1992). Häufig verwendete Bezeichnungen für das Verfahren sind Düsenstrahlinjektion, Jet grouting, Rodinjet und HDI (Hochdruckinjektion). Zur Herstellung der Säulen wird das Bohrloch nach dem Drehbohrverfahren mit Dickspülung abgeteuft. Nach Erreichen der Endtiefe wird der Spülstrom unter gleichzeitiger Erhöhung des Pumpendruckes auf die Düsen umgestellt. Das Einfachgestänge wird rotierend gezogen und dabei der Boden durch die Zement- bzw. Ton-Zement-Suspension, die gleichzeitig als Schneid- und Füllmedium dient, aufgefärdert, erodiert und verfüllt. So entstehen Säulen aus mit Zementsuspension vermischtem Boden, die in geeigneter Anordnung eine Schlitzwand bilden. Die wichtigsten technischen Daten sind: Säulendurchmesser 0,5–1,0 m, Pumpendruck 2–100 MPa, Durchlässigkeit  $3 \cdot 10^{-9}$  m/s, Druckfestigkeit nach 28 Tagen  $> 300$  kN/m<sup>2</sup>.

## 2.6 Schmalwand

Anfangs wurden Spundbohlen mit Schloßverbindungen in Staffeln von vier bis acht Einheiten eingerammt und unter Einpressen einer Dichtwandmischung aus Ton, Wasser und Zement wieder gezogen. Später ging man zu

einzelnen, schwereren Stahlprofilen über, was durch den Einsatz von stärkeren Rüttelbären ermöglicht wurde. Heute bestehen die Bohlen aus Breitflanschträgern IPB 500 bis IPB 1000, die am unteren Ende (Bohlenfuß) eine besondere Fußausbildung mit Einpreßdüsen haben. Ergänzt wird der Bohlenfuß noch durch ein Schwert, das als Führung der Bohle dient, wenn diese mit einem Überlappungsmaß (Übergriff) in die vorher hergestellte Lamelle (Stich) abtaucht und eine Verlängerung des Bohlensteges bildet (Arz, 1988).

Das am stärksten beanspruchte Element des Schmalwandgerätes ist die Bohlenschneide. Arwanitakis & Polak (1984) berichten über die Aufpanzerung der Bohlenschneide durch Fülldrahtschweißen, die eine Leistungserhöhung um bis zu 30 % ermöglichte.

Gängige Tiefen von Schmalwänden sind 15 bis 20 m. Die Dicke hängt zunächst von den Abmessungen des Bohlenschuhs ab. Dieser wird meistens in Stärken von 60 bis 80 mm ausgebildet. Stärkere Schuhe leisten beim Einrütteln größeren Widerstand, und beim Rückziehen entstehen höhere Zugkräfte, daher kommen größere Wanddicken selten vor. Die Wandstärke der Schmalwand wird neben der Nennstärke des Bohlenschuhs auch von der Art der Bodenschicht und dem Einpreßdruck der Dichtungsmasse bestimmt.

Bei grobkörnigen Bodenschichten (Sande, Kiese) wird durch die Vibration des Rüttlers eine zusätzliche Verdichtung in der Umgebung der Schmalwand und damit auch eine Verringerung der Durchlässigkeit erreicht. Darüber hinaus kann ein Penetrieren der Suspension in die Porenräume des Bodens stattfinden, so daß die tatsächliche Dicke der Wand in lockeren Böden sogar das Doppelte der Nennstärke erreichen kann.

Rüttelschmalwände sind von allen Dichtwandssystemen die preiswertesten. Mit diesem Verfahren sind Leistungen von 400 bis 1000 m<sup>2</sup> Wandfläche je Schicht möglich. Um die Lückenlosigkeit der Rüttelschmalwände zu gewährleisten, ist eine sehr genaue Führung der Bohle unter ständiger Kontrolle mit präzisen Meßinstrumenten erforderlich. Die zugelassene Toleranz beträgt z. B. bei einer Dicke von 10 cm und einer Tiefe von 20 m weniger als 0,2 %.

Bei der Einkapselung von Altlasten werden daher oft doppelte Dichtwände verwendet, die größere Sicherheit geben. Der Preisvorteil der Rüttelschmalwände ist so erheblich, daß eine doppelte Wand in der Regel immer noch preisgünstiger ist als eine einfache von anderer Bauart (die auch Lücken haben kann). Das Dichtwandkammersystem stellt eine weiterentwickelte Form der doppelten Dichtschmalwände dar.

Über den Einsatz von Asphalt in Dichtschmalwänden wurde auch berichtet (Haug & Kozicki, 1982). Das Einpressen eines Gemisches aus Asphalt emulsion und Sand soll eine höchst inerte Dichtmasse geliefert haben.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte lagen zwischen  $10^{-10}$  und  $10^{-11}$  m/s, die von Haug & Kozicki festgestellte chemische Langzeitstabilität ist jedoch nicht durch Zahlenwerte untermauert.

## 2.7 Stahlspundwand

Die Stahlspundwände bestehen aus Spundbohlen, die einzeln oder gruppenweise in den Boden eingerammt oder eingerüttelt werden und durch Verbindungsglieder, sog. Schlösser, miteinander verbunden sind (Roth, 1988; Weber, 1990; Jessberger & Geil, 1992). Vorteile der Stahlspundwände sind die einfache, umweltschonende Bauart, kurze Bauzeit, Lastaufnahmefähigkeit und der Wegfall des Aushubs kontaminierter Böden wegen der verdrängenden Bauweise. Die Schlösser sind jedoch aus herstellungstechnischen Gründen nicht vollkommen wasserdicht. Diese Undichtigkeit kann sich durch Einspülen von Feinkörnern aus dem Boden mit der Zeit in gewissem Grad verringern. Zur besseren Dichtigkeit der Schlösser werden pastöse Dichtungen auf Bitumenbasis und dauerelastische Polyurethane empfohlen (Roth, 1990). Dabei wird jedoch vom Einsatz von Vibrationsgeräten abgeraten, da sie zum Abrieb der Schloßdichtung führen können. An der Weiterentwicklung und an Kontrollmöglichkeiten der Schlösser wird z. Z. gearbeitet. Eine vielversprechende Entwicklung stellt die Dichtungsmethode der Fädelschlösser dar, die nach dem Rammvorgang vollzogen wird (Arndts, 1993).

Im Vergleich zur Schlitzwand ist der Anwendungsbereich der Stahlspundwand kleiner einzuschätzen, für mögliche Anwendungen ist jedoch die Korrosionsbeständigkeit der Spundbohlen gegen Sickerwasser zu klären. Nach Hein (1990) folgt die Abrostung von Stahlspundwänden in Wasser einer Potenzfunktion. Die maximale Abrostung läßt sich für Süß- und Brackwasser gut abschätzen, während im Meerwasser die Werte ortsabhängig stark schwanken. Jessberger & Geil, (1992) untersuchten die Korrosion der Stahl St Sp 37 durch Lagerung in Prüfflüssigkeiten (Landesamt für Wasser und Abfall NRW, 1985) und in Sickerwässern. Die Korrosionsstärke war sehr gering in

- anorganischen Mineralsäuren und
- Hausmüllsickerwasser.

Eine größere Korrosion wurde festgestellt bei der Lagerung in

- organischer Säure und
- Sickerwasser einer Altlast.

Die Schutzwirkung verschiedener Kunststoffbeschichtungen und des kathodischen Korrosionsschutzes muß untersucht werden (Wienberg, 1992). Hierzu wird u. a. auf die Erfahrungen von mehreren Jahrzehnten mit dem Korrosionsschutz im Hafenausbau (Rust, 1992) und in der Öl- und Gasindustrie (erdverlegte Rohrleitungen) verwie-

sen. Die Langzeitbeständigkeit von Dichtungen auf Bitumenbasis und Polyurethanen ist ebenfalls zu klären.

## 2.8 Gerammte Schlitzwand

(nach Jessberger)

Bei der gerammten Schlitzwand wird der Boden durch Einrammen eines unten geschlossenen Hohlkastens verdrängt. Der Hohlkasten ist unten mit einer lösbaren Stahlplatte wasserdicht verschlossen. Jedes Ramm-element besteht aus zusammengesetzten Kasten-Spund-bohlen und wird auf die erforderliche Tiefe gerammt. Daran anschließend wird das nächste Element gerammt, wobei die einzelnen Elemente in Schlösser geführt werden. So werden 5 Elemente gerammt. Nach dem Rammen des 3. und 4. Elementes wird das 1. Element mit Dichtwandmasse aus Erdbeton gefüllt. Dann wird das Element gezogen, wobei sich unter dem Gewicht der Füllmasse die Sohlplatte löst. Das gezogene Profil wird mit einer neuen Sohlplatte versehen und wieder gerammt. Beim Ziehen wird der eingebrachte Erdbeton verdichtet. Zwischen dem frischen Erdbeton und dem unter der Ramme bestehenden Profil befinden sich immer mehrere gerammte, aber nicht gefüllte Elemente. So findet bei diesem Verfahren keine Vermischung der Dichtwandmasse mit dem umgebenden kontaminierten Boden statt (Jessberger, 1992; EA-GDA, 1993).

## 2.9 Injektionswand und Gefrierwand

(nach Jessberger)

Bei der Injektionswand werden die Poren bzw. Klüfte des Untergrundes mit einem Dichtungsmaterial gefüllt und dadurch die Durchlässigkeit des Bodens verringert. Injiziert werden Zementsuspensionen, Kunstharze oder Injektionsmittel auf Wasserglasbasis, deren Grundwas-serverträglichkeit nachzuweisen ist.

Häufig werden Injektionen mit Hilfe sogenannter Manschettenrohre ausgeführt. Manschettenrohre sind Kunststoffrohre mit abdichtenden Gummimanschetten über perforierten Abschnitten. Sie werden in das verrohrte Injektionsloch eingehängt. Beim Ziehen der Verrohrung wird der Mantelraum zwischen Manschettenrohr und Bohrlochwand mit einer Zementsuspension gefüllt. Nach dem Erhärten dieser Mischung wird das eigentliche Injektionsgut eingepreßt, wobei sich durch Anhebung der Gummimanschetten Risse in der Mantel-mischung bilden, durch die das Injektionsgut in die Hohlräume des umgebenen Gesteins eindringt. Der Abstand der Injektionslöcher richtet sich nach der Durchlässigkeit des Untergrundes, der Viskosität des

Einpreßgutes und dem zulässigen Einpreßdruck. Zu-nächst wird mit weitständigen Injektionslochserien begonnen. Dann wird sukzessive jeweils mittig zwischen den Löchern der vorhergehenden Serien gebohrt (Kutzner, 1991; Jessberger, 1992; Schulze, 1992; EA-GDA, 1993).

Für die Reichweite der Injektion bei kugelförmiger Ausbreitung hat Müller-Kirchenbauer (1969) gefunden:

$$R_k = \sqrt[3]{\frac{h \cdot k_o \cdot 3r}{n}} \sqrt[3]{t_e \left(1 - \frac{C}{m+1}\right)}$$

mit

$R_k$  = Reichweite bei kugelförmiger Ausbreitung

$h$  = Überdruckhöhe an der Injektionsquelle

$k_o$  = Durchlässigkeit bei Injektionsbeginn

$r$  = Radius des Bohrlochs

$n$  = Porenvolumen

$t_e$  = Zeitpunkt bei Injektionsende

$C, m$  = spezifische Konstanten des Injektionsmittels.

Für zylindrische Ausbreitung gilt

$$R_z = \alpha R_k$$

mit

$R_z$  = Reichweite bei zylinderförmiger Ausbreitung

$\alpha$  = 2,3 bis 2,6.

Über umfangreiche Untersuchungen zur Injektionstech-nik berichtet Schulze (1992).

Die Gefrierwand ist vornehmlich eine temporäre Maß-nahme, die z. B. auch zum Schließen von Fenstern bei Dichtwänden eingesetzt werden kann und dazu dient, den Schadstoffaustritt zu vermeiden. Die Gefrierwand kann bei Bedarf auch dort eingesetzt werden, wo es gilt, eine einzubauende Dichtwandmasse vor der vorhandenen Kontamination zu schützen. Ein weiterer Einsatzzweck ist die Entnahme hochtoxischer flüssiger oder leicht-flüchtiger Stoffe aus einem Kontaminationskörper. Zur Herstellung einer Gefrierwand werden Gefrierrohre in kurzen Abständen in den Boden eingebracht, in denen Kühllauge oder flüssiger Stickstoff zirkuliert. Durch Gefrieren des Bodenwassers entsteht ein geschlossener was-serdichter Frostkörper, dem dauerhaft Kälte zugeführt werden muß, um ihn aufrechtzuerhalten (Jessberger, 1992; EA-GDA, 1993).



## 3 Baustoffe, Bauteile

### 3.1 Dichtwandmaterialien für Schlitzwände

Der Abdichtungserfolg einer Dichtwand wird entscheidend von den Eigenschaften der eingesetzten Dichtwandmasse bestimmt. Die mineralischen Dichtwandmassen bestehen u. a. aus Bentonit, Zement, Füllstoffen und Wasser. In Sonderfällen werden auch chemische Additive zugegeben. Die Zusammensetzung und die Eigenschaften einer mineralischen Dichtwandmasse werden für jedes Bauvorhaben individuell in Eignungsversuchen ermittelt und auf der Baustelle durch Güteprüfungen überwacht (Meseck, 1987; Jessberger & Geil, 1991).

Da für jedes Dichtwandbauvorhaben andere, lokal günstig zu beziehende und häufig auch nicht genormte Ausgangsstoffe verwendet werden, können die Ergebnisse von Eignungsprüfungen für eine bestimmte Dichtwand nur schwer auf andere Dichtwände übertragen werden. Die Anforderungen an Dichtwandmassen bzw. an die damit erreichbaren Eigenschaften sind nicht in Empfehlungen oder Normen festgeschrieben, sie müssen den individuellen Bedingungen angepaßt werden. Eine der Betontechnologie vergleichbare "Technologie der Dichtwandmassen" gibt es nicht. Ansätze hierfür liefern die immer häufiger eingesetzten Fertigmischungen. Zur Kennzeichnung von Dichtwandmaterialien untersucht Weichert (1988) die folgenden Parameter:

- Wassergehalt
  - Glühverlust
  - Gesamtwassergehalt
  - Massenanteile der Komponenten
  - Korndichten der Komponenten
- sowie deren Abhängigkeiten voneinander.

Die Dichtwandmaterialien lassen sich je nach Bauart der Dichtwand unterscheiden:

- Schmalwandmassen
- Einphasenwandmassen
- Zweiphasenwandmassen.

Dichtwandmassen für Schmalwände enthalten einen relativ hohen Feststoffanteil zur Gewährleistung einer hohen Dichte. Damit das Schließen des Hohlraumes beim Rückziehen der Rüttelbohle verhindert wird, ist eine Dichte um  $1600 \text{ kg/m}^3$  erforderlich. Die Dichtwandmasse muß trotz hohem Feststoffanteil pumpfähig sein. Eine bewährte Rezeptur für Schmalwand-Dichtmassen lautet (Arz, 1988):

25 kg Bentonit  
175 kg Portland-Zement

800 kg Steinmehl  
640 l Wasser.

Dichtwände mit dieser Zusammensetzung ermöglichen Durchlässigkeitsbeiwerte um  $10^{-8} \text{ m/s}$ .

Die Dichtwandmassen für Einphasenwände müssen "schlitzfähig" sein, d. h. ihre Fließgrenze darf nicht  $80 \text{ N/m}^2$  überschreiten, um das Ineinanderbinden der Lamellen zu ermöglichen. Andererseits müssen sie stark undurchlässig sein, was einen hohen Feststoffanteil (Bentonit und Zement) verlangt. Diese sich widersprechenden Anforderungen können mit folgender Rezeptur verhältnismäßig gut erreicht werden ( $k_f = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ ):

42 kg Na-Bentonit  
200 kg Hochofenzement  
917 l Wasser.

Zur Herstellung von Dichtwandmassen mit höherem Feststoffanteil werden auch Kalzium-Bentonite verwendet, wie z. B. nach der folgenden Rezeptur:

165 kg Ca-Bentonit  
144 kg Hochofenzement  
826 l Wasser.

Die Ca-Bentonite weisen eine niedrigere Quellwirkung auf und liefern stabilere Suspensionen. Nachteilig sind jedoch die stärkere Wasserabgabe und das Ansteifen der Mischung, die durch Zugabe von Chemikalien behoben werden können. Hierzu ist die Grundwasserneutralität zu prüfen.

Für Zweiphasenwände können Dichtwandmassen mit viel höherem Feststoffgehalt verwendet werden, sie müssen nur die Fließfähigkeit des Unterwasserbetons aufweisen (Hitze, 1987). Diese Dichtmassen enthalten neben Ton bzw. Bentonit und Zement auch Füllstoffe wie Sand und Kies und verfügen über eine Dichte von bis zu  $2.000 \text{ kg/m}^3$  (Seitz, 1987; Hass, Hitze 1988). Zweiphasendichtwandmassen ermöglichen Durchlässigkeitswerte von  $k_f = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ .

Die Sickerwasseranfälligkeit des Zements (Seitz, 1987) führte zur Entwicklung von zementfreien Dichtwandmassen in der Zweiphasenbauart. Diese Dichtwandmassen enthalten Tonmehl, Wasserglas, Wasser, Sand, Kies und Silikon-Reagenz. Sie erreichen Dichten von bis zu  $2.300 \text{ kg/m}^3$  und Durchlässigkeitswerte um  $k_f = 10^{-11} \text{ m/s}$ . Ihr steifplastisches Verhalten ist von besonderem Vorteil, wenn man mit Setzungen zu rechnen hat (Hitze, 1987; Jessberger & Geil, 1991). Düllmann et al. (1993) fanden bei der Einkapselung einer Sonderabfalldeponie, daß der Zement in der Dichtwandmasse aufgrund von Salz-, Schwermetall-,

PCB- und Öl-Kontamination im Sickerwasser keine ausreichende Festigkeit erlangte. Als zementfreie Dichtwandmassen wurde DynagROUT-Mischung in den Primärlamellen und Bentonitsuspension in den Sekundärlamellen verwendet (Dreiphasen-Verfahren).

### 3.2 Gasdränagen

Um eine horizontale Gasmigration aus der Deponie zu verhindern, werden in bestimmten Fällen Dichtwände oder schlitzwandartig ausgebildete poröse Gasdränagen, kombiniert mit Kunststoffdichtungsbahnen, verwendet (Pye, 1993). Die porösen Gasdränagen sollen eine Ent-

gasung nach der Atmosphäre ermöglichen und die Kunststoffdichtungsbahn die weitere horizontale Migration verhindern. Dem gleichen Zweck dient eine Gasbrunnengalerie entlang des Deponierands (Roth & Kallo, 1992; Pye, 1993) mit dem zusätzlichen Vorteil, daß sich das seitlich aus der Deponie migrierende Gas kontrolliert fassen läßt. Auch eine Kombination von porösen Gasdränagen mit hoch aus dem Boden ragenden Entgasungsrohren, auf welchen sich windgetriebene Ventilatoren befinden, die einen Unterdruck im Boden herstellen, kann die horizontale Gasmigration sehr effektiv verhindern (Pye, 1993).

## 4 Eigenschaften

### 4.1 Physikochemische Eigenschaften der Dichtwandsuspensionen

Eine der wichtigsten und kennzeichnendsten Komponenten der Dichtwandsuspensionen ist der Bentonit. Der Bentonit ist ein weiches Gestein, das aus Tonmineralien kolloidaler Größe besteht und durch Verwittern von Tuff oder vulkanischer Asche gebildet wird. Seine Hauptkomponente ist das Tonmineral Montmorillonit, Begleitmineralien können Quarz, z. T. auch Tridymit und Cristobalit, außerdem Glimmer, Feldspat, Pyrit und Calcit sein. Nicht selten ist auch eine Glasphase vorhanden. Bei der Herstellung von Dichtwandsuspensionen wird der Bentonit dem Wasser in feingemahlener Form beigemischt.

In Deutschland sind die größten Bentonitvorkommen in Bayern zu finden (Fahn, 1973): im Dreieck Mainburg-Landshut-Moosburg an der Isar, bei Malgersdorf südlich von Landau/Niederbayern und in der Nähe von Thannhausen/Schwaben. Im Westerwald und in Schleswig-Holstein kommen montmorillonithaltige Tone vor.

Der Bentonit hat bei der Schlitzwandherstellung zwei Hauptaufgaben. Die erste Aufgabe ist, eine dünne, schmierige Schicht an der Schlitzwand zu bilden. Diese Schicht, der sogenannte Filterkuchen, verfügt über eine niedrige Durchlässigkeit und minimiert das Aussickern der Suspension aus dem Schlitz und das Einsickern des Grundwassers in den Schlitz. Der Filterkuchen formt eine Art Platte, auf welche der hydrostatische Druck der Suspension einwirken kann und dadurch die Schlitzwand stabilisiert.

Die zweite Aufgabe des Bentonits ist, die benötigte Dichte und Viskosität aufrechtzuerhalten. Wegen der Größe der Bentonitkörner (80 % unter 200 mesh, d. h. 80 µm) überwiegen die Oberflächenkräfte gegenüber den Massenkräften in einem Bentonit-Wasser-Gemisch, was zur Bildung einer scheinbar homogenen Suspension führt. Die erhöhte Dichte dieser Suspension gegenüber der des Wassers und ihr nicht-Newtonscher Viskositätscharakter reduzieren die Fallgeschwindigkeit der Teil-

chen des Aushubmaterials wesentlich, was zu ihrer Entfernung aus dem Schlitz und zur Erleichterung der Arbeit des Greifers von erheblichem Vorteil ist. Die erhöhte Dichte hat außerdem einen größeren hydrostatischen Druck auf die Schlitzwand zur Folge, was zur Erhöhung der Schlitzwandstabilität während der Aushubarbeit beiträgt (Xanthakos, 1979).

Der Montmorillonit ist ein kristallines, schichtförmiges Aluminiumhydroxysilikat, dessen plattenförmige Kristalle durch geringe Dicke, hohe Biegsamkeit und große Oberfläche gekennzeichnet sind. Die theoretische Strukturformel des Montmorillonits ist:  $(Al_{1,67} Mg_{0,33})[(OH)_2Si_4O_{10}]^{-0,33} \cdot nH_2O$  (Gorantonaki, 1993).

Die chemische Zusammensetzung der bayerischen Bentonite ist nach Fahn (1973):

Si O <sub>2</sub>	57,0 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,2 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,1 %
Ti O <sub>2</sub>	0,2 %
Ca O	4,5 %
Mg O	2,1 %
K <sub>2</sub> O	1,4 %
Na <sub>2</sub> O	0,2 %
Glühverlust	8,2 %

Kristalle des Montmorillonits bestehen aus 15–20 dreischichtigen Paketen. In den äußeren Schichten eines Pakets befinden sich Siliziumatome, die in tetraedrischer Anordnung von Sauerstoffatomen umgeben sind. Sie bilden die Tetraederschicht (T-Schicht). Zwischen den T-Schichten befindet sich eine Oktaederschicht (O-Schicht), in der Aluminiumatome in oktaedrischer Anordnung von 4 Sauerstoffatomen und 2 Hydroxylgruppen umgeben sind. In den T-Schichten kann Si<sup>4+</sup> z. T. durch dreiwertige Kationen (meist Al<sup>3+</sup>), in den O-Schichten Al<sup>3+</sup> z. T. durch zweiwertige (oft Mg<sup>2+</sup> und Fe<sup>2+</sup>) Kationen ersetzt werden. Wegen der Substitutionen in den drei Schichten existieren ungesättigte Bindungen

innerhalb des Kristalls, was eine negative Ladung zur Folge hat. Durch die Anlagerung von Kationen in die inneren und äußeren Oberflächen des Kristalls wird diese negative Überschuldung kompensiert. Die adsorbierten Kationen spielen eine entscheidende Rolle für die Eigenschaften des Montmorillonits bzw. Bentonits. Obgleich viele unterschiedliche Kationen und organische Moleküle hier vorhanden sein können, sind Natrium und Kalzium die wichtigsten. Das Verhalten von Na- bzw. Ca-gesättigten Montmorilloniten unterscheidet sich in starkem Maße.

<b>Eigenschaften von Montmorilloniten</b>		
(Baver et al., 1972; Boyes, 1975; Grim & Gruven, 1978; Xanthakos, 1979; Case, 1982):		
<b>Parameter</b>	<b>Na-gesättigter Montmorillonit</b>	<b>Ca-gesättigter Montmorillonit</b>
Quellen durch Hydratation (cm <sup>3</sup> /g Ton)	10	2,5
Kationenaustauschkapazität (mäq/100 g)	80-150	60-100
Thixotropie	hoch	niedrig
Tongehalt zur Einstellung einer 15 cP Kolloisuspension (Gew.-%)	5	12
Durchlässigkeit eines 9:3 Quarz-Ton-Gemisches (m/s)	$2,76 \cdot 10^{-11}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$
Durchlässigkeit eines 7:3 Quarz-Ton-Gemisches (m/s)	$5,0 \cdot 10^{-12}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$

Kennzeichnende Bentoniteigenschaften sind:

- Quellen und Hydratation
- Flockung und Dispergierung
- Thixotropie und Gelkraft.

Wenn Bentonit mit Wasser gemischt wird, wird nicht nur die Oberfläche der Bentonitkörner befeuchtet (osmotische Quellung), sondern es dringt auch Wasser in die kationbelegten Zwischenschichten der Montmorillonitkristalle ein, wodurch sie ihr Volumen vergrößern (innerkristalline Quellung). Durch die beiden Mechanismen (osmotische und innerkristalline Quellung) kann der Bentonit auf das 10 bis 12fache seines Trockenzustandes quellen (Case, 1982). Der Quellvorgang kann bis zu einer Woche dauern (Boyes, 1975).

Während der Hydratation von Montmorilloniten werden Wassermoleküle an den äußeren und inneren Kristall-

oberflächen, infolge der Anziehungskraft zwischen den Wasserstoffatomen der Wassermoleküle und den negativ geladenen Oberflächen, adsorbiert. Das adsorbierte Wasser wird so stark angezogen, daß es für eine nichtflüssige oder semi-kristalline Substanz gehalten werden kann. Auch Wassermoleküle, die in keinem unmittelbaren Kontakt mit der Oberfläche stehen, werden von dem Montmorillonitkristall stark beeinflusst. Das ist darauf zurückzuführen, daß die an der Tonoberfläche adsorbierten Wassermoleküle zum Teil Wasserstoffbrücken mit den Molekülen der zweiten Schicht bilden, die weiterhin Wasserstoffbrücken mit den weiteren Schichten bilden.

Die Anzahl der Schichten von Wassermolekülen und die Regelmäßigkeit ihrer Anordnung hängen von der Art und der Konzentration der adsorbierten Kationen ab. Das Maß der Wasseradsorption wird von der Größe und der Wertigkeit der hydratisierten Kationen beeinflusst. Na-Ionen lassen sich stärker hydratisieren als Ca-Ionen. Na-gesättigte Montmorillonite beeinflussen z. B. die Orientierung der Wassermoleküle bis auf 100 Ångström, was ungefähr 40 Schichten von Wassermolekülen entspricht. Im Vergleich dazu haben Ca-gesättigte Montmorillonite eine Einflußweite von nur 15 Ångström, d. h. 6 Molekül-Schichten von Wasser (Grim, 1968).

Die sichtbaren Folgen dieser submikroskopischen Wechselwirkungen sind, daß Na-Montmorillonite viel mehr Wasser adsorbieren, wesentlich stärker quellen und bei gleichem Feststoffgehalt der Bentonitsuspension eine höhere Viskosität aufweisen als Ca-Montmorillonite.

Die adsorbierten Kationen beeinflussen auch die Flockung und Dispergierung von kolloidalen Suspensionen. Das ist in der Schlitzwandtechnik deshalb als wichtig zu beachten, weil die Ionen im Grundwasser und die Ca-Ionen im Zement die Suspensionseigenschaften stark beeinflussen. Die Tonoberflächen haben eine negative Ladung, wobei die Kanten positiv geladen sind. Das Ergebnis ist eine Abstoßung zwischen den Kristalloberflächen und eine Anziehung zwischen Oberflächen und Kanten.

Wenn Na-Ionen an der Tonoberfläche dominieren, sind die diffusen Doppelschichten groß und die Kolloidteilchen im Wasser gut dispergiert. Sehr wenige Kontakte treten zwischen Oberflächen auf. Ist aber viel Kalzium vorhanden, so wird die Doppelschicht verkleinert und die Orientierung der Wassermoleküle wesentlich beeinträchtigt. Demzufolge wird die Abstoßung zwischen den Montmorillonitkristallen herabgesetzt, es treten Kontakte von Oberfläche zu Oberfläche auf, und die Teilchen können Flocken bilden. Diese Flockenbildung reduziert die Quellung und die Viskosität. Infolge der reduzierten Quellung entstehen Hohlräume, und die Durchlässigkeit der späteren Dichtwand wird größer. Ein Ca-Montmorillonit hat eine bis zu zwei Zehnerpotenzen höhere Durchlässigkeit als ein Na-Montmorillonit gleicher Zusammensetzung. Bei einer

kritischen Flockengröße setzt weiterhin eine Sedimentation ein, was die Filterkuchenbildung und die Schlitzwandstabilität beeinträchtigt.

Wenn ein Wasser-Bentonit-Gemisch für einige Minuten ruht, geht die viskose Lösung in eine Gelform über: sie "dickt ein". Gele entstehen durch "Kartenhaus"-Bildung, ermöglicht durch die Anziehungskräfte zwischen positiv geladenen Teilchenkanten und negativ geladenen Teilchenoberflächen. Durch Schütteln oder Vibration können sie wieder in eine viskose Lösung umgewandelt werden. Chemische Zusatzstoffe beeinflussen die Bindungen zwischen Teilchenkanten und -oberflächen und verschieben dadurch den Zustand der Suspension zum Gel oder zur Lösung hin.

Die Fähigkeit, aus einer Lösung in ein Gel überzugehen und umgekehrt, wird Thixotropie genannt. Sie hängt von der Anzahl und der Kraft der Bindungen zwischen Teilchenkanten und -oberflächen ab (Maini, 1987). Die Thixotropie ist in der Schlitzwandtechnik besonders während der Betriebspausen nützlich, weil das nach Aufhören der Strömung gebildete Gel es ermöglicht, die Feststoffteilchen des Aushubmaterials im Schwebestand zu halten. Die Thixotropie wird durch die Messung der Gelkraft gekennzeichnet. Die Gelkraft ist die Spannung, die zum Aufbrechen der im Ruhestand gebildeten Gelstruktur benötigt wird (Boyes, 1975). Die Gelkraft entspricht der Fließgrenze  $\tau_0$  der Bingham'schen Flüssigkeit in der Gleichung der Fließkurve:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dr},$$

wobei  $\tau$  die Scherspannung,  $\eta$  die scheinbare Viskosität und  $dv/dr$  die Schergeschwindigkeit bezeichnen. Zur Messung der Fließgrenze werden Rotationsviskosimeter, Kugelharfe, Pendelgerät und Marsh-Trichter benutzt. Hierzu schlagen Schulze, Brauns und Schwalm (1991) ein Baustellen-Meßgerät vor, in dem die Suspension aus einem stehenden Zylinder durch eine horizontale Kapillare ausfließen kann. Beim Abreißen der Strömung am Ende der Kapillare wird die Suspensionshöhe im Zylinder, die sog. Stagnationshöhe, abgelesen, woraus die Fließgrenze berechnet werden kann.

## 4.2 Mechanische Eigenschaften und Durchlässigkeit von Dichtwandmassen

Die zur Umschließung von Altlasten verwendeten Dichtwände müssen über eine lange Zeit hinweg funktionsfähig bleiben. Im eingebauten Zustand unterliegen sie mechanischen, hydraulischen und chemischen Beanspruchungen (Jessberger & Geil, 1991; Rodatz, 1991). An die Dichtigkeit, die chemische Beständigkeit und das Langzeitverhalten der Dichtwände werden erheblich höhere Anforderungen gestellt als bei sonstigen Anwendungen im Tief- und Wasserbau, da auch das Austreten

von sehr geringen Schadstoffmengen aus kontaminierten Standorten unterbunden werden muß. Mechanische Beanspruchungen ergeben sich aus der planmäßigen Abtragung von Lasten, aus unterschiedlichen Setzungen in Bergsenkungsgebieten, aus einseitigen Lasten neben der Dichtwand und aus Druckunterschieden infolge ungleichmäßiger Grundwasserabsenkung (Gierschick et al., 1987).

Dichtwandmassen beim Einphasenverfahren müssen gegensätzlichen Anforderungen gerecht werden: Während der Aushubphase muß die Verarbeitbarkeit gewährleistet sein, nach der Aushärtung jedoch muß eine hohe Festigkeit und gute Dichtigkeit erreicht werden. Die Grenze der Verarbeitbarkeit liegt nach Müller-Kirchenbauer (1987) bei einer Scherfestigkeit von  $\tau_f = 150 \text{ N/m}^2$ . Die möglichen Zusammensetzungen von reinen Bentonit-Zement-Suspensionen sind von Jefferis (1981) und Jones (1963) in einem Dreieckdiagramm dargestellt.

Die Untersuchungen von Meseck (1987b) über frische Dichtwandmassen zeigen, daß die Viskosität (Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter), die Fließgrenze und die Filtratwasserabgabe vom Bentonit- und Zementgehalt, der Rührgeschwindigkeit und der Verarbeitungszeit abhängen. Die Eigenschaften der frischen Dichtwandmassen werden am stärksten vom Bentonitgehalt beeinflusst. Als kennzeichnende Mittelwerte kann für die Auslaufzeit 40 s, für die Fließgrenze  $40 \text{ N/m}^2$  und für die Filtratwasserabgabe  $80 \text{ cm}^3$  angegeben werden.

Die mechanischen Eigenschaften der erhärteten Dichtwandmassen sind vom hydraulischen Bindemittel, dem Feststoffgehalt und der Zeit abhängig. In der Praxis wird die einaxiale Druckfestigkeit erhärteter Dichtwandmassen nach DIN 18 136 über die Ermittlung der Druckfestigkeit von Bodenproben bestimmt. In Anlehnung an die Betontechnologie wird auch die 28-Tage-Druckfestigkeit verwendet. Nach Meseck (1987b) nimmt die einaxiale Druckfestigkeit mit der Zeit zu, nach 56 Tagen kann sie  $1200 \text{ kN/m}^2$  betragen, aber nach 224 Tagen erreicht sie ihren Endwert immer noch nicht. Die 56-Tage-Druckfestigkeit hängt sehr stark vom Bindemittel ab: Je nach Zementart ist ein Unterschied von einer Zehnerpotenz bei gleichem Feststoffgehalt möglich. Der Zement- und Bentonitgehalt sowie der Hüttensand-Anteil und die Mahlfeinheit des Zements erhöhen die Druckfestigkeit ebenfalls. Die Sedimentation macht sich im Schlitz durch eine zunehmende Druckfestigkeit mit der Tiefe bemerkbar. Die Verarbeitungszeit hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Druckfestigkeit. Die Bruchstauchungen von 28-Tage-Proben liegen zwischen 1,0 und 2,0 %, die Bruchfestigkeiten betragen  $500 \text{ kN/m}^2$  bis  $1000 \text{ kN/m}^2$ . 14 Tage alte Proben mit geringem Zementgehalt weisen nach Überschreiten der Bruchstauchung ein plastisches Verhalten auf. Die Verformungsmoduli liegen zwischen  $50 \text{ MN/m}^2$  und  $100 \text{ MN/m}^2$ , die Scherspannungen zwischen  $100 \text{ kN/m}^2$  und  $500 \text{ kN/m}^2$ .

Die Wasserdurchlässigkeit wird nach den Untersuchungen von Binde et al. (1985); Simons et al. (1986) und Simons & Reuter (1985) von der Art der Feststoffe, dem Feststoffgehalt und von dem Probenalter beeinflusst. Der Durchlässigkeitsbeiwert nimmt von 14 Tagen bis 112 Tagen nach Versuchsbeginn um etwa zwei Zehnerpotenzen, von 28 Tagen bis 224 Tagen um eine Zehnerpotenz ab (Meseck, 1987b; Gierschick et al., 1987). Die Zunahme des Bentonit- und Zementgehaltes reduziert die Durchlässigkeit ebenfalls (Meseck, 1981; Meseck, 1987b). Die Zementart hat einen wesentlichen Einfluß auf die Durchlässigkeit. Unter einem hydraulischen Gradienten  $i = 30$  nimmt der  $k$ -Wert mit der Zeit zu, bei höheren Gradienten bleibt er annähernd konstant. Ca-Bentonite haben eine um eine Zehnerpotenz niedrigere Durchlässigkeit als Na-Bentonite. Die Bandbreite des  $k$ -Wertes liegt den Messungen nach zwischen  $10^{-12}$  m/s und  $10^{-7}$  m/s.

Zur Messung der Wasserdurchlässigkeit schlägt Horn (1986) eine In-situ-Methode vor: Der  $k$ -Wert wird durch Absinkversuche in Bohrlöchern in der Dichtwand bestimmt. Das Verfahren hat den Vorteil, daß es Mittelwerte über eine größere Tiefe unter realen Bedingungen liefert und die durchströmte Dichtwandmasse etwa 5000fach größer ist als bei Laborversuchen. Zur genaueren Auswertung machen Brauns & Charles de Oliveira (1987) Vorschläge.

Zur Prognose der langfristigen Wasserdurchlässigkeit wird eine Methode von Schweitzer (1988) empfohlen. Über eine Zeit von 2,5 Jahren wurden umfangreiche Labormessungen an Rückstellproben und In-situ-Untersuchungen an der Dichtwand um die Deponie München-Großlappen durchgeführt. Die Labormessungen erfolgten im Standrohr- und Triaxialgerät, die In-situ-Untersuchungen mit der Absinkmethode (Horn, 1986). Für den zeitlichen Ablauf der Durchlässigkeit wurde der Zusammenhang

$$k = a \cdot t^b$$

gefunden, wobei  $t$  [Tage] das Probenalter bezeichnet und  $a = 8 \cdot 10^{-6}$  m/s sowie  $b = -1,56$  entspricht. Da dieser Zusammenhang im doppelt logarithmischen Diagramm eine Gerade darstellt, ist eine Extrapolation auf einen vorgegebenen Zeitpunkt möglich. Die Wasserdurchlässigkeit vermindert sich mit der Zeit über mindestens 2,5 Jahre, die Geschwindigkeit der Abnahme hängt von der chemischen Zusammensetzung und der Mahlfineinheit des Zementes ab. Die Streuung der Meßwerte betrug zwei Zehnerpotenzen.

Zur Schadstoff-Rückhaltefähigkeit der Dichtwand um eine Kanalschlickdeponie haben Loxham & Westrate (1985) numerische Untersuchungen durchgeführt. Der Kanalschlick besteht aus Feinschluff, Ton und organischen Feststoffen, und wegen seiner starken Adsorptionsfähigkeit reichern sich Schwermetalle, PCB (polychlorierte Biphenyle) und Pestizide aus Abwässern

der chemischen Industrie in ihm an. Der Schlick wird aus dem Kanal gebaggert und in einer Deponie abgelagert, wo die Schadstoffe durch das Regen- und Grundwasser ausgelaugt werden können. In der Deponie findet zunächst eine Konsolidierung statt, das Wasser bewegt sich zur Oberfläche, wo es abgepumpt wird. Der so entstandene niedrigere Wasserspiegel bewirkt eine inverse Strömung von außen nach innen (Müller-Kirchenbauer et al., 1990; Münnich & Collins, 1991). Nach Einstellen des Pumpbetriebes richten sich jedoch konvektiver und diffusiver Schadstofftransport nach außen. Die Lösung der Differentialgleichungen der Wasserströmung und des Schadstofftransports (s. Kapitel I) mit der Finiten-Elementen-Methode liefert das Strombild (das Netz der Strom- und Equipotentiallinien) und die Schadstoff-Isopythen im Untergrund um die Deponie. Der Widerstand der Dichtwand zwingt die meisten Stromlinien bzw. das Gros der Strömung zur Entwässerungsgrube. Von der auf diese Weise stark reduzierten Schadstoffmenge, die die Dichtwand erreicht, werden die meisten Schwermetalle durch Ausfällung in der Dichtwand selbst zurückgehalten. Zur Ausfällung kommt es wegen der Hydratation des Zements, die ein saures Milieu hervorruft. Einige Zahlenwerte zur Schadstoffaustragung aus der untersuchten Schlickdeponie: Chlorid: 70 kg/Jahr nach 10 Jahren, nachher exponentielle Abnahme; Zink: 10 g/Jahr nach 60 Jahren; Blei: 10 mg/Jahr nach 100 Jahren.

Die andauernde Zunahme der Dichtwandbauvorhaben seit 1985 deutet auf die Nachfrage im Bereich des Umweltschutzes hin. Wegen der besonders hohen Anforderungen an die chemische Beständigkeit werden immer häufiger feststoffreiche Dichtwandmassen verwendet. Diese Dichtwandmaterialien bedingen jedoch beim wirtschaftlicheren Einphasenverfahren häufig Verarbeitungsschwierigkeiten. Um den gestellten höheren Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Untersuchungsmethoden der mechanischen Eigenschaften verbessert bzw. weiterentwickelt werden. Die erhärtete Dichtwandmasse muß eine Mindestdruckfestigkeit zur Aufnahme von Normalspannungen, eine ausreichende Scherfestigkeit zur Aufnahme von Schubspannungen, eine geeignete Steifigkeit und gleichzeitig Verformbarkeit aufweisen (Rodatz, 1991). Besonders wichtig ist, das Spannungs- und Verformungsverhalten der Standard-Dichtwandmassen realistischer als bisher zu charakterisieren. Hierfür sind vor allem Triaxialversuche, direkte Scherversuche und Kompressionsversuche notwendig, wobei der zeitlichen Änderung dieser Parameter besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muß. Es erscheint als zweckmäßig, eine Verknüpfung von Betontechnologie und Bodenmechanik herzustellen. Auf diesem Gebiet besteht dringender Forschungsbedarf, sowohl bezüglich der Grundlagen als auch der praxisorientierten Kenntnisse. Eine Verbindung der Beständigkeit von Dichtwandmassen im Zweiphasenverfahren mit der Wirtschaftlichkeit des Einphasenverfahrens wäre besonders wünschenswert.

### 4.3 Sedimentation, Filtration und Penetration von Dichtungssuspensionen

Während der Herstellung von Schlitzwänden finden Filtrations-, Sedimentations- und Penetrationsvorgänge in der Stützsuspension statt (Müller-Kirchenbauer et al., 1991). Diese Vorgänge hängen in starkem Maß von den durchteuften Bodenschichten ab. Bei wechselnden Bodenschichten entsteht eine heterogene Dichtwand. Messungen von Meseck (1987b), Gierschick et al. (1987) und Heitfeld (1989) haben erhebliche Unterschiede in der Durchlässigkeit und der Druckfestigkeit in vertikalen Profilen von Dichtwänden gezeigt. Bezüglich des Eindringverhaltens der Dichtungssuspension in den Erdkörper unterscheiden Müller-Kirchenbauer et al. (1979) drei Fälle:

- Typ 1: Vollständige Filterkuchenbildung vor feinporigem Boden. Der Suspensionsfeststoff wird an der Erdwandoberfläche ausgefiltert. Der Filterkuchen bildet eine Membran, auf welche die hydrostatischen Stützkraften membranartig wirken.
- Typ 2: Reines Eindringen in grobporigen Boden – ohne Filterkuchenbildung. Die Penetrationstiefe ist durch das Gleichgewicht bestimmt, das zwischen den Schubspannungen, aufsummiert über die Oberfläche der (gewundenen) Porenkanäle, und dem hydrostatischen Druck an der Schlitzwand herrscht.
- Typ 3: Kombination von Eindringen und Filtration: Die groben Feststoffpartikel werden auf der Bodenoberfläche ausgefiltert. Dadurch entsteht ein unvollständiger Filterkuchen und ein verminderter Eindringungsbereich.

Bei Bemessung von Dichtwänden wurde bislang immer von einer homogenen Dichtwandmasse und einem konstanten Querschnitt ausgegangen. Die Sedimentation, Filtration und Penetration der Suspension unter den manchmal stark variierenden Bedingungen hat jedoch erhebliche Unterschiede in der Qualität und der Geometrie der fertiggestellten Dichtwand zur Folge.

### 4.4 Beständigkeit von Dichtwänden

Neue Beobachtungen und Untersuchungsergebnisse bestätigen, daß Dichtwände unter bestimmten Bedingungen anfällig gegen chemische Einwirkungen sind. Meseck (1987b) hat die Ausspülung von Ca-Ionen in Durchspülungsversuchen mit entmineralisiertem (deionisiertem) Leitungswasser untersucht und festgestellt, daß sie mit der Zeit, der Wassermenge und dem hydraulischen Gradienten zunimmt. Ähnliche Tendenzen hat Geil (1989a) mit destilliertem Wasser festgestellt. Strobl (1982) hat einen quadratischen Zusammenhang zwischen der Ausspülung von Kalzium und dem hydraulischen Gradienten gefunden. Unter einem Gradientengrenzwert wird jedoch kein Kalzium ausgespült. Den niedrigsten Grenzwert weisen Ein-

phasendichtwände mit Portlandzement auf. Hochofenzement, Feststoffzugabe sowie nicht betonangreifendes Wasser erhöhen die Stabilität.

Geil (1989b) berichtet über eine Fertigmischung, aus der die Dichtwandmasse in nur einem Mischvorgang ohne Quellzeiten für den Bentonit hergestellt werden kann. Das Material enthält ein Spezialbindemittel und ca. 20 % Na-Bentonit und hat gute Verarbeitungseigenschaften (70 s Auslaufzeit aus dem Marsh-Trichter nach 12 Stunden), geringe Filtratwasserabgabe, niedrige Durchlässigkeit ( $10^{-12}$  m/s bei Durchströmung mit destilliertem Wasser und  $10^{-10}$  bis  $10^{-9}$  m/s bei Baustellenproben) und hohe Beständigkeit bei Durchströmung mit Salzlauge.

Gläser & Beitingen (1987) untersuchten die Beständigkeit von Dichtwandmassen bei Sickerwasserangriff. 1,5 Jahre nach dem Bau einer kombinierten Dichtwand wurde der k-Wert an Proben ermittelt: Bei der Na-Bentonit-Dichtwandmasse lag er bei  $10^{-7}$  m/s, während die Ca-Bentonit-Dichtwandmasse  $10^{-10}$  m/s aufwies. Die Beständigkeit der Na-Bentonit-Dichtwandmasse wird durch das Sickerwasser viel stärker beeinträchtigt als bei Ca-Bentonit. An den PE-HD-Platten konnten keinerlei Veränderungen durch den Sickerwassereinfluß festgestellt werden.

Hinsichtlich der Beständigkeit der Dichtwand gegen Sickerwasser, welches mit Ammonium sehr stark, mit Magnesium und Sulfat dagegen schwach belastet ist, fanden Gierschick et al. (1987) für die Umschließung der Deponie München-Großlappen folgende Rezeptur je  $m^3$  Dichtwandmasse optimal:

37,5	kg	Bentonit Tixoton CV15
200	kg	Hochofenzement 35L NW (45 % Hüttensandanteil)
940	l	Leitungswasser.

Als Füller dienen Feststoffe aus dem angrenzenden Boden. Zur Prüfung der Durchlässigkeit der fertiggestellten Dichtwand hat sich die Absinkmethode von Horn (1986) bewährt, welche nach 180 Tagen einen Mittelwert von  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s lieferte.

Eine noch nicht genügend genutzte Anwendungsmöglichkeit zur Erhöhung der chemischen Beständigkeit der Dichtwandmassen bildet das Tonmineral Attapulgit (Tobin & Wild, 1986). Seine theoretische Strukturformel lautet:  $Mg_4 [(OH)_2 / Si_5O_{20}] \cdot 4H_2O + 4H_2O$  (Gorantonaki, 1993).

Der Attapulgit (auch Palygorskit genannt) besteht aus dreidimensionalen Ketten und quillt nicht. Sein besonderer Vorteil ist, daß unter dem Einfluß von Elektrolyten, organischen Lösungsmitteln und sehr hohen oder niedrigen pH-Werten nur eine geringfügige Flockung auftritt, wodurch er viel stabiler ist als der Bentonit. Ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $10^{-9}$  m/s kann durch Zugabe von 1 % Attapulgit zum Dichtwand-

material erreicht werden. Hinsichtlich der Tonchemie und der Anwendung des Attapulgits für den Umweltschutz besteht Forschungsbedarf. Nennenswerte Vorkommen sind jedoch in Europa nicht zu finden, deshalb ist die Erforschung des Attapulgits vor allem außerhalb Europas (z. B. in den USA) zu erwarten.

Die Stabilität der frischen Dichtwandsuspension ist während des Einarbeitens wichtig. Witt & Brauns (1983) untersuchten den Effekt von Gelierstoffen auf die Stabilität von Schmalwandsuspensionen im durchströmten körnigen Untergrund. Hier besteht die Gefahr, daß die Dichtwandmasse wegen der starken Infiltration (Müller-Kirchenbauer et al., 1991) nicht im Schlitz erhärten kann. Die Zusammensetzung der verwendeten Dichtwandmasse je  $m^3$  war:

610 kg Wasser  
 25 kg Bentonit  
 172 kg Zement  
 783 kg Steinmehl.

Die Dichte betrug  $1590 \text{ kg/m}^3$ . Der Suspension wurde Wasserglas als Geliermittel und ein Stabilisator auf Kalziumchloridbasis beigemischt. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß der Gelierprozeß umso früher einsetzt, je geringer die Menge an Wasserglas und je größer das Verhältnis Stabilisator/Wasserglas ist. Die Zugabe von 5 Vol.-% Wasserglas und  $7,5 \text{ cm}^3/l$  Stabilisator erwies sich als günstig. Die einaxiale Druckfestigkeit im erhärteten Zustand nahm mit dem Wasserglasanteil proportional zu: Die günstigsten Zugabeanteile waren 15 % Wasserglas und  $15 \text{ cm}^3/l$  Stabilisator. Die Durchlässigkeit nahm mit der Zeit ab und betrug  $10^{-10} \text{ m/s}$  am Ende der Untersuchung.

Schulze (1991) untersuchte die Resistenz von Feinstzement-Suspensionen gegen chemischen Angriff in Langzeitversuchen. Zement-Bentonit-Probekörper wurden zunächst mit entlüftetem und entmineralisiertem (deionisiertem) Leitungswasser durchströmt, anschließend mit 5 %iger  $\text{MgCl}_2$ -Lösung einer elektrischen Leitfähigkeit von  $58 \text{ mS/cm}$  beaufschlagt. Die aggressive Lösung wurde gewählt, um die Versuchsdauer zu kürzen, und weil Sickerwässer von den Deponien Malsch und Spremlingen Leitfähigkeitswerte von  $300 \text{ mS/cm}$  bzw.  $160 \text{ mS/cm}$  aufwiesen. Nach Versuchszeiten von 230 Tagen stieg die Durchlässigkeit von  $10^{-10} \text{ m/s}$  bis  $10^{-11} \text{ m/s}$  auf  $10^{-7} \text{ m/s}$  bis  $10^{-8} \text{ m/s}$ . Dabei verloren die Proben ihre Festigkeit völlig. Mineralogische Untersuchungen zeigten einen dramatischen Rückgang des CaO-Gehalts und eine starke Zunahme an  $\text{MgO}$ , weil die  $\text{Ca}^{2+}$ -Ionen in den Zementverbindungen durch die  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen ersetzt wurden. Feinstzemente sind resistenter gegen chemischen Angriff als die konventionellen Hochofenzemente. Bei feststoffreicheren Suspensionen

mit niedrigem Wasser/Zement-Wert ist eine Verbesserung der Resistenz zu erwarten. – Aufgrund experimenteller Erfahrung vertritt Steffen (1991) jedoch die Meinung, daß hochkonzentrierte Lösungen anstelle von sickerwasserüblichen Konzentrationen zu falschen Ergebnissen führen können.

Dichtwände werden auch gegen Kontamination durch landwirtschaftliche Abprodukte (Gülle, Dünge- und Pflanzenschutzmittel) eingesetzt. Günther (1990) prüfte mit einer künstlichen Gülle die Beständigkeit selbsthärtender Suspensionen gegenüber kontaminierten landwirtschaftlichen Wässern in Langzeituntersuchungen. Er verwendete folgende Rezeptur:

850 l Grundsuspension  
 (natrifiziertes Friedländer  
 Tonmehl)  
 250 kg PZ45W-MS Zement (DDR)  
 5 kg Sulfitablauge  
 (Abbindeverzögerer).

Die Dichte betrug  $1100 \text{ kg/m}^3$ . Bei Lagerung in Wasser nahm die einaxiale Druckfestigkeit bis zum 5. Versuchsmonat zu, im weiteren blieb sie mit  $500 \text{ kN/m}^2$  konstant. Bei Lagerung in Gülle konnten zunächst höhere Druckfestigkeiten gemessen werden als im Wasser, nach dem 5. Versuchsmonat erfolgte jedoch eine starke Festigkeitsabnahme. Die Durchlässigkeit zeigte gegenüber beiden Prüfflüssigkeiten den bekannten abnehmenden Verlauf, bei Gülle lag sie sogar um eine Zehnerpotenz niedriger als gegenüber Wasser. Nach 300 Tagen betrug sie  $10^{-10} \text{ m/s}$ . Der pH-Wert der durchströmenden Prüfflüssigkeiten nahm in 220 Tagen von 12 auf 10 ab, kennzeichnende Unterschiede zwischen Gülle und Wasser gab es nicht. Die elektrische Leitfähigkeit des durchströmenden Wassers war mit  $2-3 \text{ mS/cm}$  nahezu konstant, beim Prüfmedium Gülle nahm sie mit der Zeit zu und überstieg  $25 \text{ mS/cm}$ . Zu aussagekräftigeren Ergebnissen sind weitere Untersuchungen notwendig.

Tedd et al. (1993) berichten über zahlreiche Fehlstellen in einer 8 Jahre alten Dichtwand, hohe Oxidationsempfindlichkeit des Dichtwandmaterials beim Kontakt mit Luft, erhöhten  $k$ -Wert bei Durchströmung mit Essigsäure und niedrigen Widerstand gegen aggressive Chemikalien ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und Phenol). Jessberger und Geil (1991) fanden jedoch  $k$ -Werte zwischen  $10^{-10} \text{ m/s}$  und  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$  nach 80tägiger Durchströmung mit destilliertem Wasser,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und  $\text{NaOH}$ . Hermanns et al. (1987) untersuchten Ca-Dichtwandmassen bei Verwendung von Natronlauge, Essigsäure, Propionsäure, Salzsäure, Schwefelsäure und Salpetersäure und erhielten mit der Zeit  $k$ -Werte zwischen  $10^{-10} \text{ m/s}$  und  $10^{-12} \text{ m/s}$  mit abnehmender Tendenz.

## 5 Qualitätsprüfung von Dichtwänden und Bohrpfählen

Um Fehler beim Bau von Dichtwänden und Bohrpfählen feststellen zu können, ist eine zerstörungsfreie In-situ-Qualitätsprüfung erforderlich. Preiss et al. (1978) untersuchten die Möglichkeiten der visuellen Beobachtung von Zweiphasendichtwänden durch Videokamera, nukleare Methoden, seismische und Echo-Methode, akustische Sondierung, Vibration und elektrische Widerstandsmessung. Bei der akustischen Sondierung werden ein akustischer Geber und ein Empfänger mittels je eines Rohres in die Masse der Dichtwand oder des Pfahls gesenkt. Die lückenlose Ausfüllung wird über die Schalleitung geprüft. Die Vibrationsmethode wird überwiegend bei Bohrpfählen verwendet: Die Reflexion von Vibrationen im Bereich von 20 bis 1000 Hz wird registriert, von den Unregelmäßigkeiten kann man auf Durchmesser und Qualität der Dichtwand sowie auf die Bodensteifigkeit schließen. Bei der Neutronenstreuung wird der Wassergehalt der Dichtwandmassen durch Registrierung der Anzahl von abgebremsten Hochgeschwindigkeitsneutronen gemessen. Nachteilig ist, daß der Beton und die Sandschichten ähnliche Wassergehalte haben. Bei der Gammastrahl-Transmission schließt man aus der Anzahl der Photonen, die von der Strahlenquelle

zum Detektor gelangen, auf die Dichte bzw. auf eventuelle Hohlräume in der Dichtwandmasse. Bei der Methode der Gammastrahl-Streuung sind die Strahlenquelle und der Detektor in der gleichen Sonde angeordnet. Gemessen wird die Anzahl der reflektierten Streuphotonen, welche umgekehrt proportional zur Dichte ist. Dieses Verfahren ist für beliebige Querschnitte anwendbar. Durchgeführte Messungen fanden Fehlerstellen in bis zu 19 % der Pfähle bzw. Dichtwandelemente, die Fehlerwahrscheinlichkeit nahm mit der Tiefe zu.

Schallwellen zur Integritätsprüfung von Dichtwänden werden ebenfalls empfohlen und verwendet (Franke & Seitz, 1991; Rodatz et al., 1992; Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, 1992; Klingmüller, 1993). Am Wandkopf wird eine Schallwelle in die Wand eingeleitet. Aus der Zeit vom Anfangs- zum Reflexionsimpuls sowie aus der Dichte und dem dynamischen Elastizitätsmodul des Wandmaterials können Fehlerstellen und Wandtiefe ermittelt werden.

## 6 Kosten

Die Kosten von Dichtwänden sind stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig: In Abhängigkeit vom Baugrund, Kontamination, Grundwasserverhältnissen,

Größe der Maßnahme usw. können sich erhebliche Unterschiede ergeben. Anhaltswerte können der folgenden Tabelle von Jessberger (1992) entnommen werden:

Dichtwandssystem	Kosten DM/m <sup>2</sup>	Art der Dichtungswand und Gerät	1 Geräteeinheit	
			Leistung m <sup>2</sup> /h	Baustelleneinrichtung in DM
Schmalwand	60,-	o Schmalwand (Stegdickte d = 8 cm)	30	150.000,-
doppelte Schmalwand	120,-			
Stahlspundwand	240,-	ohne Schloßdichtung und Beschichtung	*	*
gerammte Schlitzwand	200,-		*	*
Schlitzwand Einquasen-Verfahren	100,-	o Einphasen-Schlitzwand mit d = 60 cm · Schlitzwandgreifer · Tiefloffel	12 24	150.000,- 100.000,-
Schlitzwand Zweiphasen-Verfahren	250,-	o Zweiphasen-Schlitzwand mit d = 60 cm · Schlitzwandgreifer · Hydrofräse (ab 15 m Tiefe)	12 15	300.000,- 400.000,-
Schlitzwand Einquasen-Verfahren mit Kunststoffdichtungsbahn	250,-	o Einphasen-Schlitzwand · eingestellte Dichtungsbahn	12	200.000,-

\* Je nach Baugrund und Rammprofil



## 7 Offene Fragen, Wissenslücken

Dichtwände werden für die Altlastensanierung und zur Verhinderung von Schadstoffausbreitungen nach dem heutigen Stand der Technik erfolgreich eingesetzt. Wissenslücken bestehen hinsichtlich

- der Korrosionsbeständigkeit der Stahlspundwände unter der Einwirkung vom Sickerwasser,
- der Methodik des Korrosionsschutzes bei Stahlspundwänden,
- der Bestimmung der mechanischen Eigenschaften feststoffreicher Dichtwandmassen: Das Spannungs-Verformungs-Verhalten soll mit Kompressionsversuchen, einaxialen Druckversuchen, direkten Scherversuchen und Triaxialversuchen ermittelt werden,
- der durchgängigen In-situ-Kontrolle hergestellter Dichtwände,
- des Einflusses der Filtrations-, Penetrations- und Sedimentationsvorgänge auf die Homogenität und Qualität der Dichtwände, dabei lassen sich auch die derzeitigen Kenntnisse der Ölbohrtechnik auf das Dichtwandproblem übertragen,
- der Anwendungsmöglichkeit des Tonminerals Attapulgit, besonders seiner großen chemischen Stabilität wegen,
- neuartiger Stoffe und Modifizierungsmittel, insbesondere organosilanmodifizierter Hydrogele und quarternärer Ammoniumalkylverbindungen, hierbei sind die Langzeitbeständigkeit, die biochemische Stabilität, die Immobilisierung der Schadstoffe und die Bemessungsgrundlagen zu klären,
- der allgemeinen Langzeitbeständigkeit der Dichtwandmaterialien (Oxidationsempfindlichkeit, mechanische Stabilität, chemische Widerstandsfähigkeit, Erosionsstabilität).

## 8 Literatur

Arndts, Chr. (1993): Doppelwandige Dichtwand aus Spundwandprofilen. Patentschrift DE 4205455 C1, Dt. Patentamt.

Arwanitakis, M.; Polak, R. (1984): Schutzbeschichtung von Schmalwandträgern. *Schweißtechnik* (1), S. 2-6. Wien.

Arz, P. (1988): Dichtwandtechnik für seitliche Umschließungen. *Bauwirtschaft. Ausg. B.* 42 (10), S. 831-835.

Arz, P.; Weber, G. (1987): Altlastensanierung durch Umschließung mit einem doppelwandigen Dichtungssystem und deren Kontrollmöglichkeit. *VDI-Berichte* 628, S. 357-384.

Baver, L. D.; Gardner, W. H.; Gardner, W. R. (1972): *Soil Physics*. New York.: John Wiley & Sons Inc.

Blinde, A.; Blinde, J.; Kienzle, G. (1985): Isolierung kontaminierter Standorte, Dauerbeständigkeit von Dichtungswänden. *Berichte der 5. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie*.

Boyes, R. G. H. (1975): *Structural and Cut-off Diaphragm Walls*. London, England: Applied Science Publishers Ltd.

Boyes, R. G. H. (1986): *Wider Applications for Slurry Trench Cutoffs*. *Civil Engineering*. June. S. 42-57.

Brandl, H. (1989): Doppelte Umschließung von Deponien mittels des Dichtwand-Kammersystems. In:

Gartung, E. (Hrsg.): *Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien - 1989 - 5. Nürnberger Deponieseminar*. Nürnberg: Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt Bayern, S. 163-189.

Brauns, J.; Charles de Oliveira, L. M. (1987): Abströmung aus Prüflöchern in Dichtwänden. *Zuschrift zum Beitrag von A. Horn in Geotechnik* 9 (1986), S. 37. *Geotechnik* 1, S. 35-37.

Case International Company (1982): *Case Slurry Wall Notebook, Manufacturers Data*. Houston, Texas: Case International Company.

Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1990): *Abfallwirtschaft. Sondergutachten*. Stuttgart: Metzler-Poeschel.

Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. (Hrsg.) (1990): *Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA*. Berlin: Ernst & Sohn.

Düllmann, H.; Geil, M.; Zirfas, J. (1993): *Einkapselung von Sonderabfalldeponien*. In: Jessberger, H. L. (Hrsg.): *Sicherung von Altlasten*. Rotterdam: Balkema.

EA-GDA (1993): *Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA*. 2. Auflage. DGEG (Hrsg.), Berlin: Ernst & Sohn.

Fahn, R. (1973): Die Gewinnung von Bentoniten in Bayern. *Erzmetall* 26 (9), S. 425-476.

- Fischer, D.; Schenkel, W. (1990): Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland, der Schweiz und Österreich. Müll und Abfall 22 (1), S. 2-13.
- Förstner, U. (1990): Umweltschutztechnik. Berlin: Springer.
- Franke, E.; Seitz, J. M. (1991): Empfehlungen des Arbeitskreises 5 der DGEG für dynamische Pfahlprüfungen. Geotechnik 3, S. 139-153.
- Geil, M. (1989a): Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 28.
- Geil, M. (1989b): Ein neuer Baustoff zur Herstellung von Dichtungsschlitzwänden. Wasserwirtschaft (79), S. 58-63.
- German Geotechnical Society for the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (1991): Geotechnics of Landfills and Contaminated Land: Technical Recommendations "GLC". Berlin: Ernst & Sohn.
- Gierschik, H.; Horn, A.; Schweitzer, F. (1987): Dichtwand um den Müllberg München-Großlappen zum Schutz des Grundwassers. Wasserwirtschaft 77 (9), S. 483-488.
- Grim, R. E. (1968): Clay Mineralogy. New York: McGraw-Hill.
- Gläser, E.; Beitinger, E. (1987): Kombinierte Dichtwände zur Abkapselung von Deponien. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Altlasten. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 571-578.
- Grim, R. E.; Guven, N. (1978): Bentonites: Geology, Mineralogy, Properties and Uses. Developments in Sedimentology 24. Amsterdam: Elsevier Scientific.
- Günther, A. (1988): Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten. In: Wolf, K. et al. (Hrsg.): Altlastensanierung '88. Zweiter Internationaler TNO/BMFT-Kongress über Altlastensanierung. Bd. 1. S. 577-593. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Günther, G. (1990): Beständigkeit selbsthärtender Suspension gegenüber kontaminierten landwirtschaftlichen Gewässern. BR Baustoffe, Recycling und Deponietechnik 6 (6), S. 18 -19.
- Hajnal, I.; Márton, J.; Regele, Z. (1984): Construction of Diaphragm Walls. Chichester: John Wiley & Sons. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Hansen, J. E.; FitzPatrick, V. F. (1991): In Situ Vitrification Applications. In: Abstract Proceedings: Third Forum on Innovative Hazardous Waste Treatment Technologies: Domestic and International. Dallas, Texas. June 11-13, 1991.
- Hass, H. J.; Hitze, R. (1988): Chemikalienresistente Dichtwand- und Injektionsmassen zur Einkapselung. In: Franzius, V., Stegmann, R., Wolf, K. (Hrsg.): Handbuch der Altlastensanierung. 5.3.1.2. Heidelberg: R. v. Decker's, G. Schenk.
- Haug, M. D.; Kozicki, P. (1982): Selection Criteria for Slurry Trench Cutoffs. Proc. 1982 Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineers. Montreal: Band 2. S. 721-740.
- Hein, W. (1990): Zur Korrosion von Stahlspundwänden in Wasser. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 67. Karlsruhe. S. 1-39.
- Heitfeld, M. (1989): Geotechnische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Dichtwandmassen bei hohen Beanspruchungen. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie. Heft 33. Aachen: RWTH.
- Hermanns, R.; Meseck, H.; Reuter, E. (1987): Sind Dichtwandmassen beständig gegenüber den Sickerwässern aus Altlasten? In: Meseck, H. (Hrsg.): Dichtwände und Dichtsohlen. Fachseminar 02./03. Juni 1987. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 23. S. 113-153.
- Hitze, R. (1987): Einsatz der Schadstoffresistenten DynagROUT-Abdichtungsmaterialien, geschildert an konkreten Beispielen der Schadstoff-Umschließung durch Schlitzwandbau und Injektionstechnik. Seminar über Altlasten und kontaminierte Standorte. Ruhr-Universität Bochum.
- Horn, A. (1986): In-situ-Prüfung der Wasserdurchlässigkeit von Dichtwänden. Geotechnik 9 (1), S. 37-38.
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (1992): Integritätsprüfung von Schlitz- und Dichtwänden mit Schallwellen. Prospekt.
- Jefferis, S. A. (1981): Bentonite-Cement Slurries for Hydraulic Cut-offs. Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm.
- Jessberger, H. L. (1990a): Bautechnische Sanierung von Altlasten. In: Arendt, F., Hinsenveld, M., van den Brink W. J. (Hrsg.): Altlastensanierung '90. Dritter Internationaler KfK/TNO Kongress über Altlastensanierung, Karlsruhe. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. S. 1299-1306.

- Jessberger, H. L. (1990b): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA-Empfehlungen. In: Jessberger (Hrsg.): Neuzeitliche Deponietechnik: 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 9-25.
- Jessberger, H. L. (1992): ITVA Arbeitspapier Dichtwände.
- Jessberger, H. L.; Geil, M. (1991): Eigenschaften und Anforderungen an Dichtwandmassen. In: Franzius, V.; Stegmann, R.; Wolf, K.; Brandt, E. (Hrsg.): Handbuch der Altlastensanierung. Heidelberg: R. v. Decker's. 5.3.3.0.2.
- Jessberger, H. L.; Geil, M. (1992): Einsatz von Spundwänden bei Deponien und Altlasten. Geotechnik 4, S. 237-242.
- Jones, G. K. (1963): Chemistry and Flow Properties of Bentonite Grouts. Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. London: Butterworth.
- Kilchert, M.; Karstedt, J. (1984): Schlitzwände als Trag- und Dichtungswände. DIN Deutsches Institut für Normung. (Hrsg.): Band 2. Standsicherheitsberechnung von Schlitzwänden nach DIN 4126. Wiesbaden: Bauverlag.
- Klingmüller, O. (1993): Dynamische Integritätsprüfung und Qualitätssicherung bei Bohrpfehlen. Geotechnik 2, S. 72-80.
- Kutzner, Ch. (1991): Injektionen im Baugrund. Stuttgart: Enke.
- Landesamt für Wasser und Abfall NRW (1985): Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen. Düsseldorf.
- Loxham, M.; Westrate, F. A. (1985): The Use of a Cement-Bentonite Cut-off Wall to Contain Possible Pollutants from a Landfill Containing Highly Polluted Dredging Spoils. Engineering Geology, Amsterdam: 21 (3-4), S. 359-365.
- Maini, K. S. (1987): Testing of Bentonite Suspensions. Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik der Technischen Universität München. Floss, R. (Hrsg.): Schriftenreihe 9. München.
- Meseck, H. (1981): Technologie der Dichtwandmassen. Beton-Informationen. Beton-Verlag GmbH. Heft 3.
- Meseck, H. (1987a): Dichtwände mit eingestellten Kunststoffbahnen (Kombinationsdichtwände). In: Meseck, H. (Hrsg.): Dichtwände und Dichtsohlen. Fachseminar 02./03. Juni 1987. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 23. S. 155-170.
- Meseck, H. (1987b): Mechanische Eigenschaften von mineralischen Dichtwandmassen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 25.
- Milcarek, W., Fischer, M. (1986): Stand und Erfahrungen bei der Herstellung von Dichtungswänden für Grundwasserabriegelungen. Neue Bergbautechnik 4, S. 128-133.
- Müller-Kirchenbauer, H. (1969): Untersuchungen zur Eindringung von Injektionsmassen in porigen Untergrund und zur Auswertung von Probeverpressungen. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Heft 39.
- Müller-Kirchenbauer, H. (1972): Einflüsse der Filtratbildung auf die Stabilität von Schlitzwänden. Vorträge der Baugrundtagung 1972. Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. S. 843-860.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Walz, B.; Kilchert, M. (1979): Vergleichende Untersuchung der Berechnungsverfahren zum Nachweis der Sicherheit gegen Gleitflächenbildung bei suspensionsgestützten Erdwänden. In: Müller-Kirchenbauer, H. (Hrsg.): Berechnungsverfahren zum aktiven räumlichen Erdruck. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin. S. 1-118.
- Müller-Kirchenbauer, H. (1987): Ergebnisse der Dichtwandtestmaßnahme im Rahmen des F+E-Vorhabens bei der Sanierung der Sonderabfalldeponie Sprendlingen. Symposium "Erfahrungen bei der Sanierung der Sonderabfalldeponien Gerolsheim und Sprendlingen". Ministerium für Umwelt und Gesundheit des Landes Rheinland-Pfalz, 16. Februar 1987, Mainz.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Friedrich, W.; Günther, K.; Nußbaumer, M.; Stroh, D. (1990): Inversionsströmung und Langzeitbeständigkeit von Dichtmassen. In: Weber, H. H. (Hrsg.): Altlasten. Erkennen, Bewerten, Sanieren. Berlin: Springer. S. 194-197.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Rogner, J.; Schlötzer, C. (1991): Einfluß von Filtratwachstum und Feststoffverlagerungen auf die Qualität, die Herstellbarkeit und die Kosten von Dichtungsschlitzwänden. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 217-224.
- Münnich, K.; Collins, H.-J. (1991): Hydraulische Unterhaltung eines Depopnieabdichtungssystems. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 119-132.

- Nussbaumer, M. (1987): Beispiele für die Herstellung von Dichtwänden im Schlitzwandverfahren. In: Meseck, H. (Hrsg.): Dichtwände und Dichtsohlen. Fachseminar 02./03. Juni 1987. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 23. S. 21-34.
- Nussbaumer, M. (1990): Einkapselungsverfahren. In: Brandt, E. (Hrsg.): Altlasten. 2. Aufl., S. 125-136. Taunusstein: Eberhard Blottner.
- Preiss, K.; Weber, H.; Caiserman, A. (1978): Integrity testing of bored piles and diaphragm walls. *The Civil Engineer in South Africa* 20 (8), S. 191-196. Johannesburg.
- Pye, N. (1993): Persönliche Mitteilung.
- Rettenberger, G. (1986): Entgasung und Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Sonderabfalldeponie Gerolshausen. In: Fehlau, K.-P., Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1985. Berlin: E. Schmidt.
- Rodatz, W. (1991): Spannungs-Verformungs-Verhalten feststoffreicher Dichtwandmassen für den Grundwasserschutz bei Deponien und Altlasten; Erarbeitung praxisnaher Prüfmethode und Bewertungskriterien. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 224-230.
- Rodatz, W.; Meseck, H.; Meier, K. (1992): Baugruben in Spundwandbauweise. *Geotechnik* 4, S. 227-236.
- Roth, S. (1988): Eignung von Stahlspundwänden für Einkapselung von Altlasten. In: Franzius, V.; Stegmann, R.; Wolf, K.; Brandt, E. (Hrsg.): Handbuch der Altlastensanierung. Heidelberg: R. v. Decker's. 5.3.1.5.1.
- Roth, S. (1990): Umschließung von Altstandorten mit Stahlspundwänden. Vortrag im Rahmen der Fachtagung des Umweltinstitutes Offenbach GmbH am 29. und 30. Nov. 1990. Hoesch Stahl.
- Roth, R. J.; Kallo, J. D. (1992): Landfill Gas Collection and Destruction at Bems/Big Hill Landfill. In: Abstract Proceedings: International Symposium on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe. 12.-16. Okt. 1992. Budapest. S. 67.
- Rust, H. (1992): Stahl im Wasserbau – ein Dauerthema im HTG-Ausschuß für Korrosionsfragen. *Geotechnik* 4, S. 215-217.
- Schulze, B. (1991): Resistenz von Feinstzement-Suspensionen gegen chemischen Angriff. *Bauingenieur* 66, S. 85-90.
- Schulze, B.; Brauns, J.; Schwalm, I. (1991): Neuartiges Baustellen-Meßgerät zur Bestimmung der Fließgrenze von Suspensionen. *Geotechnik* 3, S. 125-131.
- Schulze, B. (1992): Injektionssohlen – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe. Heft 126.
- Schweitzer, F. (1988): Die langzeitige Wasserdurchlässigkeit von Dichtwänden und deren Prognose. *Geotechnik* 3, S. 153-157.
- Seitz, J. (1987): Zementfreie Dichtwandmasse – Großversuch zur baupraktischen Anwendung. *Baustoff-Recycling* (5), S. 2-3.
- Seitz, J. M.; Horn, W. (1990): Herstellung von Schlitz- und Dichtwänden mit der Schlitzwandfräse. *B aktuell*. S. 42-44.
- Simons, H.; Kruse, T.; Meseck, H. (1986): Deponieabdichtungen aus zementstabilisierten Bentonitsuspensionen. Abschlußbericht über Forschungsarbeiten zur Entwicklung und Prüfung von Dichtwandmassen, gefördert vom Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst. Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig.
- Simons, H.; Reuter, E. (1985): Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 18.
- Spooner, P.; Wetzel, R.; Spooner, C.; Furman, C.; Tokarski, E.; Hunt, G.; Hodge, V.; Robinson T. (1985): *Slurry Trench Construction for Pollution Migration Control*. Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications.
- Steffen, H. (1991): Diskussionsbeitrag zu: Echle, W., Düllmann, H.: Redoxabhängige mineralogische und chemische Stoffumsätze in tonigen Deponiebasisabdichtungen und ihre bodenmechanischen Auswirkungen. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): 3. Mitteilungsheft. BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.
- Stief, K. (1985a): Anforderungen an die Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen. In: Knipschild, F. W. (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beiheft Nr. 22 zu Müll und Abfall. S. 9-12. Berlin: E. Schmidt.
- Stief, K. (1985b): Doppelte Deponiebasisabdichtungssysteme. *Müll und Abfall* 17 (8), S. 253-258.

- Stief, K. (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll und Abfall 18 (1), S. 15-20.
- Strobl, T. (1982): Ein Beitrag zur Erosionssicherheit von Einphasen-Dichtwänden. Wasserwirtschaft (72), S. 269-272.
- Stroh, D.; Sasse, T. (1987): Beispiele für die Herstellung von Dichtwänden im Schlitzverfahren. In: Meseck, H. (Hrsg.): Dichtwände und Dichtsohlen. Fachseminar 02./03. Juni 1987. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig. Heft 23. S. 35-58.
- Süd-Chemie: Was ist Bentonit? Wissenswertes über einen wertvollen und vielseitigen Rohstoff. Erläuterungsprospekt.
- TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.
- Tedd, P.; Paul, V.; Lomax, C. (1993): Investigation of an eight year old slurry trench cut-off wall. Proceedings Green '93 Conference. Bolton, England.
- Thomé-Kozmiensky, K. J. (1988): Deponie – Ablagerung von Abfällen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. 2. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.
- Tobin, W. R.; Wild, P. R. (1986): Attapulgit: a clay liner solution? Civil Engineering. ASCE. S. 56-58.
- Tóth, S. (1989): Soilcrete-Dichtwand als vorsorgliche Sicherung zur Verhinderung der Ausbreitung von Kontaminationen. Geotechnik 1, S. 1-4.
- Xanthakos, P. P. (1979): Slurry Walls. New York: McGraw-Hill Book Company.
- VE Braunkohlenkombinat Senftenberg (1986): Technik und Technologie für Dichtungswände bis 100 Meter Tiefe. Informationsangebot für wissenschaftlich-technische Ergebnisse.
- Weichert, H. J. (1988): Kenngrößen von Bentonit-Zement-Suspensionen und ihre Bedeutung für die Eigenschaften von Dichtungswandmaterialien. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 62. Karlsruhe. S. 1-194.
- Weiß, F.; Winter, K. (1985): Schlitzwände als Trag- und Dichtungswände. Hrsg: DIN Deutsches Institut für Normung. Band 1. Erläuterungen zu den Schlitzwandnormen DIN 4126, DIN 4127, DIN 18 313. Wiesbaden: Bauverlag. Berlin: Beuth.
- Weber, H. H. (Hrsg.); Fresenius, W.; Matthes, G.; Müller-Kirchenbauer, H.; Storp, K.; Weßling, E. (Mithrsg.) (1990): Altlasten: Erkennen, Bewerten, Sanieren. Berlin: Springer.
- Wienberg, R. (1992): Persönliche Mitteilung.
- Witt, K.-J.; Brauns, J. (1983): Zur Stabilität von Schmalwandsuspensionen im durchströmten körnigen Untergrund. Stuttgart: Wasserwirtschaft 12, S. 2-7.



## O Oberflächenabdichtungssysteme (T. Meggyes)

1	Einführung	173
2	Aufbau und Funktion der Oberflächenabdichtungssysteme	174
2.1	Bewuchs	175
2.2	Rekultivierungsschicht	175
2.3	Entwässerungssystem	175
2.4	Schutzschicht	175
2.5	Abdichtungsschicht	175
2.5.1	Bindige mineralische Dichtung	175
2.5.2	Kapillarsperre	176
2.5.3	Kunststoffdichtungsbahn	176
2.6	Ausgleichsschicht	176
2.7	Gasdränschicht	176
3	Wasserhaushalt und Wasserbewegung	177
4	Deponiegaserfassung	178
5	Rekultivierung	179
6	Abdeckung von Deponien	179
6.1	Überdachung	179
6.2	Zwischenabdeckung	180
7	Offene Fragen, Wissenslücken	180
8	Literatur	181

### 1 Einführung

Das Oberflächenabdichtungssystem\* stellt eine der Barrieren des Multibarrierenprinzips nach Stief (1986) dar. Es dient der Vermeidung des Schadstoffaustrags (Gase) in die Luft und der Niederschlagsinfiltration in die Deponie, um den Sickerwasseraustrag aus der Deponie auf ein Minimum zu senken. Die Folgen zu hoher Sickerwassermengen können sein (Franzius, 1984):

- Einstau des Deponiekörpers mit erhöhter Auslaugung der Abfälle
- Höhere Belastung für die Deponiebasisabdichtung
- Verminderung der Standsicherheit von Böschungen

---

\* Für die Oberflächenabdichtung wird auch die Bezeichnung 'Oberflächenabdeckung' verwendet. Mit Abdeckung werden im Statusbericht Überdachungen und Zwischenabdeckungen bezeichnet (s. Abschnitt 6).

- Erhöhter Aufwand für Sickerwasserbehandlung
- Steigerung der Gasproduktion und Beschleunigung der Abbauprozesse
- mögliche Grundwassergefährdung und seitlicher Austrag belasteter Wässer.

Wegen der Steigerung der Gasproduktion und der Beschleunigung der Abbauprozesse hielt ein Teil der Fachleute lange Zeit die Wasserinfiltration in Hausmülldeponien nicht für schädlich und verlangte keine Dichtheit der Deponieoberfläche. Man hoffte, durch den raschen Abbau der Deponieinhaltsstoffe den stabilisierten Endzustand schneller zu erreichen. Heute herrscht eher die Auffassung, daß eine Deponie der dichten Deckschicht bedarf. In einigen Ländern, wie z. B. Großbritannien, sind Deponien häufig so ausgelegt, daß die Gasproduktion im Vordergrund steht. Eine Oberflächendichtheit wird jedoch auch hier verlangt (National Rivers Authority, North West Unit, 1989; North West Waste Disposal Officers Landfill Liners Sub-Group, 1988; Meggyes, 1993).

Das Oberflächenabdichtungssystem muß folgenden Anforderungen langfristig entsprechen (Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, 1990; Franzius, 1986; Bilitewski et al., 1987; Thomé-Kozmiensky, 1988; Melchior et al., 1990; Melchior et al., 1992; Melchior, 1993; Forster, 1993a):

- Minimierung des Oberflächenwasserzutritts zum Deponiekörper durch Verdunstung, Ableiten und zeitweises Speichern
- Hohe Erosions- und Frostsicherheit
- Unempfindlichkeit gegen Austrocknung, Inkrustation, Setzung, Durchwurzelung und Durchwühlung
- Kontrollierte Gasfassung und Zuleitung zur Abfackelung oder Energieerzeugung
- Rekultivierung: die Oberflächenabdichtung soll meist als Biotop dienen
- Möglichkeit zur Kontrolle, Reparatur oder Erneuerung.

Die wichtigsten Beanspruchungen der Deponieoberflächenabdichtung sind (Günther, 1988):

Physikalische Beanspruchungen

- mechanische Einflüsse
- hydraulische Effekte
- Gasdruck
- Permeation
- Wärme- und Frosteinwirkung
- UV-Strahlung

Chemische Beanspruchungen durch

- Sickerwasser
- Deponiegas
- Gaskondensat

Biologische Beanspruchungen

- Durchwurzelung
- Lochfraß durch Tiere
- mikrobielle Umsetzungsprozesse.

## 2 Aufbau und Funktion der Oberflächenabdichtungssysteme

Unter gemäßigt-humiden Klimaverhältnissen werden die Oberflächenabdichtungssysteme meistens aus einer Kombination von

- Deckschicht
- Wasserdränage
- Dichtschicht
- Gasdränage

aufgebaut (Melchior et al., 1990) und zur Ableitung des Niederschlagswassers mit geeigneter Neigung (Minimum 3 bis 5 %) ausgelegt (Müller-Kirchenbauer et al., 1990a).

Als Dichtungselemente können

- künstliche Materialien (Kunststoffdichtungsbahnen)
- verdichtete bindige Erdstoffe (bindige mineralische Dichtungen)
- nichtbindige mineralische Materialien (Kapillarsperren)
- andere Materialien

eingesetzt werden (Melchior et al., 1992). Der Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems läßt sich anhand der TA Abfall (1991) und TA Siedlungsabfall (1993) sowie der Ausführungen von Jessberger (1990a, 1990b) und Thomé-Kozmiensky (1992) schematisch darstellen:

- Bewuchs
- Rekultivierungsschicht ≥ 1 m
- Entwässerungssystem ≥ 0,3 m
- Kunststoffdichtungsbahn ≥ 2,5 mm
- mineralische Dichtungsschicht ≥ 2 x 0,25 m
- Ausgleichsschicht ≥ 0,5 m
- Gasdränschicht (ggf.)

Die TA Abfall fordert eine Kombinationsdichtung (Kunststoffdichtungsbahn im Preßverbund mit einer mineralischen Dichtschicht) oder Systeme mit nachgewiesenermaßen gleicher oder höherer Wirksamkeit. Für die Deponieklasse I von Siedlungsabfalldeponien ist eine 2 x 0,25 m mineralische Dichtung oder ein gleichwertiges System vorgesehen. Die Kombinationsdichtung wird von den meisten Fachleuten für die Deponieklasse II und III als die effektivste angesehen, sie wird jedoch nicht in allen Ländern in Westeuropa und den USA vorgeschrieben (Forster, 1993a).

Bei der Wahl der einzubauenden Materialien muß man auch die Wirtschaftlichkeit erwägen: Mehrkosten eines teureren Aufbaus müssen durch Einsparungen (z. B. bei der Sickerwasserbehandlung) kompensiert werden.

Bezüglich der in Regelwerken verschiedener Länder vorgeschriebenen Oberflächenabdichtungen wird auf Kapitel B hingewiesen.



## 2.1 Bewuchs

Der Bewuchs stellt für das Oberflächenabdichtungssystem einen Schutz dar und trägt zur Erfüllung von dessen Aufgaben – besonders in puncto Wasserhaushalt – wesentlich bei.

## 2.2 Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht dient dem Pflanzenbewuchs und als Schutz für die darunterliegenden Schichten. Für ihre minimale Dicke (1 m) sind die Frosttiefe und die maximale Wurzeltiefe maßgebend (Rettenberger, 1988; Jessberger, 1990a). Ihre Durchlässigkeit darf nicht kleiner als  $10^{-7}$  bis  $10^{-6}$  m/s sein, deshalb darf sie nicht zu sehr verdichtet eingebaut werden; bei steilen Hangneigungen muß jedoch eine ausreichende Scherfestigkeit erzielt werden (Bahnsen, 1990).

## 2.3 Entwässerungssystem

Das Entwässerungssystem soll das sichere Abführen des aus der Rekultivierungsschicht absickernden Wassers ermöglichen. Die Korngröße der mineralischen Drän-schicht soll 16–32 mm betragen und ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k \geq 10^{-3}$  m/s soll langfristig erhalten bleiben. Für die Entwässerungsschichten werden aber nicht nur mineralische Stoffe, sondern auch Kunststoffe verwendet. Als mineralische Stoffe sind Kiese, Sande und umweltverträgliche Reststoffe (Glasasche, Müllverbrennungsschlacke und Reststoffe des Bergbaus) zu erwähnen. Für Geonets, sog. Dränmatten kommt zumeist Polyethylen (PE), aber auch Polypropylen (PP), Polyamide (PA), Polyester (PES) und Polyacrylnitril (PAC) in Frage. Für die Wasserfassung werden DN300-PE-HD- oder PVC-Rohre eingesetzt (Jessberger, 1990b). Weiteres zu Entwässerungssystemen über der Oberflächenabdichtung und zu Geonets siehe Kapitel C.

## 2.4 Schutzschicht

Wie bei Basisabdichtungen, werden auch bei Oberflächenabdichtungen geotextile bzw. mineralische Schichten (PE- und PP-Vliese, Sandmatten, Bentonitmatten u. a.) zum Schutz der Kunststoffdichtungsbahnen eingebaut. Näheres zu Schutzschichten siehe Kapitel D.

## 2.5 Abdichtungsschicht

Die Abdichtungsschicht hat die Aufgabe, das Eindringen des Wassers in den Deponiekörper und die Gasemission in die Atmosphäre zu unterbinden.

### 2.5.1 Bindige mineralische Dichtung

Als bindige mineralische Dichtstoffe werden feinkörnige Böden wie Schluffe und Tone, auch mit Bentonitvergiftung, verwendet. Gemischtkörnige Böden mit Zusatzstoffen können ebenfalls eine gute Dichtigkeit

erzielen. Auch aus Schlitzwandaushub kann durch Aufbereitung (intensive Homogenisierung und Bentonitzugabe) ein für die Oberflächenabdichtung geeignetes Mischgut mit in-situ-Durchlässigkeitsbeiwerten zwischen  $1 \cdot 10^{-10}$  und  $9 \cdot 10^{-10}$  m/s hergestellt werden (Müller-Kirchenbauer et al., 1989; 1990c).

Bindige mineralische Dichtungen unterliegen in Basis- und in Oberflächenabdichtungssystemen unterschiedlichen Anforderungen.

- Basis:
  - Dichtigkeit gegen konvektiven Transport von Schadstoffen
  - Retardation der Stoffausbreitung durch Diffusion
- Oberfläche:
  - Dichtigkeit gegen konvektiven Wassertransport
  - Resistenz gegen Durchwurzelung
  - Stoffretention unbedeutender
  - Gefahr durch Setzungen und Austrocknung größer

Daher sind hier nicht "fette" Tone mit hohem Sorptionsvermögen, sondern eher gemischtkörnige, weniger plastische Materialien mit geringerer Schrumpfung gefragt ("Fuller-Kurve").

Obwohl die Abdichtung mit bindigen mineralischen Dichtungen und mit Kombinationsdichtungen Stand der Technik ist und weiterhin praktiziert wird, gibt es einige ungelöste Fragen zur Funktionsweise mineralischer Dichtschichten. Das Aufbringen der bindigen mineralischen Schicht ist hinsichtlich der Herstellung und der Qualitätssicherung schwierig (Melchior et al., 1992). Die Wirksamkeit der von Melchior et al. (1992) untersuchten bindigen mineralischen Dichtungen ohne Kunststoffdichtungsbahn wurde innerhalb weniger Jahre durch austrocknungsbedingte Schrumpfung stark eingeschränkt (siehe auch: Melchior, 1993). Die Tendenz zur sommerbedingten Austrocknung wurde auch in der mineralischen Schicht von Kombinationsdichtungen beobachtet. Aufgrund ihrer Langzeitüberwachung folgern Melchior et al. (1992), daß sich in den mineralischen Dichtschichten bereits nach einer Betriebszeit von einigen Jahren, bedingt durch Mängel beim Einbau sowie durch Austrocknung, grobe Wasserleitbahnen (Makroporen) bilden können. Dem Oberflächenabdichtungssystem nach TA Abfall und insbesondere dem der Deponieklasse I der TA Siedlungsabfall stehen deshalb Melchior et al. (1992) kritisch gegenüber. Bestandteile des Deponiegases reagieren mit den feinblättrigen silikatischen Tonmineralen der mineralischen Schicht (Kohler, 1988): Die Schichtpakete weiten sich, und es kommt zu Einlagerung von organischen Molekülen, was das Quell- und Schrumpfverhalten beeinflussen kann.

### 2.5.2 Kapillarsperre

Die Kapillarsperre besteht aus zwei Schichten durchlässiger Lockersedimente (Melchior et al., 1991; GIBB Environmental Sciences, 1991; Melchior, 1993). Die Grenzfläche zwischen der oberen feinkörnigen Schicht (Kapillarschicht, z. B. Feinsand) und der darunterliegenden grobkörnigen Schicht (Kapillarblock, z. B. Kies) stellt die eigentliche Sperre dar. An dieser Grenzfläche bildet das in die obere Schicht infiltrierende Wasser im ungesättigten Zustand Kapillarmeniskens. Die an den Menisken wirkende Oberflächenspannung und die sehr geringe ungesättigte Wasserleitfähigkeit im Kapillarblock verhindern, daß das Wasser in die grobkörnige Schicht eindringt. Wird die Kapillarsperre mit geeigneter Hangneigung ausgelegt, so kann das Wasser in der feuchten, und daher hoch wasserleitfähigen Kapillarschicht hangabwärts abgeführt werden. Sicker mehr zu als lateral abfließen kann, staut sich das Wasser in der Feinschicht an, und es kommt zu Durchbrüchen über die Schichtgrenze, weil der hydrostatische Druck die Oberflächenspannung übersteigt. Diese Gefahr besteht besonders nach wolkenbruchartigen Regenfällen (GIBB Environmental Sciences, 1991). Bei nachlassender Zusickerung stabilisieren sich Kapillarsperren wieder im ungesättigten Ausgangszustand. Es ist nicht ausreichend geklärt, wie die Gaserfassung in Kapillarsperren gelöst werden kann. Die In-situ-Untersuchungen von Melchior et al. (1990, 1992) und Melchior (1993) ergaben eine sehr gute Wirksamkeit einer erweiterten Kapillarsperrendichtung. Von der Kapillarsperre wird eine geringere Setzungsempfindlichkeit erwartet als von bindigen Materialien. Langzeiterfahrungen über Kapillarsperren liegen jedoch noch nicht vor.

### 2.5.3 Kunststoffdichtungsbahn

Der bei Oberflächenabdichtungen meist zum Einsatz kommende Kunststoff ist das PE-HD. 2,5 mm dicke verschweißte PE-HD-Bahnen im vollflächigen Preßverbund mit der mineralischen Dichtung sind als Stand der Technik zu bezeichnen.

Bei einem Oberflächenabdichtungssystem muß mit größeren Setzungen gerechnet werden als im Basisbereich einer Deponie. Heute in Deutschland zugelassene PE-HD Dichtungsbahnen können Verformungen bis zu 3 % langfristig schadlos folgen. Bei geneigten Flächen spielt die Standsicherheit und damit das Reibungsverhalten zwischen Kunststoffdichtungsbahnen und angrenzenden Schichten eine besondere Rolle. Kunststoffdichtungsbahnen mit rauher bzw. strukturierter

Oberfläche zur Erhöhung des Reibungsbeiwertes sind für die geneigten Flächen gut geeignet. Der übertragene Scherwiderstand oberhalb der Kunststoffdichtungsbahn darf nicht größer sein als der auf der Unterseite, um eine Überbelastung aus Dauerzugbeanspruchung zu vermeiden (BAM, 1992; Taprogge, 1989). Hierzu werden Strukturen auf der Unterseite der Kunststoffdichtungsbahn angebracht, um den "unteren" Reibungsbeiwert zu erhöhen. Im Einzelfall muß für die mögliche Böschungsneigung ein Standsicherheitsnachweis geführt werden. Sogenannte "Spike"-Bahnen mit ausgeprägten spikeartigen Strukturen werden nicht zugelassen (Müller, 1993). Ausführlicheres zu den Kunststoffdichtungsbahnen siehe Kapitel E, zum Zusammenwirken Dichtungsbahn – angrenzende Schicht siehe Kapitel M.

In der TA Siedlungsabfall wird gefordert, daß für Oberflächenabdichtungen bevorzugt zugelassene Bahnen aus Recyclat verwendet werden. Nachteilig ist bei Recyclaten, daß sich insbesondere bei unklarer Herkunft oft eine breite Spannweite der Materialkennwerte ergibt, wodurch Aussagen über das Kurz- und Langzeitverhalten kaum möglich sind. Koextrudierte Bahnen mit elektrisch leitenden Schichten, mit denen Lecks geortet werden können, stellen eine für die Oberflächenabdichtung interessante Neuentwicklung dar.

Die Dichtelemente werden häufig in Kombination eingesetzt, damit sich ihre Vorteile ergänzen und die Nachteile minimiert werden. Häufig wird ein redundanter Aufbau verwendet, wovon man sich eine erhöhte Gesamtstandzeit verspricht. Die Widerstandsfähigkeit der mineralischen Schicht gegen Rißbildung, Durchwurzelung und Lochfraß kann durch Bewehrung (Geotextil, Geogitter, Kunststoffvlies) und günstige Kornverteilung erhöht werden (Thomé-Kozmiensky, 1988). Ihre Durchsickerung wird durch eine gute, hangabwärts gerichtete Wasserabführung durch das Dränsystem begrenzt.

### 2.6 Ausgleichsschicht

Die Ausgleichsschicht stellt einen Ausgleich und eine Verdichtungsunterlage dar, die die Verdichtung der mineralischen Dichtschicht ermöglicht.

### 2.7 Gasdränschicht

Die Gasdränschicht dient der Fassung und der Ableitung des Deponiegases zu einem Gassammelsystem und besteht aus ähnlichen Bauelementen wie die Entwässerungsschicht.

### 3 Wasserhaushalt und Wasserbewegung

Der Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungen wird durch folgende Größen bestimmt (Melchior et al., 1992):

- Abflüsse
  - Oberflächenabfluß
  - lateral Abfluß in der Deckschicht
  - Dränageabfluß
  - Durchsickerung der Dichtung
- bodenhydrologische Größen
  - Wassergehalt
- meteorologische Größen
  - Niederschlag
  - Verdunstung (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Strahlungsbilanz).

Die Einsickerung von Niederschlagswasser in die Deponie wird in erster Linie durch die Verdunstung und den Dränageabfluß begrenzt. Nach den Messungen von Urban (1987) und Melchior et al. (1992) werden zwei Drittel des Wasserinputs (Niederschlag  $\pm$  Änderung des Wasservorrats im Boden) durch die Vegetation und die Bodenoberfläche verdunstet. Fast ein Drittel fließt in der Dränage oberhalb der Dichtung lateral ab. Der Oberflächenabfluß, der laterale Abfluß in der Deckschicht und die Durchsickerung intakter Dichtungen umfassen nur einen geringen Teil der Wasserbilanz. Demgemäß sind die Durchlässigkeit und die Hangneigung sowie die Vegetation maßgebend für die Infiltrationsmenge (Reuter, 1986). Aus einer einfachen Modellüberlegung erhält Schäfer (1990) für das Verhältnis der in die Abdichtungsschicht versickernden und in der Drän-schicht abfließenden Wassermengen, daß dieses von dem Druckgradienten und der Wasserspiegelhöhe in der Drän-schicht sowie von den *k*-Werten der beiden Schichten abhängt. Die zahlenmäßigen Ergebnisse stehen mit den obigen Meßergebnissen im Einklang. Ein weiteres Fazit ist, daß lediglich der *k*-Wert der Abdichtungsschicht und nicht ihre Dicke für den Versickerungsanteil maßgebend ist. Die Schichtdicke spielt nur insoweit eine Rolle, als sie aus bautechnischer Sicht den erforderlichen Verdichtungsgrad sichern muß. Mehrere Lagen erhöhen die Sicherheit gegenüber witterungsbedingten Einbaufehlern. Zu der Wasserbewegung in Bodenschichten siehe Kapitel H.

Wessolek et al. (1992) zeigen, daß bei Südhängen die Grundwasserneubildung kleiner, die Evapotranspiration jedoch größer ist als bei Nordhängen. Ost- und Westhänge weisen eine mittlere Ausprägung bei der Größen auf. Die Unterschiede in beiden Größen nehmen mit zunehmender Hangneigung zu und sind auch von der Art der Vegetation abhängig.

Zur Untersuchung des Wasserhaushaltes in Oberflächenabdichtungen wurden Testfelder gebaut, an denen sich der Wasserhaushalt bilanzieren läßt (Ehresmann et al., 1986; GIBB Environmental Sciences, 1991; Street & Forster, 1991; Melchior & Miehlich, 1989; Melchior et al., 1992; Forster, 1993b). Die Kombinationsdichtung, die mineralische Dichtung ohne Kunststoffdichtungsbahn und die Kapillarsperre werden dabei am eingehendsten untersucht. Das durch die Dichtung tretende Wasser wird in kiesgefüllten PEHD-Wannen gefaßt und in seiner Menge gemessen (Melchior et al., 1992; Melchior, 1993). Die zu prüfenden Testfelder werden aus deponieüblichen Baustoffen und mit deponieüblichen Verfahren hergestellt (Melchior et al., 1992). Die Messungen an den Testfeldern liefern jährlich mehrere Millionen Daten (Berger & Melchior, 1989), ihre Auswertung fordert den Einsatz hochentwickelter Simulations- und EDV-Methoden. Zu Rechenverfahren siehe Kapitel H, Abschnitt 6.

Sehr kleine Prüfgrößen, wie z. B. die Durchsickerung der Dichtung, müssen durch voneinander unabhängige Verfahren und verschiedene Meßinstrumente sowie an ausreichend großen Testfeldern erfaßt werden (Miehlich & Melchior, 1988; Melchior & Miehlich, 1989). Die Redundanz der Meßmethodik umfaßt sowohl direkte als indirekte Messungen.

Infiltrationsraten in verschiedenen Oberflächenabdichtungen wurden von Mattravers & Robinson (1991) unter tropischen Wetterbedingungen (2.500 mm/a Niederschlag, trockener Winter, heißer Sommer) untersucht. Entsprechend einem geplanten Deponiebetrieb wurden Testfelder mit einer täglichen Zwischenabdeckung, einer provisorischen Oberflächenabdeckung und einer endgültigen Oberflächenabdichtung angelegt. Eine ausgesprochene Dichtschicht gemäß Abschnitt 2.5 war nur bei der Oberflächenabdichtung vorhanden. Die Hauptparameter der Testfelder und die Ergebnisse der Untersuchung waren:

	Böschungsneigung	Dicke, m	Infiltration, %	
			Durchschnitt	Maximum
Tägliche Zwischenabdeckung	1:20	0,25-0,50	10	75
Provisorische Oberflächenabdeckung	1:3	0,50	4	25
Endgültige Oberflächenabdichtung	1:4	1,50	0	2

## 4 Deponiegaserfassung

Das Oberflächenabdichtungssystem muß eine Gasemission in die Atmosphäre und eine Migration in die Umgebung verhindern sowie eine ausreichend hohe Methankonzentration für die Gasverwertung gewährleisten (Rettenberger, 1986). Die Entgasung dient aber in erster Linie dem Immissionsschutz (Rettenberger, 1990; Martens & Weber, 1990; TA Siedlungsabfall, 1993) und nur an zweiter Stelle der Energieerzeugung. Eine gute (gasundurchlässige) Oberflächenabdichtung erlaubt einen Gaserfassungsgrad von über 70 %; ohne Abdichtung sind nur 50 % zu erreichen (Martens & Weber, 1990).

Müller-Kirchenbauer et al. (1990b) zeigten, daß die Gasdurchlässigkeit tonmineralischer Dichtungen – im Gegensatz zur Wasserdurchlässigkeit – stark vom Einbauwasseranteil abhängt. Bei  $I_c < 0,85$  ( $w > 20$  %) bleiben die Tone bei Beanspruchungsdrücken unter 250 kPa gasundurchlässig, erst bei höheren Drücken strömt das Gas durch, wobei der Gasdurchlässigkeitsbeiwert unter  $10^{-12}$  m/s liegt. Bei  $I_c > 0,85$  ( $w < 20$  %) bilden sich durchgängige Gasporenkanäle, und die  $k$ -Werte für Gas erreichen sogar  $10^{-4}$  m/s. Um Gasdichtheit zu gewährleisten, ist deshalb der aus Standsicherheitsgründen zulässige maximale Einbauwasseranteil einzustellen. In-situ-Messungen von Figueroa (1990) in einer Geschiebemergelschicht haben Gasdurchlässigkeitsbeiwerte von  $10^{-9}$  bis  $10^{-6}$  m/s bei Wassergehalten oberhalb des Proctor-Optimums geliefert, die infolge vertikaler Mikrorisse eine bis zwei Zehnerpotenzen höher lagen als die Laborergebnisse. Der Grund dafür war, daß die zusammenhängenden Poren bzw. das natürliche Gefüge des Dichtmaterials bei der Verdichtung nicht ausreichend zerstört wurden. Die Diffusions- (in  $\text{m}^2/\text{s}$ ) und Durchlässigkeitskoeffizienten (in  $\text{m}^2$ ) von Methan, Hexan, Dichlormethan, Toluol und Trichlorethan für Tone fallen exponentiell mit zunehmendem Wassergehalt im Bereich 3 % bis 26 % (di Muzio et al., 1990). Der Diffusionskoeffizient fällt im Bereich von  $10^{-6}$  bis  $10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$  mit zunehmender Molmasse, der Gasdurchlässigkeitskoeffizient nimmt mit steigender Gasviskosität von  $10^{-14}$  bis  $10^{-18}$   $\text{m}^2$  ab. Die ermittelten Wasserdurchlässigkeiten (in m/s) betragen zwischen  $10^{-8}$  und  $10^{-10}$  m/s.

Zur Erfassung des Deponiegases können zwei Methoden angewendet werden (Rettenberger, 1987): Das Deponiegas wird entweder durch den Eigendruck aus der Deponie gedrückt (passive Entgasung) oder durch Pumpen abgesaugt (aktive Entgasung). In der Deponiepraxis wird die aktive Entgasung wegen des höheren Erfassungsgrades bevorzugt. Die passive Entgasung ist nur bei Altdenonien in Betracht zu ziehen (TA Siedlungsabfall, 1993).

Die der Gasentnahme dienenden rohrförmigen vertikalen Gasbrunnen werden mit großen Durchmesser (0,6–1,2 m) ausgelegt. Die Perforation der Brunnenwandung macht etwa 10 % der gesamten Mantelfläche aus. Gasbrunnen können auch nachträglich abgeteufelt werden, dies ist leichter, wenn der Müll in Ballen abgelagert wird. Die Gasfassung kann auch mittels Kies- oder Schotterssäulen erfolgen (Bothmann, 1987). In der Gasverteilerschicht (Gasdränschicht) annähernd horizontal verlegte Gasrigolen mit Gasdränrohren (Kollektoren) in Schotterpackung gleichen die Inhomogenitäten der Gasentwicklung im Deponiekörper aus (Dernbach, 1989; Rettenberger, 1990). Die sich an die Gasbrunnen anschließenden Gassammelrohre können an eine Ringleitung am Deponierand angeschlossen oder als Einzelleitungen verlegt werden (Tönsmann, 1988). Die bei einigen Deponien praktizierte tägliche Zwischenabdeckung zur Geruchs- und Staubekämpfung mindert die Gasdurchlässigkeit im Deponiekörper und beeinträchtigt dadurch die Gasgewinnung.

Das Deponiegas von Hausmülldeponien enthält durchschnittlich 65 Vol.-% Methan und 35 Vol.-% Kohlendioxid (Ramke & Brune, 1990; Brune, 1991) jedoch auch Schadstoffe. Wasserdampf,  $\text{H}_2\text{S}$ , FCKW, höhere KW müssen entfernt werden, in modernen Anlagen wird eine Aufbereitung bis hin zu Erdgasqualität durchgeführt (Wiemer & Widder, 1987; Rautenbach et al., 1990). Die üblichen Verwendungsarten des Deponiegases sind Wärmeerzeugung und Verstromung, wobei letztere mehr Vorteile bietet. Bei den reinen Verstromungsanlagen ergibt sich ein Energie-Wirkungsgrad von 30 % (Ryser, 1987), bei einer Nutzung der Abwärme wird dagegen von über 70 % berichtet (Meggyes, 1993).

Durch die unterschiedlichen Gasdrücke im Deponiekörper und in der umgebenden Atmosphäre entsteht eine Belastung für die Oberflächenabdichtung: Bei passiver Entgasung (Überdruck in der Deponie) tritt ein Druck von unten auf die Dichtung, bei aktiver Entgasung (Unterdruck in der Deponie) von oben auf die Dichtung nach unten auf. Die Ausgleichsschicht bzw. Gasdränschicht hat dabei eine ausgleichende Wirkung, wodurch zumindest nicht punktuelle Belastungen auftreten (Rettenberger, 1988).

Um eine horizontale Gasmigration aus der Deponie zu verhindern, werden Dichtwände, schlitzwandartig ausgebildete poröse Gasdränagen und Gasbrunnen verwendet (Roth & Kallo, 1992; Pye, 1993), hierzu siehe Kapitel N, 3.2 Gasdränagen.

## 5 Rekultivierung

Die Rekultivierung einer endverfüllten Deponie dient deren Eingliederung in die umgebende Landschaft und dem Schutz der Oberflächenabdichtung gegen Witterungseinflüsse.

Den besten Schutz gegen Erosion der Oberflächenabdichtung stellt eine Kombination von Vegetation und Geotextil/Bewehrung dar (Barker, 1992; Knight, 1991). Geotextilien aus flexiblem Polyester mit PVC-Beschichtung in Verbindung mit einem Bewuchs aus Gras, anderen diversen Krautpflanzen und Buschwerk, haben sich bei der Deponierekultivierung am besten bewährt. An stark von der Sonne bestrahlten Stellen kommen dürreresistente Pflanzen zum Einsatz. Die genaue Wahl der Pflanzenarten ist ortsbedingt. Der Bewuchs dämpft die Wirkung von Regen, Wind, Temperatur und Frost. Die Lockerung des Bodens durch Wurzeln erhöht die Infiltration des Regenwassers in die Dränschicht, wodurch sich die Abflußmenge auf der Oberfläche mindern läßt. Die natürliche Bewehrung des Bodens durch die Wurzeln verbessert die bodenmechanischen Eigenschaften, besonders die Böschungsstabilität. Die Evapotranspiration erhöht die Scherfestigkeit durch die Reduzierung des Wassergehaltes in der Deckschicht. Im Gegensatz zu technischen Einrichtungen ist die Vegetation "selbstheilend" und ihre mechanischen Eigenschaften – bis zu einem bestimmten Alter – verbessern sich mit der Zeit. In der Bodenluft der Oberflächenabdichtung eventuell vorkommendes Methan ist für die Wurzeln nicht toxisch, es reduziert lediglich den Sauerstoffgehalt. Das CO<sub>2</sub> ist hingegen giftig, bei 5–10 %iger Konzentration sogar tödlich. Auch die Wärmeentwicklung in der Deponie kann die Pflanzen beeinträchtigen. Die Tonschicht und/oder KDB verhindern u. a. die Gasemission und schützen auch die Pflanzen.

Eine Nachsorge für die Pflanzen ist besonders in den ersten drei Jahren erforderlich, z. B. durch eine Beobachtung des Wasserabflusses und der Gasemission, ggf. durch Pflanzenschutzmittel. Bäume sind außerhalb der rekultivierten Deponiefläche zu pflanzen. Dobson & Moffat (1991) fanden jedoch, daß die Angst vor

Durchwurzelung, ungenügender Standfestigkeit der Bäume infolge zu geringer Wurzellänge auf der Deponiefläche und vor einem anaeroben Bodenmilieu (CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub>) in vielen Fällen unbegründet sei. Das Wachstum der Wurzeln werde durch die hohe Dichte der mineralischen Dichtungsschicht und den Mangel an Sauerstoff verhindert bzw. in andere Richtungen gelenkt. In den USA ist eine geotextile Wurzelbarriere mit Herbizidkapseln entwickelt worden, die durch die Kontrolle des Wurzelwachstums die Abdichtungsschicht schützt (Barker, 1992). Die Wurzeln der meisten Bäume breiten sich vorwiegend in einer Tiefe von 1 m horizontal aus, hierfür ist eine 1–2 m dicke Deckschicht optimal. Dobson und Moffat halten die Aufforstung mit geeigneten Baumarten bei richtiger Deckschichtdicke für praktikabel – eine von vielen umstrittene Ansicht. Melchior (1993) beobachtete z. B. selbst unter einer Grasvegetation bereits nach fünf Jahren eine beginnende Durchwurzelung bindiger mineralischer Dichtungen unter einer Bedeckung von 1 m.

Knight (1992) berichtet über die Sanierung einer mangelhaften Deponieoberflächenabdichtung. Durch eine 0,5 m dicke, nicht verdichtete Dichtungsschicht und eine 0,15 m dicke Deckschicht erfolgte eine Gasemission, die zum Absterben der Vegetation führte. Die neue, 1 m dicke Tonschicht mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s und eine 0,30 m dicke Deckschicht haben einen günstigeren Pflanzenstandort geschaffen: Auf der sanierten Fläche wurde Winterweizen gepflanzt und geerntet. Auf einem Teil der Deponie wurde ein Aufforstungsprogramm gestartet, um Baumwachstum, Wurzeltiefe und die geeignetste Baumart zu ermitteln. Dieser Teil der Deponie war mit inertem Abfall beschickt und mit einer 2 m dicken Deckschicht versehen worden.

Die Rekultivierung von Flugaschedeponien ist wegen des Metallgehaltes und der hohen pH-Werte des Deponieguts besonders schwierig. Kugonic & Gogala (1992) fanden, daß Rainfarn in Symbiose mit einem Pilz (vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza) auf Flugaschedeponien gut wächst.

## 6 Abdeckung von Deponien

### 6.1 Überdachung

Die Überdachung von Deponien ist als eine spezielle (Oberflächen-) Schutzmaßnahme anzusehen. Sie wird vorwiegend in mobiler Ausführung zum Schutz gegen Infiltration des Niederschlagswassers während des Betriebes eingesetzt (Franzius, 1986). Über die vollkommene Unterbindung der Niederschlagsinfiltration an der Sonderabfalldeponie Rondeshagen berichtet Ernst (1989). Die dadurch erzielten Einsparungen an Sickerwasserbehandlung sollen nach Ernst bereits nach zwei

Jahren die Kosten für die Überdachung kompensieren. Die Überdachung der Deponie Wirmsthal bei Bad Kissingen stellt ein Anwendungsbeispiel für Hausmüll und Reststoffe von der Müllverbrennung dar.

Überdachungen werden neuerlich auch mit dem Ziel entwickelt, den Bau von Deponieabdichtungen bei sonst ungünstigen Wetterbedingungen zu ermöglichen. Die derzeit verwendeten Überdachungen sind Metallkonstruktionen mit wiederverwertbarem Dach. Die Stützen sind z. T. als verlorene Stützen geplant. Krath &

Schwarz (1993) berichten über Zelte mit einer Grundfläche von 2500 m<sup>2</sup>, die als Zwischenlager für mineralisches Dichtungsmaterial und zum Witterungsschutz im Baufeld dienen. Die verwendete Konstruktion und Bautechnik (insbesondere Beheizung) ermöglichen den Bau der Kombinationsabdichtung im Winter gemäß den EA-GDA (1990) Empfehlungen und der Richtlinie der BAM (1992).

## 6.2 Zwischenabdeckung

In der Deponiepraxis können längerfristig ruhende Flächen oder Einbauflächen abgedeckt werden (Bothmann, 1987). Die Abdeckung längerfristig ruhender Flächen

kann sowohl durch Kunststoffdichtungsbahnen als auch durch Erdstoffe erfolgen. Kunststoffdichtungsbahnen sind platzsparend und wiederverwendbar; Erdstoffe sind dann vorteilhaft, wenn die Abdeckung als Zwischendichtung erhalten bleibt. Die arbeitstägliche Abdeckung der Einbaufläche dient der Geruchs- und Staubbekämpfung. Hierzu kommen ebenfalls Kunststoffdichtungsbahnen, Bauschutt, Industrieabfall und Erdstoffe zum Einsatz. Die leicht herstellbaren on-site-Kunststoffschäume und aufgespritzten Schichten aus Altpapiermasse haben den Vorteil, daß sie unter Auflast stark zusammengedrückt werden und die Gas- und Sickerwasserbewegung kaum behindern (Meyer et al., 1991; Ashton, 1993; Hull, 1993).

## 7 Offene Fragen, Wissenslücken

Die unter realitätsnahen Bedingungen gewonnenen Erkenntnisse reichen noch nicht aus, die langfristige Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen zuverlässig zu beurteilen. Der Erforschung von Oberflächenabdichtungen unter Feldbedingungen muß weiterhin große Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Um die vorteilhaften Eigenschaften der Kapillarsperre in der Praxis realisieren zu können, müssen folgende Sachverhalte geklärt werden (Melchior et al., 1991):

- Spannweite der Materialeigenschaften
- Dimensionierung von Gefälle, Hanglänge und Fließquerschnitt
- Empfindlichkeit gegenüber Setzungen
- Einfluß einer ungleichmäßigen Zusickerung in die Kapillarschicht über Makroporen
- Ausbildung der Schichtgrenze, Anfälligkeit gegen Suffusion

Für die Gasdichtheit der mineralischen Dichtschichten in Oberflächenabdichtungen ist sowohl die Wasser- als

auch die Gasdurchlässigkeit maßgebend. Da über die Gasdurchlässigkeit der Tone nur wenig Ergebnisse vorliegen, besteht hier ein Forschungsbedarf.

Austrocknungsbedingte Schrumpfungen der mineralischen Schicht stellen auch bei Oberflächenabdichtungen ein Gefahrenpotential dar. Die Untersuchung des Wasserhaushaltes und der Austrocknung ist deshalb auch für Oberflächenabdichtungen von großem Interesse.

Besonders bei Hausmülldeponien sind große Setzungen zu erwarten, wodurch Risse in der mineralischen Dichtschicht der Oberflächenabdichtung auftreten können. Hierfür ist die Selbstheilung von Tonen von Bedeutung (s. Kapitel G, Abschnitt 5).

Da die Verdunstung durch die Vegetation und die Bodenoberfläche für den Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtung maßgebend ist, muß der Rekultivierung von Deponien eine wesentlich größere Bedeutung als bisher beigemessen werden. Zu beachten ist dabei u. a. die Durchwurzelungsproblematik.

## 8 Literatur

- Ashton, S. (1993): Daily Cover – The Use of Urea Formaldehyde Foam on Landfill Sites. Discharge your Obligations. 02.-04. Nov. 1993. Kenilworth, Warwickshire.
- Bahnsen, P. (1990): Konzepte und Ausführungen der Abdeckung der Deponie Georgswerder. Vortrag am 4. Erfahrungsaustausch, 15.-16. 11. 1990. Verbundvorhaben Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten am Beispiel der Deponie Georgswerder. Freie und Hansestadt Hamburg: Umweltbehörde, Amt für Altlastensanierung.
- BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin) (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten. Berlin.
- Barker, D. H. (1992): Vegetation helps reclaim landfill sites. *Pollution Prevention*. 2 (3), S. 59-63.
- Berger, K.; Melchior, S. (1989): Meßdatenerfassung und -verarbeitung in einem Forschungsprojekt zur Untersuchung der Wirksamkeit mehrschichtiger Deponieabdecksysteme (Mülldeponie Georgswerder). In: Jaeschke, A.; Geiger, W.; Page, B. (Hrsg.): *Informatik im Umweltschutz*. 4. Symposium. Karlsruhe, 06.-08. Nov. 1989. Berlin: Springer. S. 319-328.
- Bilitewski, B.; Härdtke, G.; Marek, K. (1987): Anforderungen an die Sonderabfalldeponie der Zukunft. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Deponie. Ablagerung von Abfällen*. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 875-897.
- Bothmann, P. (1987): Dichtungssysteme für Oberflächenabdeckung von Deponien. In: *Fachtagung Die sichere Deponie*. Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ). 05.-06.02.1987. S. 139-152.
- Brune, M. (1991): Ursachen für die Bildung fester und schlammiger Sedimente in Entwässerungssystemen von Hausmülldeponien. Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Braunschweig genehmigte Dissertation. Braunschweig.
- Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1990): *Abfallwirtschaft. Sondergutachten*. Stuttgart: Metzler-Poeschel. S. 442-478.
- Dernbach, H. (1989): Erfassung von Deponiegas. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Deponie. Ablagerung von Abfällen*. 3. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 123-138.
- di Muzio, M.; Rettenberger, G.; Urban-Kiss, S. (1990): Funktion der Oberflächenabdichtung zur Emissionsminderung – Entgasung, Gasdurchlässigkeiten, Restemission. Vortrag am 4. Erfahrungsaustausch, 15.-16. 11. 1990. Verbundvorhaben Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten am Beispiel der Deponie Georgswerder. Freie und Hansestadt Hamburg: Umweltbehörde, Amt für Altlastensanierung.
- Dobson, M. C.; Moffat, A. J. (1991): The Potential of Woodland Establishment on Landfill Sites. In: Department of the Environment Wastes Technical Division (Hrsg.): *Landfill Practices Review Meeting*. 6. Nov. 1991. London.
- EA-GDA (1990): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA. DGE (Hrsg.): Berlin: Ernst & Sohn.
- Ehresmann, J.; Rettenberger, G.; Tabasaran, O.; Urban, S. (1986): Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Oberflächenabdichtungssysteme für die Sonderabfalldeponie Gerolsheim. *Müll und Abfall* 18 (5). S. 183-194.
- Ernst, H. (1989): Vermeidung der Bildung von Sickerwasser durch großflächige Überdachung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): *Deponie. Ablagerung von Abfällen*. 3. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 461-470.
- Figuroa, R. (1990): Einflüsse des Deponiegases auf die obere Abdeckung. Vortrag am 4. Erfahrungsaustausch, 15.-16. 11. 1990. Verbundvorhaben Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten am Beispiel der Deponie Georgswerder. Freie und Hansestadt Hamburg: Umweltbehörde, Amt für Altlastensanierung.
- Fischer, D.; Schenkel, W. (1990): Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen in der Bundesrepublik Deutschland, der Schweiz und Österreich. *Müll und Abfall* 22 (1), S. 2-13.
- Forster, A. (1993a): Landfill Cover Technology within the United Kingdom, the rest of Europe and the United States. *Green '93: Waste Disposal by Landfill*. 28. June – 1. July 1993. Bolton, Lancashire. Band 1. S. 5-15.
- Forster, A. (1993b): Water Balance Evaluation of Different Multi-layered Landfill Final Cover Systems. *Green '93: Waste Disposal by Landfill*. 28. June – 1. July 1993. Bolton, Lancashire. Band 1. S. 161-166.
- Franzius, V. (1984): Wasserwirtschaftliche Integration als Ziel der Deponieplanung. *Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*. Band 17. Bielefeld: Erich Schmidt. S. 211-219.

Franzius, V. (1986): Bedeutung von Oberflächenabdichtungen für Gas- und Wasserhaushalt von Deponien. In: Fehlau, K.-P., Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1985. Berlin: Erich Schmidt.

German Geotechnical Society for the International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (1991): Geotechnics of Landfills and Contaminated Land. Technical Recommendations "GLC". Berlin: Ernst & Sohn.

GIBB Environmental Sciences: Capillary barrier landfill caps. In: Department of the Environment Wastes Technical Division (Hrsg.): Landfill Practices Review Meeting. 06. Nov. 1991. London.

Günther, K. (1988): Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten. In: Wolf, K. et al. (Hrsg.): Altlastensanierung '88. Zweiter Internationaler TNO/BMFT-Kongress über Altlastensanierung. Band 1. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. S. 577-593.

Hull, J. (1993): Recent Developments in the Use of Waste-Paper Based Daily Cover Systems in Europe. Discharge your Obligations. 02.-04. Nov. 1993. Kenilworth, Warwickshire.

Jessberger, H. L. (1990a): Bautechnische Sanierung von Altlasten. In: Arendt, F.; Hinsenveld, M.; van den Brink, W. J. (Hrsg.): Altlastensanierung '90. Dritter Internationaler KfK/TNO Kongress über Altlastensanierung, Karlsruhe. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. S. 1299-1306.

Jessberger, H. L. (1990b): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA-Empfehlungen. In: Jessberger (Hrsg.): Neuzzeitliche Deponietechnik. 2. Deponie-Seminar, Bochum, 10.-11. Oktober 1990. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 9-25.

Knight, L. (1991): Landfill Engineering Advances in UK. Pollution Prevention. 1 (5), S. 75-77.

Knight, L. (1992): Restoration Engineering Takes Shape in UK. Pollution Prevention. 2 (2), S. 53-55.

Köhler, E. E. (1988): Mineralogisch-geochemische Aspekte bei mineralischen Abdichtungen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. 2. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 343-352.

Krath, U.; Schwarz, T. (1993): Kombinationsdichtungsbau im Winter am Beispiel der Zentralen Mülldeponie Eiterköpfe. Müll und Abfall 5, S. 366-374.

Kugonic, N.; Gogala, N. (1992): Fly Ash Recultivation for Vesicular-arbuscular Mycorrhizal Plants. In: Abstract Proceedings: International Symposium on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe. 12.-16. Okt. 1992. Budapest. S. 124.

Martens, J.; Weber, B. (1990): Deponiegas und Sickerwasser – Energiebilanz eines integralen Entsorgungskonzepts. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Lante, D. W. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 459-478.

Mattravers, N.; Robinson, H. (1991): Infiltration of Rainfall into Landfill Sites. Proceedings Sardinia 91. Third International Landfill Symposium. 14.-18. October 1991. S. Margherita di Pula (Cagliari), Italy. S. 889-903.

Meggyes, T. (1993): Über die Deponietechnik in Großbritannien. Müll und Abfall 3, S. 168-177.

Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 22, 330 S.

Melchior, S.; Berger, K.; Rook, R.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (1990): Testfeld- und Traceruntersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Oberflächendichtsysteme für Deponien und Altlasten. Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft. (141), S. 339-347.

Melchior, S.; Berger, K.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (1992): Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 453-475.

Melchior, S.; Miehlich, G. (1989): Field Studies on the Hydrological Performance of Multilayered Landfill Caps. Third International Conference on New Frontiers for Hazardous Waste Management. Sept. 10-13, 1989. Pittsburgh, PA, USA.

Melchior, S.; Steingraber, S.; Miehlich, G. (1991): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. In: August, H.; Holzlöhner, U. (Hrsg.): BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme (Fkz. 1440569). 1. Arbeitstagung 23.-25.09.1991. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. S. 111-118.

Melchior, S.; Vielhaber, B.; Miehlich, G. (1990): Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Oberflächendichtsysteme für Deponien und Altlasten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Lante, D. W. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 177-196.



- Meyer, F.; Bayersdorf, F.; Kasper, H. (1991): Daily cover of landfills with the on site foam system plastsoil. Proceedings Sardinia 91. Third International Landfill Symposium. 14.-18. October 1991. S. Margherita di Pula (Cagliari), Italy. S. 1087-1091.
- Miehlich, G.; Melchior, S. (1988): Hydrologische Untersuchung mehrschichtiger Oberflächenabdichtungssysteme auf der Deponie Georgswerder, Hamburg. In: Franzius, V., Stegmann, R., Wolf, K. (Hrsg.): Handbuch der Altlastensanierung. 5.3.2.1.4. Heidelberg: R. v. Decker's, G. Schenk.
- Müller, W. (1993): Stand der BAM-Zulassungen für Kunststoffdichtungsbahnen in Kombinationsdichtungen. Müll und Abfall 4, S. 282-283.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Friedrich, W.; Günther, K.; Nußbaumer, M.; Stroh, D. (1990a): Oberflächenabdeckung. In: Weber, H. H. (Hrsg.); Fresenius, W.; Matthes, G.; Müller-Kirchenbauer, H.; Storp, K.; Weßling, E. (Mithrsg.): Altlasten: Erkennen, Bewerten, Sanieren. Berlin: Springer. S. 189-194.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Markwardt, W.; Friedrich, W.; Rogner, J.; Ehresmann, J. (1989): Schlitzwandaushub als mineralisches Oberflächenabdichtungsmaterial. Müll und Abfall 21 (1), S. 361-370.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Rogner, J.; Friedrich, W. (1990c): Erfahrungen zur Verwendung von Schlitzwandaushub als Dichtungsmaterial einer Oberflächenabdeckung. Vortrag am 4. Erfahrungsaustausch, 15.-16. 11. 1990. Verbundvorhaben Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten am Beispiel der Deponie Georgswerder. Freie und Hansestadt Hamburg: Umweltbehörde, Amt für Altlastensanierung.
- Müller-Kirchenbauer, H.; Rogner, J.; Markwardt, W.; Friedrich, W. (1990b): Wasser- und Gasdurchlässigkeit von Deponieoberflächenabdichtungen aus bindigen Erdstoffen. Müll und Abfall 22 (1), S. 14-22.
- National Rivers Authority, North West Unit (1989): Earthworks on Landfill Sites.
- North West Waste Disposal Officers Landfill Liners Sub-Group (1988): Guidelines on the Use of Landfill Liners.
- Pye, N. (1993): Persönliche Mitteilung.
- Ramke, H.-G.; Brune, M. (1990): Untersuchungen zur Funktionsfähigkeit von Entwässerungsschichten in Deponiebasisabdichtungssystemen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben FKZ BMFT 145 0457 3.
- Rautenbach, R.; Welsch, K.; Mellis, R. (1990): Einsatz von Membranverfahren zur Methangewinnung aus Deponiegas und zur Sickerwasserbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Lante, D. W. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 397-428.
- Rettenberger, G. (1986): Entgasung und Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Sonderabfalldeponie Gerolsheim. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1985. Berlin: Erich Schmidt.
- Rettenberger, G. (1987): Grundlagen der Entsorgungstechnik und Stand der Deponiegasverwertung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 614-638.
- Rettenberger, G. (1988): Oberflächenabdichtungen bei Sonderabfalldeponien. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. 2. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 440-450.
- Rettenberger, G. (1990): Fortschritte bei der Entgasungstechnik. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Lante, D. W. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen 4. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 451-457.
- Reuter, E. (1986): Übertragung der Ergebnisse von Durchlässigkeitsversuchen an mineralischen Dichtungsmaterialien im Labor auf die Verhältnisse im Feld. In: Fehlau, K.-P.; Stief, K. (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1986. Berlin: Erich Schmidt. S. 31-54.
- Roth, R. J.; Kallo, J. D. (1992): Landfill Gas Collection and Destruction at Bems/Big Hill Landfill. In: Abstract Proceedings: International Symposium on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe. 12.-16. Okt. 1992. Budapest. S. 67.
- Ryser, W. (1987): Aspekte und Probleme der Deponiegasnutzung bei Verwendung von Gasmotoren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 685-710.
- Schäfer, J. (1990): Oberflächenabdichtungen von Deponien - Dichtheit und ihre Einflußfaktoren. Müll und Abfall 22 (7), S. 427-432.
- Stief, K. (1986): Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. Müll und Abfall 18 (1), S. 15-20.
- Street, A.; Forster, A. (1991): Performance of Landfill Capping Systems. In: Department of the Environment Wastes Technical Division (Hrsg.): Landfill Practices Review Meeting. 6. Nov. 1991. London.

TA Abfall (1991): Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0670. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-136.

TA Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. In: Schmeken, W.: TA Abfall, TA Siedlungsabfall. 3. Aufl. Köln: Deutscher Gemeindeverlag, W. Kohlhammer. Und in: Müll-Handbuch. Band 1, 0675. Berlin: Erich Schmidt. S. 1-52.

Taprogge, R. (1989): Kunststoff-Dichtungsbahnen bei der Einkapselung von Deponien – Aufbau, Anforderungen und Verlegung, Basisabdichtungen, Oberflächenabdichtungen, Umschließung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. 3. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 445-459.

Thomé-Kozmiensky, K. J. (1992): Deponien und Altlasten – Betrachtungen, insbesondere zur Abdichtung, vor dem Hintergrund von TA Abfall und TA Siedlungsabfall – In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten, Grundkursus. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 5-51.

Thomé-Kozmiensky, K.J.(1988): Deponie – Ablagerung von Abfällen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. 2. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 1-145.

Tönsmann, F. (1988): Auslegung und Ausschreibung von Gaserfassungs- und -verwertungssystemen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Deponie. Ablagerung von Abfällen. 2. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik. S. 666-694.

Urban, S. (1987): Gestaltung einer dichten Deponieabdeckung – Resultate eines Testprogramms. In: Zeitgemäße Deponietechnik. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft. Band 24. Bielefeld: Erich Schmidt. S. 123-148.

Wessolek, G.; König, R.; Renger, M.; Roth, C.; Bohl, H.; Plagge, R. (1992): Entwicklung und Anwendung von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen für Hangstandorte. Bodenökologie und Bodengenese. Heft 8. Fachgebiet Bodenkunde und Regionale Bodenkunde, Institut für Ökologie, Technische Universität Berlin.

Wiemer, K; Widder, G. (1987): Emissionsminimierung durch thermische Deponiegasbehandlungsanlagen. Franzius, V. (Hrsg.): Deponiegasnutzung. Beiheft 26 zur Müll und Abfall. Berlin: Erich Schmidt. S. 16-21.

## P Abdichtungssysteme mit Asphalt (H. August)

1	Einleitung	185
2	Die Asphaltdichtung im Vergleich mit anderen Dichtungssystemen	186
3	Herstellbarkeit und Einbau	188
4	Qualitätssicherung	188
5	Kurz- und Langzeitverhalten von Asphalten unter den Bedingungen von Deponien für Siedlungs- und Sonderabfälle	191
5.1	Chemische Beständigkeit	191
5.2	Widerstandsfähigkeit gegen physikalische Einwirkungen	192
5.3	Beständigkeit gegen biologische Angriffe	193
5.4	Alterung von Asphalt	195
5.4.1	Alterungsmechanismen, Vorhersage der Einsatzdauer	195
5.4.2	Untersuchungen zur Alterung, ausgebaute Asphaltproben	198
5.5	Praxiserfahrungen aus freigelegten Deponien	201
6	Durchlässigkeit von Asphaltdichtungen	202
6.1	Strömungsdurchgang von Flüssigkeiten (Konvektion)	202
6.1.1	Laboruntersuchungen zum konvektiven Durchgang	202
6.1.2	Erfahrungen zur Wasserdichtigkeit von Deponien, Dämmen und Becken mit Asphalt-Betondichtungen	203
6.2	Durchlässigkeit für KW bzw. CKW (diffusiv)	204
7	Ausblick	206
8	Literatur	206

### 1 Einleitung

Seit Mitte der 80er Jahre hat sich in Deutschland zunehmend die Kombinationsdichtung als Standarddichtung im Bereich der Deponien für Siedlungs- und Sonderabfälle durchgesetzt. Sie besteht aus einem Werkstoffverbund aus einer mineralischen Dichtungskomponente geringer Porosität ( $k$ -Werte  $< 10^{-9}$  m/s) und einer porenfreien Kunststoffdichtungsbahn mit hervorragender Widerstandsfähigkeit gegen biologische und chemische Angriffe in Verbindung mit guten mechanischen Eigenschaften. Die Herstellung der Dichtungsbahn mit definierten Eigenschaften ist als industrielles Produkt reproduzierbar möglich, und auch die einwandfreie Herstellung der Kombinationsdichtung vor Ort wird von vielen Verlegefirmen beherrscht und ist Stand der Technik. Trotzdem muß festgestellt werden, daß der Einbau der Dichtungsbahn und die Herstellung der Fugenähte recht hohe Ansprüche an den Planer, den Verlegetrupp und die qualitätssichernde Eigen- und Fremdüberwachung stellen, was sich in den Herstellungskosten niederschlägt. Darüber hinaus bedarf es auch

nach der Herstellung des Dichtungssystems bis hin zum Einbau der ersten 1 bis 2 m Müll einer gewissen Sorgfalt, soll das relativ empfindliche Dichtungssystem aus Dichtungsbahn und mineralischer Dichtung nicht durch die den Abfall einbringenden und verdichtenden Baumaschinen beschädigt werden. Dem Einsatz der Kombinationsdichtung sind im Böschungsbereich Grenzen gesetzt, da es, abhängig von der Oberflächenstruktur der Dichtungsbahn und den Eigenschaften des Auflagers, von bestimmten Böschungsneigungen an zu Standsicherheitsproblemen kommen kann. So ist es naheliegend, daß über Alternativen zu der Kombinationsdichtung nachgedacht wird; um so mehr, als die TA Abfall anstelle des dort festgelegten Aufbaus der Kombinationsdichtung über eine Öffnungsklausel den Einsatz alternativer Dichtsysteme ausdrücklich möglich macht, um die technische Weiterentwicklung zu unterstützen. Voraussetzung ist, daß die "Gleichwertigkeit" zur Kombinationsdichtung nachgewiesen wird. – Obwohl die Arbeiten des Arbeitskreises zur Bewertung von Deponieabdichtungs-

systemen (AK BEDAS) beim Umweltbundesamt in Berlin zur Aufstellung von Kriterien zum Nachweis der Gleichwertigkeit noch nicht abgeschlossen sind (vgl. Engelmann, 1992), können einige Kriterien schon genannt werden, die in der Fachwelt unbestritten sind. Hierzu gehören u. a. eine ausgezeichnete Widerstandsfähigkeit der Werkstoffe gegen chemische und biologische Angriffe. Wissenschaftlich fundierte Abschätzungen der Lebensdauer müssen, sofern die Kunststoffkomponente in der Kombinationsdichtung durch andere Bau- bzw. Werkstoffe ersetzt werden soll, mindestens 50 bis 100 Jahre ergeben, und die Redundanz bzw. das Vermögen des Dichtungssystems, Fehler auszugleichen, muß mindestens so hoch sein wie bei der Kombinationsdichtung.

Wahrscheinlich stimuliert durch die Tatsache, daß in den Jahren 1979 bis 1992 insgesamt 23 Deponien mit einer durchschnittlichen Fläche von je ca. 1,5 ha mit Asphaltbeton abgedichtet wurden (Ryser, 1993), sind einige Publikationen zur Asphaltabdichtung erschienen, die sich für den Einsatz der Asphaltabdichtung aussprechen. Doell (1990) sieht in der Asphaltabdichtung in Kombination mit mineralischen Dichtungsschichten die Problemlösung, um die hauptsächlichsten Mängel der Kombinationsdichtung, die er in den "relativ hohen Permeationsraten und den bodenmechanischen Problemen" sieht, zu beheben. Nach Doell scheiterten Abdichtungsversuche in den 80er Jahren mit Asphalt in den USA nur deshalb,

weil dort übliche Straßenasphalte zum Einsatz kamen, die für die Deponie nicht geeignet sind (vgl. auch Ryser, 1993). Arand et al. (1992a) führen aus, daß von "Fachleuten" der Einsatz von Asphalt als Deponieabdichtung in Erwägung gezogen wird, was 1991 zu 16 Deponieabdichtungen aus Asphalt in der Schweiz geführt habe. Dies sei zu sehen vor dem Hintergrund einer Bewährung der Dichtung im Wasserbau über mehrere Jahrzehnte in über 20 Mio. m<sup>2</sup> abgedichteten Flächen. Bei "entsprechender Zusammensetzung" sei die Asphaltabdichtung absolut wasserdicht, sie verfüge über die Fähigkeit, "hohe Verformungen aus Setzungen" aufzunehmen, und sie könne dynamische Beanspruchungen durch schwere Baugeräte ohne Schäden ertragen.

Dem steht gegenüber, daß noch 1989 in Deutschland die Meinung vorherrschend war, daß Dichtungsmembranen aus Bitumen (5 mm), Kautschuk/Bitumen (5 mm) und Asphalt (120 mm Asphaltbinder) im Deponiebau "keine Rolle mehr spielen" (Düllmann, 1989).

Allen Publikationen ist gemeinsam, daß bei den Asphalten ausschließlich auf Typen zurückgegriffen wird, die im Straßenbau bzw. im Wasserbau beim Abdichten von Kanälen, Dämmen etc. schon sehr lange eingesetzt werden. Eine spezielle Entwicklung von Asphalten oder auch nur des Bindemittels in bezug auf die aggressiven Umweltbedingungen einer Deponie hat offensichtlich nicht stattgefunden.

## 2 Die Asphaltabdichtung im Vergleich mit anderen Dichtungssystemen

Arand et al. (1992a und 1992b) weisen darauf hin, daß weder die mineralische Abdichtung oder die Kunststoffdichtungsbahn für sich allein noch die Kombination beider Komponenten völlig frei von Risiken sei, da die Durchlässigkeit von mineralischen Dichtungen stets gegeben sei und die bei ordnungsgemäßer Verlegung gegen Wasser praktisch absolut dichte Kunststoffdichtungsbahn von Schadstoffen permeiert werden könne. Die mineralische Dichtung sei vor allem deswegen nicht geeignet, weil sich die k-Werte unter Einflüssen von Schadstoffen um Größenordnungen verschlechtern könnten. Bei der Kunststoffdichtungsbahn wird als Nachteil die große Empfindlichkeit gegenüber den Baustellenbeanspruchungen genannt, die zu Rissen und Löchern führen kann. – Da die Autoren weder zu den Durchlässigkeiten durch Konvektion und Diffusion Zahlen angeben, noch Art und Konzentrationen von Schadstoffen nennen, bei denen sich der k-Wert von Erdstoffdichtungen wesentlich zum Nachteil verändern kann, sind die Ausführungen von Arand et al. wenig aussagefähig. Unverständlich ist, daß von der in gewissem Grade für bestimmte Kohlenwasserstoffe (KW) und chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) durchlässigen Kunststoffdichtungsbahn auf die Durchlässigkeit der Kombinationsdichtung geschlossen wird. Bei der Kom-

binationsdichtung spielen im wesentlichen nur noch diffusive Prozesse für den Stofftransport eine Rolle. Dies hat zur Folge, daß bei einer Dimensionierung der Kombinationsdichtung gemäß TA Abfall (2,5 mm-PE-HD-Bahn auf einer 150 cm bzw. 75 cm dicken mineralischen Dichtschicht) diese Dichtung gegen alle Schadstoffe in der Deponie praktisch vollkommen dicht ist, sofern die Dichtung einwandfrei hergestellt worden ist. Diese guten Sperreigenschaften haben sich in Zwischenergebnissen von Permeationsuntersuchungen bereits 1985 angedeutet (August et al., 1985) und sind in langjährigen Dauerversuchen bestätigt worden (August et al., 1992).

Schließlich bedarf die Feststellung von Arand et al. (1992b), daß die mineralische Komponente der Kombinationsdichtung austrocknen könne, was möglicherweise funktionsgefährdende Risse in der mineralischen Dichtung nach sich ziehe, des ergänzenden Hinweises, daß die Austrocknung mit der Folge einer eventuellen Ribbildung stark von den hydrogeologischen Verhältnissen, von den Temperaturbedingungen und von der Art des mineralischen Erdichtungstoffes abhängen. Ein verantwortungsvoller Deponieplaner wird all diese Faktoren beachten und

durch eine entsprechende konstruktive Ausbildung des Dichtungssystems nachteilige Austrocknungen vermeiden.

Ryser (1993) sieht in der Asphaltabdichtung u. a. den Vorteil einer relativ großen Witterungsunabhängigkeit beim Einbau.

Die am häufigsten angewendeten Bauweisen sind aus dem Asphaltwasserbau übernommen worden und bestehen aus Asphaltmastix oder einer Bitumenmembran in Verbindung mit Asphaltbeton. Die Asphaltabdichtung benötigt eine besondere Sperrschicht zur Verminderung des diffusiven Schadstofftransports. Diese wird in der Regel durch eine im Schichtaufbau integrierte Membran aus Bitumen, teilweise auch aus polymermodifiziertem Bitumen oder aus Asphaltmastix, gebildet. Diese vor Ort hergestellten Membranen werden auf der Oberseite oder zwischen den einzelnen Lagen aus hohlraumarmem Asphaltbeton angeordnet, welche der Sicherung der Bitumenmembran und der zusätzlichen Dichtung dienen. Auf diese Weise behindern diese Membranen den Schadstofftransport aus der Deponie in Richtung Untergrund.

Schellenberg & Maurer (1992b) schlagen vor, die Asphaltabdichtung mit einer mineralischen Dichtschicht nach TA Abfall zu kombinieren, damit auf diese Weise die Schadstoffe, die durch die Asphaltsperrschicht diffundiert sind, sorptiv gebunden werden. Andere Autoren gehen davon aus, daß eine Dichtung, die nach den Regeln im Asphaltwasserbau aufgebaut ist, in der Regel ausreicht, den Beanspruchungen in einer Deponie zu widerstehen.

Für Deponieabdichtungen wird Bitumen, außer für Membranen, nie in reiner Form verwendet. Vielmehr spielen die Füllstoffe sowie die anorganischen Zusatzstoffe für die Qualität der Einsatzprodukte eine wesentliche Rolle. Sie sollen die Dichtigkeit gewährleisten, die Verarbeitbarkeit verbessern, die Plastizität steigern und die Wärmestandfestigkeit erhöhen. Für die Erhöhung des Diffusionswiderstandes ist die Teilchenform des Füllstoffes wichtig; eine blatt- oder schuppenförmige Struktur ist in dieser Hinsicht vorteilhafter als kugelige oder auch fadenförmige Strukturen. Für die thermische Standfestigkeit sind dagegen faserige Stoffe erforderlich; auch kugelige oder außerordentlich feine Teilchen mit stark zerklüfteter Oberfläche (wie z. B. kolloidale Kieselsäure) sind geeignet, während schuppige eher die Fließneigung fördern. Aus diesem Grunde werden schuppige Teilchen zwecks Erleichterung der Verarbeitbarkeit vorgezogen, ebenso wie leicht fettige, d. h. schmierend wirkende Füller. Aufgrund dieser jeweils unterschiedlichen Wirkungen empfiehlt es sich in bestimmten Fällen, nicht nur mit entsprechenden Kombinationen an Füllstoffen in der Masse zu arbeiten, sondern in den verschiedenen Schichten des Aufbaus verschiedene Füllstoffe zu verwenden. So wird beispielsweise eine thermisch sehr standfeste Schicht mit einer besonders dichten Bitumenmembran überzogen. Wichtig ist das optimale Mischungsverhältnis von Bindemittel zu

Füller. Ist es zu niedrig, werden die gewünschten Eigenschaften nicht voll erreicht; wird das Optimum überschritten, so ergeben sich andere sehr nachteilige Wirkungen. Als Zusatzstoffe kommen sowohl anorganische Materialien als auch organische (für spezielle Zwecke) in Frage.

Außer diesen Füllstoffen können Asphaltabdichtungen auch weichmacherartige Anteile und Kunststoffzusätze enthalten. Weichmacher sollen vor allen Dingen die Sprödigkeit in möglichst tiefe Temperaturbereiche verdrängen und werden u. U. mit Zusätzen zur Förderung der Standfestigkeit kombiniert, um die Plastizitätsspanne zu vergrößern. Diese Zusätze dürfen auch bei hohen Temperaturen das Strukturgerüst des Bitumens nicht zerstören. All diese Stoffe können nur bei der Herstellung eingearbeitet werden.

Von den thermoplastischen hochpolymeren Kunststoffen werden in den heiß verarbeiteten bituminösen Massen z. B. Polyisobutyl, Polychlorbutadien, Polystyrol und Butylkautschuk in geringen Mengen verarbeitet. Dabei steht ebenfalls die Erhöhung von Dichtigkeit und thermischer Standfestigkeit im Vordergrund. In bestimmten Fällen werden auch Veränderungen in der chemischen Beständigkeit erzielt.

Zur mechanischen Verstärkung werden Gewebeeinlagen in die Abdichtung eingearbeitet, die unter gewissen Voraussetzungen auch der Verbesserung der Wärmestandfestigkeit an senkrechten oder geneigten Flächen dienen. In erster Linie werden solche Gewebe bei der Herstellung von Anschlüssen u. ä. eingesetzt. Durch eine geeignete Präparierung wird der textilen Faser der Nachteil der Saugfähigkeit genommen. Diese führt ansonsten bei geringen mechanischen Beschädigungen dazu, daß das Gewebe die Ausbreitung von Feuchtigkeit in der Abdichtung massiv fördert.

Bei Glasfasereinlagen ist zwischen Geweben und Vliesen zu unterscheiden. Letztere sollten immer eine Vortränkung mit einem dünnflüssigen, haftintensiven und auf die verwendete Bitumensorte abgestimmten Lack erfahren, um zu vermeiden, daß das Vlies im Bitumen eine Trennschicht mit großem Porenraumanteil bildet.

Alle Schichten der Asphaltabdichtung sind untereinander und mit dem Planum der Böschung oder der Sohle durch Wahl der Körnung und des Bitumens so zu verbinden, daß die auftretenden Druck- und Schubkräfte übertragen werden können. Ein mangelnder Verbund zwischen zwei Asphaltsschichten kann zu einer örtlichen Überbeanspruchung durch Abtriebskräfte aus dem Eigengewicht der Dichtungsschicht führen. Die dabei auftretenden Spannungen können vom Asphaltbeton nur in begrenztem Umfang aufgenommen werden. Es entstehen zunächst horizontale Risse aus Zugbeanspruchungen mit Rißweiten bis zu einigen Zentimetern (Venrier et al., 1988; Tschernutter & Wellacher, 1985; Tschernutter, 1986; Haug, 1984).

### 3 Herstellbarkeit und Einbau

Die richtige Zusammensetzung der bituminösen Masse, abgestimmt etwa auf Dichtigkeit, hohe thermische Standfestigkeit, besondere chemische Beständigkeit, vorwiegend mechanische Widerstandsfestigkeit oder ausgeprägte Plastizität, garantiert noch nicht eine einwandfreie und langfristige Schutzwirkung einer Asphalt-dichtung. Für dieses Hauptziel ist die richtige Verarbeitung und der fachgerechte Einbau von ebensolcher Bedeutung. Bisher werden Eingußmassen und Asphaltbetone, eingebaut nach Art des Straßen- und Wasserbaus, bei Abdichtungen bevorzugt verwendet. Sie werden streifenweise eingebaut. Auf Böschungen erfolgt der Einbau von Asphaltbeton mit besonderen Böschungsfertigern. In der Regel werden die Beläge mehrlagig verlegt, wobei die einzelnen Einbaustreifen gegeneinander versetzt angeordnet sind. Auf diese Weise wird verhindert, daß die Arbeitsnähte übereinander liegen. Die Konstruktion und Bemessung richtet sich nach den Beanspruchungen, denen die Dichtung ausgesetzt ist.

Entsprechend den Empfehlungen für die Ausführung von Speicherbecken und ähnlichen Bauwerken (EEAW, 1983) ist zu unterscheiden zwischen zweischichtigen und einschichtigen Dichtungen. Bei einer zweischichtigen Dichtung wird die untere Dichtungsschicht einlagig eingebaut, im allgemeinen bis zu einer Dicke von 8 cm. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, daß bei größeren Einbaudicken eine langsamere Abkühlung erfolgt, die eine bessere Verdichtung ermöglicht. Die Dicke der oberen Dichtung soll mindestens 6 cm betragen. Zwischen unterer und oberer Dichtungsschicht wird eine Dränschicht angeordnet.

Demgegenüber bestehen einschichtige Dichtungen je nach Beanspruchung aus einer bis zwei Lagen mit Dicken von jeweils 4 cm bis 7 cm. Eine einlagige Dichtung soll mindestens 5 cm dick sein, da sonst eine einwandfreie Verarbeitung nicht gewährleistet ist. Vor

dem Aufbringen der Dichtung sollen Setzungen und Verschiebungen des Untergrundes und des Deponielagers sowie eventuell vorhandener mineralischer Dichtungsschichten weitgehend abgeklungen sein. Die Böschungsneigung richtet sich nach den bodenmechanischen Gegebenheiten, der Standfestigkeit der bituminösen Schichten und deren Einbauverfahren. Bisher gilt im Asphaltwasserbau eine Grenzneigung von 1:1,5.

Von Arand et al. (1992) wird festgestellt, daß im Asphaltwasserbau Böschungen bis zur Neigung 1:1,2 ausgeführt worden seien, ohne daß Standsicherheitsprobleme zu beobachten gewesen wären. Dies würde bei der Übertragung auf Deponieverhältnisse zu einer sehr günstigen Ausnutzung von Deponiestandorten führen. Offen ist, inwieweit diese Angaben auf Deponien übertragen werden können, da zumindestens über gewisse Zeiträume Temperaturen von 50 bis 70 °C nicht auszuschließen sind. Von Ryser (1993) werden für den Deponiebau Böschungsgefälle von maximal 1:1,5 angegeben. Schuhbauer (1992) empfiehlt, Böschungsneigungen nicht steiler als 1:1,7 zu wählen. Aus bodenmechanischen Gründen ließen sich steilere Böschungen nur selten herstellen. Bei steileren Ausführungen von Asphaltbetondichtungen war stets eine befestigte Unterlage, z. B. Beton, vorhanden (Haug & Alchholz, 1986).

Der Hohlraumgehalt, der aus Gründen der Dichtigkeit und eines möglichst günstigen Alterungsverhaltens nicht größer als 3 Vol.-% sein soll, darf jedoch auch nicht zu niedrig sein (Schuhbauer, 1992), da bei einem Hohlraumgehalt von annähernd 0 Vol.-% der Asphaltbeton seine Standfestigkeit verliert und dadurch auf Böschungen ins Rutschen kommen würde. Auch ein zu hoher Bitumengehalt hat in einigen Fällen zum Rutschen von Asphaltbeton geführt (vgl. Conclusions GR Q61, 1988).

### 4 Qualitätssicherung

Eine auf die speziellen Anforderungen einer Deponie abgestimmte, allgemein anerkannte und in Richtlinien o. ä. dokumentierte Qualitätssicherung (QS) für die Herstellung von Asphalt-dichtungen liegt nicht vor. Elemente der QS gemäß europäischer Norm (EN 29004, 1987) müssen sinngemäß auf Asphalt-Deponie-dichtungen übertragen werden, wobei eine Anlehnung an die Vorschläge von Partl (1992) sehr sinnvoll erscheint. Dabei sind einige fundamentale Unterschiede zu beachten. Anders als bei Asphaltbelägen im Straßenbau sind an der Deponiebasisabdichtung Instandsetzungs- und Erneuerungsarbeiten im Rahmen der Wartung in der Regel nicht möglich. Gleichzeitig sind die grundsätzlichen Anforderungen an die Nutzungsziele bei der Deponieabdichtung deutlich anspruchsvoller, liegt doch

die erwartete Funktionsfähigkeit der Deponiedichtung um mehrere Größenordnungen höher als bei einem normalen Straßenbelag, der notfalls nach 10 bis 15 Jahren erneuert werden kann.

Auch eine Anlehnung an die Anforderungen des Erd- und Wasserbaus (EEAW, 1983) erscheint nicht hinreichend, da hier ebenfalls Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten bei einer erheblich geringeren Beanspruchung der Dichtung möglich sind. Die Anforderungen an das Mischgut und die fertige Schicht sowie bezüglich der Kontrollmaßnahmen gemäß EEAW (1983) sind nach Schuhbauer (1992) sehr vage gehalten. Bei den Eigenüberwachungsprüfungen sollen neben dem Bindemittelgehalt und der Kornzusammensetzung die Eigen-

schaften des extrahierten Bindemittels und am Marshallprobekörper die Raumdichte und gelegentlich die Wasseraufnahme oder der Hohlraumgehalt am Probekörper bestimmt werden. Bei den Kontrollprüfungen des Auftraggebers wird zusätzlich noch die Raumdichte, die Wasseraufnahme bzw. der Hohlraumgehalt der fertigen Schicht geprüft.

Die Herstellung von bituminösem Mischgut ist nach Schuhbauer (1992) durch hohe Streuungen gekennzeichnet, was durch hohe Toleranzen in den technischen Vorschriften des bituminösen Straßenbaus zum Ausdruck kommt (ZTV, 1990). Nach Schuhbauer (1992) beträgt der maximal zulässige Prüfwert des Hohlraumgehaltes am Probekörper bei einem vereinbarten Hohlraumgehalt der Eignungsprüfung von 2 Vol.-% für einen Asphaltbeton 0/11 mm 5,5 Vol.-%, so daß an der fertigen Straßendecke der Grenzwert einschließlich aller Toleranzen bei 6 % liegt. In der Praxis werden diese hohen Toleranzen ausgeschöpft, teilweise auch überschritten (Schuhbauer, 1992).

Um den im Deponieabdichtungsbau notwendigen Hohlraumgehalt von 3 Vol.-% nicht zu überschreiten, muß bei einer Eignungsprüfung ein Hohlraumgehalt von 1 Vol.-% am Probekörper angestrebt werden; bei den Eigen- und Kontrollprüfungen des Mischguts dürfte dann 2 Vol.-% nicht überschritten werden. Diese Toleranzen sind nach Schuhbauer (1992) zu klein und in der Praxis nicht einzuhalten.

Nach Ryser (1993) ist Asphaltbeton (Dichtungsasphalt) eine "...speziell entwickelte Heißmischung von Splitten, Sanden, Füllern, Bitumen und Additiven". Er bedarf einer speziellen Einbautechnik, die in der Schweiz nur eine Firma, in Europa lediglich 4 bis 5 Firmen tatsächlich beherrschen. Diese speziellen Mischungen, zusammengesetzt nach firmeneigenen Rezepturen, sollen zu Asphalten führen, die an die Anforderungen der Deponie angepaßt sind und nicht mit herkömmlichen Asphaltmischungen im Straßenbau verglichen werden können. Zur Sicherung der Qualität definierter Mischungen wird von Ryser ausgeführt, daß "...im Labor der Spezialfirma die Mischungen täglich analysiert und in der Anlage nach den Erfordernissen korrigiert werden...". Zur Verfügung stünden für Vor-Ort-Untersuchungen im wesentlichen

- die visuelle, optische Kontrolle
- der Vakuum-Dichtigkeitsversuch, der punktuell in der Regel einmal pro 200 m<sup>2</sup> ausgeführt wird
- Isotopenmeßsonden zur Erfassung der Dichtigkeit und Homogenität
- die Möglichkeit, Bohrkerne zu entnehmen, die im Labor untersucht werden können.

In Übereinstimmung mit Partle (1992) wird indirekt auch hier gesagt, daß es keine schnellen, "Vor-Ort-Sofort"-Meßmethoden gibt, um die für die Dichtigkeit

und für das Alterungsverhalten des Asphalts relevanten Kenngrößen, wie Hohlraumgehalt u. a., schnell bestimmen und entsprechend in der Fertigung reagieren zu können.

Mit Sicherheit bedarf es eines umfangreichen qualitätssichernden Aufwandes, wenn für jedes Projekt Konstruktion, Mischgut und Details neu erarbeitet werden müssen (vgl. Ryser, 1993). Die wenigen Firmen, die im Asphaltbau tätig sind, halten Know-how, Angaben zu Spezialmischungen, Erfahrungen über Kontrollprüfungen, vor allem negative, als Betriebsgeheimnis von einer Veröffentlichung fern (Schuhbauer, 1992).

Eignungsnachweise für spezielle Asphaltmischungen und ihre Einbauweise sollten jedoch in Verbindung mit notwendigen, im einzelnen nachzuweisenden Qualitätssicherungsmaßnahmen wegen des hohen Allgemeininteresses am Schutz des Grundwassers – ähnlich wie bei dem Zulassungsverfahren von Kunststoffdichtungselementen – durch ein wirtschaftlich unabhängiges Institut durchgeführt, zumindestens bestätigt werden. – Im Rahmen von Zulassungsaufgaben sind wesentliche die Qualität bestimmende Schritte beim Einbau der Asphaltmischungen zu verabreden, wozu die Gestaltung der Eigen- und Fremdüberwachung genauso gehört wie die Festlegung des Rahmens des Herstellungsprozesses des Dichtungsbelages, der Beschreibung von Prüfmethoden wie beispielsweise:

- zum Nachweis der einwandfreien Herstellung der vertikalen Stoßstellen in den einzelnen Asphaltmischungen bzw. an den Anbindungen an feste Bauwerke, wie z. B. an Schächte, Rohrleitungen (Beton, PE)
- zur Erfassung des inneren Aufbaus sowie der mechanischen Eigenschaften des Asphaltbelages durch zerstörungsfreie Prüfungen. Zerstörungsfrei sollten diese Prüfungen sein, um eine Schädigung des Dichtungsbelages zu vermeiden.

Zum Komplex "qualitätssichernde Prüfungen für Einbaukontrollen" wird durch Partl (1992) darauf hingewiesen, daß für Asphaltstraßenbaustoffe erst relativ wenige schnell durchzuführende, baustellengerechte Materialprüfungsverfahren existieren. So kann auf Abweichungen beispielsweise vom Sollwert des Hohlraumgehaltes nicht unmittelbar reagiert werden, sondern dies ist in der Regel erst in der folgenden Schicht möglich, da es keine ausreichend schnellen Methoden gibt, um Abweichungen vom Sollwert des Hohlraumgehaltes festzustellen. Ähnliches gilt auch für den Nachweis einer einwandfreien Haftfestigkeit zwischen Bitumen und den Mineralstoffen, die durch Trennmittel wie Feuchtigkeit und Staub nachteilig beeinflusst werden kann. – Dichte und möglichst alterungsbeständige Asphalte müssen einen Hohlraumgehalt von < 3 Vol.-% aufweisen. Zu gleichen Feststellungen kommt Schuhbauer (1992), wenn er ausführt, daß ein wesentliches Problem der Qualitäts-

sicherung im Asphaltbau in dem hohen Zeitaufwand für die Prüfungen liegt. Wird ein Fehler im Mischgut entdeckt, ist das Mischgut längst eingebaut. Eine Kontrolle des Zwischenprodukts (Mischgut) vor der Verarbeitung zum Endprodukt (Dichtungsschicht o. ä.) ist im Asphaltbau nicht möglich. Die Prüfmöglichkeit des Asphalts in jeder Phase seiner Herstellung, wie das bei der Herstellung von sicherheitstechnisch relevanten Bauteilen zwingend notwendig ist, ist z. Z. nicht gegeben und muß in Zukunft erst realisiert werden.

Nach Dübner (1991) gibt es zur Zeit auch noch kein voll befriedigendes und praktikables Prüfverfahren, mit dem man die Haftfestigkeit zwischen Bitumen und den Mineralstoffen messen kann, so daß man mehr oder weniger auf den guten Überblick des "Fachmannes" bezüglich Einflußfaktoren und erforderlicher technischer Maßnahmen angewiesen ist. Dabei hängt die mechanische Festigkeit von Asphalten wesentlich von der Haftfestigkeit ab, sie kann beispielsweise durch Staub oder Feuchtigkeit stark verschlechtert werden. Hier besteht somit für Asphaltsschichten – und das gilt verstärkt für den Deponiebereich – ein erheblicher Forschungsbedarf.

Huth et al. (1988) berichten von umfangreichen qualitätssichernden Maßnahmen im Zusammenhang mit dem Einbau von Asphalt als Dichtung und Damm-befestigung für ein Wasserreservoir (17 m hoch, Länge des kreisrunden Dammes 5818 m, Böschungsneigung 1:3, abgedichtete Fläche 1,85 Mio. m<sup>2</sup>). Zur Anwendung kam ein Bitumen B80 mit guten Verarbeitungseigenschaften und geringer Neigung zum Altern. Zur Ermittlung der optimalen Zusammensetzung der Asphaltsschicht wurden umfangreiche Eignungsuntersuchungen bei der MPA Baden-Württemberg in Stuttgart durchgeführt. Zur Qualitätssicherung wurden sehr viele, die Bauarbeiten begleitende Untersuchungen durchgeführt, beispielsweise 5576 Durchlässigkeitstests an Asphaltproben. Im folgenden ein Beispiel für die statistische Auswertung der Messungen:

	Nennwert	Mittelwert	Standardabweichung
Bitumengehalt (Gew.-%)	6,4	6,42	± 0,13
Hohlraumgehalt (Vol.-%)	1,9	1,4	± 0,3

In den USA läuft ein umfangreiches Forschungsprogramm, in dem zu einem wesentlichen Teil Fragen der langzeitigen Gebrauchstauglichkeit von Asphaltsschichten und damit zusammenhängend Prüfverfahren Gegenstand der Untersuchungen sind. Bellin (1992) berichtet über erste Ergebnisse des "Strategic Highway Research Program (SHRP)", das mit 150 Mio. US-\$ ausgestattet, von 1988 bis 1993 läuft, und in dem u. a. die Bitumen- und Asphaltforschung mit 50 Mio. US-\$ finanziert wird. In bezug auf ein zu verbesserndes Gebrauchsverhalten von Straßenbelägen in den USA (es gibt dort kein Gütesicherungssystem von Mineralstoffen und Bitumen wie in Deutschland!) stehen Prüfverfahren für folgende sechs Haupteigenschaften von Asphalt im Mittelpunkt der Vorhaben:

- Alterungsverhalten, Veränderungen beim Misch- und Einbauvorgang und während der Nutzungsdauer
- Widerstand gegen bleibende Verformungen
- Festigkeit gegenüber Temperaturrissen
- Adhäsionsverhalten Bitumen / Mineralstoff
- Ermüdungsverhalten
- Wasserempfindlichkeit, Adhäsions- und Kohäsionsverhalten im Bitumen bei Zutritt von Feuchtigkeit.

Nach Vorliegen der ersten 35 Berichte wird festgestellt, daß die Ergebnisse wesentlichen Einfluß auf den zukünftigen Asphaltstraßenbau in den USA haben werden und daß sie das Gebrauchsverhalten der Straßenbeläge wesentlich verbessern werden. Nach Bellin (1992) werden folgende Ergebnisse auch Anregungen für den deutschen Straßenbau geben und vielleicht auch Änderungen bewirken:

- genauere Kenntnis des Bitumens
- Beurteilung von Bitumenmodifikationen (= Additive wie Gummi, Schwefel, Kalkhydrat, SBS, Polyethylen, Polypropylen) für Asphaltbeton
- Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Asphaltstraßen und die prüftechnische Abschätzung der Einflußfaktoren
- technische Vorschriften für Asphalt, die auf das Gebrauchsverhalten ausgerichtet sind.

Bis die Endergebnisse des SHRP-Forschungsprogramms vorliegen, wird offengelassen, ob das bisherige Wissen über Asphalt und Bitumen bestätigt wird und lediglich ergänzt werden muß, oder ob wesentlich neue Erkenntnisse gefunden wurden.



# 5 Kurz- und Langzeitverhalten von Asphalten unter den Bedingungen von Deponien für Siedlungs- und Sonderabfälle

## 5.1 Chemische Beständigkeit

Nach Müller (1966) ist Bitumen gegen fast alle Salzlösungen und auch bis zu mittleren Konzentrationen gegen anorganische Säuren und Laugen beständig. Eine Ausnahme bilden oxidierende Säuren und Laugen, wie z. B. Salpetersäure oder Bleichlauge, von denen nur niedere Konzentrationen über längere Zeit ohne Schaden vertragen werden.

Nicht so günstig verhält sich Bitumen gegen organische Substanzen. Bei den organischen Säuren spielt eine Rolle, ob der apolare oder der Säurecharakter stärker ausgeprägt ist. So ist Bitumen beispielsweise gegen Essigsäure noch relativ beständig, während die höheren, eigentlichen "Fettsäuren" quellend und lösend wirken. Auch die niedrigsten Vertreter der Alkohole wie Methanol und Ethanol greifen erst in höheren Konzentrationen an. Ganz allgemein wirken fast alle weiteren organischen, weitgehend apolaren Lösungsmittel, von Benzin und Benzol über Ester und Ketone bis zu den Chlorkohlenwasserstoffen, lösend, ebenso wie pflanzliche und tierische Öle und Fette. Der Hauptangriff der organischen Verbindungen beruht somit vor allem auf ihrer quellenden und lösenden Wirkung.

Bei der Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen chemischen Angriff darf nicht die Bedeutung der Schichtdicke übersehen werden und der Einfluß der Zuschlagstoffe. Letztere sind vor allem dann von der Anwendung auszuschließen, wenn sie wasserlösliche oder auch quellbare Anteile enthalten.

Weiterhin ist bei der Abschätzung und Prüfung der chemischen Beständigkeit des Bitumens dessen thermoplastischer Charakter zu berücksichtigen, da die mit der Temperatur steigende Wirksamkeit von Säuren, Laugen oder lösenden Substanzen mit einer Auflockerung der Struktur des Bitumens einhergeht. Die dennoch gegebene chemische Beständigkeit und die darauf basierende Anwendungsbreite bituminöser Dichtstoffe erklärt sich dadurch, daß in jeder Bitumenfraktion nicht nur eine, sondern diverse chemische Gruppen vertreten sind.

Aufgrund jahrzehntelanger Erfahrungen darf die chemische Widerstandsfähigkeit von Asphalt nach Arand et al. (1992b) als gegeben angesehen werden. Die Erfahrungen zur Widerstandsfähigkeit von Asphaltsschichten beruhen in erster Linie auf der Anwendung von Asphalt im Erd- und Wasserbau, in dem anders als im Deponiebau aggressive Medien keine wesentliche Rolle spielen.

Die Problematik, wie die Wasserundurchlässigkeit mit und ohne Schadstoffen verschiedener Konzentration

nachgewiesen werden kann, sowie die Frage der Permeation bzw. der Löslichkeit von Asphalt durch organische Lösemittel führte zu einer Forschungsarbeit, auf die im Abschnitt 6 dieses Kapitels näher eingegangen wird.

Ryser (1992) stellt eine Widerstandsfähigkeit der Asphalte gegen Sickerwässer fest, wobei allerdings AOX-Werte von 5 mg/l, BSB<sub>5</sub>-Werte von 45.000 mg/l und CSB-Werte von 60.000 mg/l als Extremwerte beschrieben werden, die der Verfasser bisher nie selbst beobachtet habe und die "...eher wohl alten und schlimmen" Sonderabfallablagerungen zuzuordnen seien.

Haas (1989 und 1990) führt zur Beständigkeit von Asphalt aus, daß es organische Lösemittel gibt, die das Bindemittel angreifen. Jedoch sei in der Praxis der Deponie sichergestellt, daß weder

- ausreichende Lösemittelmengen pro m<sup>2</sup>, noch
- ausreichende Angriffszeiten der Lösemittel, noch
- Möglichkeiten des Abtransportes von gelöstem Bindemittel

vorhanden sind, um die Sperrfunktion der Asphaltsschicht ernstlich zu gefährden. So seien bei einer 10 mm dicken Asphaltsperrschicht 75 l/m<sup>2</sup> Lösemittel notwendig, um das Bitumen herauszulösen. Versuche mit konz. Schwefelsäure über 72 Stunden hätten nur einen 1 mm tiefen Angriff ergeben.

Nach Schuhbauer (1992) gibt es eine Reihe von organischen Lösemitteln, die das Bindemittel von Asphalt anlösen. Die Durchlässigkeit des Asphalts für solche Lösemittel hängt im wesentlichen von der Porosität und Porenstruktur der Zuschlagstoffe ab. Die Porosität von Straßenbaugestein liegt zwischen 0,2 und 5 Vol.-%. Daneben ist auch die Verdichtung des Asphalts von sehr großem Einfluß; ein Asphalt mit 1 Vol.-% Hohlraum verhält sich wesentlich besser als ein Asphalt mit 4 Vol.-% und mehr Hohlraumgehalt. - Wirken Lösemittel beispielsweise in einer Mulde einer Basisabdichtung in größeren Mengen über längere Zeiten ein, so ist das Risiko, daß der Asphaltbeton durch Lösemittelleinwirkung zerstört wird, nicht zu unterschätzen.

Springer et al. (1991) behandeln den Einsatz von Asphaltbetonabdichtungen für Auffangwannen, Rückhaltebecken u. ä., wo eine Schadstoffrückhaltung für eine begrenzte Zeit gegenüber Mineralölprodukten verlangt wird. Für Asphaltbeton gibt es z. Z. diesbezüglich keine genau festgeschriebenen technischen Anforderungen. Bei der Deutschen Shell wurden Untersuchungen im Zusammenwirken mit Superbenzin durchgeführt. Die

Wahl fiel auf Superbenzin, weil dieses Produkt unter den gängigen Mineralölprodukten das stärkste Lösevermögen aufwies. Bei der bituminösen Dichtung handelte es sich um einen speziell zusammengesetzten Asphaltbeton 0/11 mm als Asphaltdeckschicht. Der Hohlraumgehalt war < 2 Vol.-%, die Raumdichte betrug 2,37 g/cm<sup>3</sup>. Dicke: 6-11 cm, Gehalt an Bitumen B80: 7,5 Gew.-%, Erweichungspkt. RuK: 50,5 °C, Penetration bei 25 °C: 57·1/10mm. Die bedingte Dichtigkeit des Asphaltbetons ist nach Springer et al. (1991) auch bei Drücken bis zu 2 m Wassersäule über 96 bzw. 192 Stunden aufgrund der geringen Anlösung von maximal 15 mm bei Versuchsende als gewährleistet anzusehen. Dabei wurde festgestellt, daß die Anlösungstiefe sich zwischen 92 und 196 Stunden kaum noch veränderte. Voraussetzung für dieses Verhalten war, daß der Hohlraumgehalt der Asphaltbetonschicht < 3 Vol.-% betrug. Bei einem Durchbiegeversuch (Platte mit 50 cm Durchmesser, Durchbiegung 3 cm) mit 50 l Superbenzin unter einem Druck von 1 bar nach 42 Tagen wurde keine Undichtigkeit beobachtet (Versuch nach Van Asbeck).

Von Interesse ist die Frage nach den Auswirkungen einer vollständigen Herauslösung des Bitumens, das als Bindemittel in einer Asphaltdeckschicht enthalten ist. Nach Laborversuchen, die von Asbeck (1968) beschrieben werden, besitzt das (bindemittelfreie) Mineralstoffgerüst eines Asphaltbeton-Dichtungsbelages bei einer Temperatur von 20°C und einem hydraulischen Druck von 1 kg/cm<sup>2</sup> einen Durchlässigkeitsbeiwert gegenüber Wasser von  $k = 3 \cdot 10^{-8}$  m/s.

### **Beständigkeit gegen hydrodynamisch-chemische Einwirkungen**

Von Arand et al. (1992a) wird über Versuche zur Einwirkung von Trichlorethylen, tropfend auf die Asphaltoberfläche mit Tropfraten von 100 ml/h, Dauer 48 Stunden, berichtet. Anlösetiefe und gelöste Menge an Bitumen und feinen Mineralstoffen sind bei diesen Versuchen die "Beständigkeitskriterien". – Ergebnisse: Die Anlösetiefen betragen > 6 mm bei Bindemittelgehalten von ca. 6 %, ohne daß ein Beharrungszustand nach 48 Stunden erreicht wurde. Zur Wertung ist festzustellen, daß Asphalt bzw. das Asphaltbindemittel gegen das Einwirken von Trichlorethylen unbeständig ist und eine 48stündige Versuchsdauer als außerordentlich kurz betrachtet werden muß, wenn es um Fragen der Beständigkeit über 50, 100 und mehr Jahre geht oder auch nur um die Simulation des Auslaufens eines Faßlagers.

## **5.2 Widerstandsfähigkeit gegen physikalische Einwirkungen**

Als wesentliche physikalische Beanspruchungen werden angesehen: Temperatur, Feuchtigkeit, Zugbeanspruchungen, allgemeine Baustellenbeanspruchungen und Setzungen. Nach Ansicht des Verfassers sind Setzungen die mit Abstand kritischste physikalische Beanspruchungsgröße

für eine Asphaltdeckschicht in der Deponie und sollen daher im folgenden behandelt werden. Auf die Belastbarkeit von Asphalten durch Temperaturwechsel und Frostperioden wird in Abschnitt 5.4 eingegangen.

Nach Asbeck (1968) verfügt der Ingenieur für die Planung von Wasserbauwerken über Grundlagen, die ihm eine hinreichend genaue Berechnung der mechanischen Eigenschaften eines Bitumens oder eines Asphaltgemisches innerhalb eines bestimmten Temperatur- und Belastungszeitbereiches möglich macht. Da das Bitumen sich bei hohen Temperaturen und bei anhaltender Belastung wie eine Flüssigkeit und bei niedrigen Temperaturen und kurzer Belastung wie ein elastischer Stoff verhält, zeigen die Asphaltmischungen das gleiche Verhalten. Asphalt verhält sich i. a. wie ein viskoelastischer Stoff. Im Hinblick auf die Beschreibung des Asphalts bei Setzungen genügt es, den Stoff durch einen einzigen Kennwert, nämlich durch die Viskosität, zu kennzeichnen. Dieser Wert hängt von der Temperatur, vom Mischungsverhältnis Füller : Bitumen und von der Volumenkonzentration der mineralischen Zuschlagstoffe ab. Zwischen +10 °C und +40 °C beträgt die Viskosität für Asphaltbeton annähernd 10<sup>11</sup> Poise und für Sandasphalt etwa die Hälfte.

Nach Arand et al. (1992b) sowie Haas (1990) kann aufgrund jahrzehntelanger Erfahrungen im Wasserbau die Widerstandsfähigkeit von Asphalt gegen Setzungen als gegeben angesehen werden. So würden Setzungen bis 1:10 unproblematisch ausgehalten, ohne daß die Dichtfunktion beeinträchtigt wird; in Deponien könnten wegen höherer Temperaturen auch größere Setzungen verkräftet werden.

Diese Angaben werden sehr pauschal gemacht, ohne Hinweise auf maximale Verformungsgeschwindigkeiten; Angaben zum speziellen Aufbau des Asphalts fehlen ebenfalls. Der Steifigkeitsmodul, d. h. das elasto-viskose Verhalten, ist stark abhängig von der Bitumensorte, den Asphaltzuschlägen, der Temperatur und von der Geschwindigkeit, mit der im Einzelfall der Setzungsvorgang abläuft (Gauer, 1992). – Wie sieht es mit gealterten Schichten aus? – Alte Straßenbeläge, Parkplätze, die wenig durch rollenden Verkehr beansprucht werden, zeichnen sich nicht selten durch erhebliche Ribbildung aus! Nach Ryser (1993) handelt es sich jedoch im Deponiebau um Asphalte, die mit obigen Erscheinungen nichts gemeinsam haben, da es sich um andere Rezepturen handelt. Ryser führt aus, ohne auf die Problematik der Verhärtung durch Alterungsvorgänge einzugehen: "...Setzungsmulden werden bis zu 1:10 ribfrei aufgenommen..."! Wann bzw. zu welchem Zeitpunkt diese Verformungen schadlos aufgenommen werden können und ob dieses auch im eingespannten Zustand unter Müllaufplast gilt, derartige Fragen bleiben unbeantwortet.

Anforderungen an den Untergrund zur Bettung und Einbringung der Verdichtungsenergie werden von Ryser (1993) genannt. Es ist eine ausreichend steife Trag-

schicht erforderlich. Je nach Schichtdicke sind Werte von  $ME = 60\text{--}80 \text{ MN/m}^2$  notwendig. Gefordert wird eine gleichmäßige Steifigkeitsverteilung über die Fläche; der Untergrund muß scherfest und langfristig stabil sein. Eine Feinplanie ( $\pm 4 \text{ cm}$ ) und eine durchlässige Ausgleichsschicht, mit dem Zweck, daß Wärme und Regenwasser nach unten entweichen können, sind nach Ryser selbstverständlich.

Haas (1992) führt zur Verformbarkeit von Asphalt-Dichtungen aus, daß die Verformungseigenschaften von extrem hoher Steifigkeit bis hin zu Eigenschaften entsprechend hochviskoser Flüssigkeiten einstellbar seien. Es gebe jedoch Grenzen, die durch die geforderten Festigkeitseigenschaften gegeben seien, die ihrerseits durch Anforderungen

- zur Standfestigkeit in Böschungen
- zur Befahrbarkeit von Asphaltdecken
- zum Verschleißwiderstand sowie
- zum Angriff durch überlagernde Massen vorgegeben seien.

Die bei Dichtungen maßgebende Art der Verformung, hervorgerufen durch Setzungsunterschiede, wird nach Meinung des Verfassers durch Setzungsmulden (Tiefe und Weite der Mulde) in der Dichtung beschrieben, die schadensfrei aufgenommen werden könnten. Die Prüfung der Verformungsqualität von Dichtungen müsse durch aufgezwungene realitätsnahe Muldenformen erfolgen. Der im Asphaltwasserbau seit langem bekannte Van-Asbeck-Versuch ist dadurch gekennzeichnet, daß die bei der Entstehung von Setzungsmulden erzwungenen Längendehnungen für alle Mulden gleicher Tiefen-Weiten-Verhältnisse gleichwertig nachgestellt werden. Die mit der Muldenbildung verbundenen Biegebeanspruchungen dagegen werden bei den vergleichsweise kleinen Modellen stark überzogen simuliert. Haas (1992) schlägt vor, Anforderungen an die Verformbarkeit des Asphalts nicht starr festzulegen. Der planende Ingenieur könne, an die Erfordernisse der jeweiligen Projekte gebunden, mit "genügender Treffsicherheit" angeben, ob mit flachen oder steilen Setzungsmulden zu rechnen ist. Wesentliche Problemfragen, die im Zusammenhang des Einsatzes von Dichtungselementen in dem sicherheitstechnisch sensiblen Bereich der Deponieabdichtung beantwortet werden müssen, werden in der Abhandlung ausgeklammert. – So wie nicht auf den zeitlichen Verlauf der Verformung (schnell oder langsam) und den Temperatureinfluß eingegangen wird, die bei der Beantwortung der Frage, ob der Asphalt diese schadlos verträgt oder nicht, eine wesentliche Rolle spielen, so wird auch auf Angaben im Sinne von Kenngrößen verzichtet. Hier wäre es beispielsweise notwendig zu wissen, welche Dehnungen der Asphalt maximal in bestimmten Zeitintervallen schadlos aufnehmen kann. Über derartige Angaben muß der Planungsingenieur verfügen, um entscheiden zu können, ob ein bestimmter Werkstoff für ein bestimmtes Deponieprojekt geeignet ist oder auch nicht. Es fehlen

Hinweise, wie ein Asphalt in seiner Zusammensetzung bezüglich hoher Verformbarkeit optimiert werden kann und was dies für andere wesentliche Eigenschaftswerte wie beispielsweise für die Medienbeständigkeit, Standfestigkeit usw. für Folgen hätte. Ebenso wenig wird auf Probleme der Anbindung der Dichtung an starre Bauwerke wie Rohre und Schächte, sowie auf den Einfluß der Alterung auf das Verformungsverhalten von Asphalt-schichten eingegangen.

Schuhbauer (1992) sieht die Empfindlichkeit von Asphalt gegenüber Setzungen deutlich kritischer, wenn er berichtet, daß häufig über Setzungsrisse in Asphaltbetonaußenhautabdichtungen geschrieben wird. Dabei treten sog. wilde Risse durch flächenhafte Setzungen (Ditter & Haug, 1981) und Risse um örtliche Setzungsmulden auf (Ehasz, 1982; Smith, 1988; Tschernutter & Wellacher, 1985).

Die Ausführungen in der Literatur (EEAW, 1983), wonach Asphaltbeton Setzungen im Verhältnis Mulden-durchmesser zu Muldentiefe von 10:1 oder gar 5:1, ohne seine Dichtungswirkung zu verlieren, mitmachen kann, trifft in der Praxis bei tieferen Temperaturen und gar gealtertem Asphalt bei weitem nicht zu.

Wie sieht es mit der einwandfreien Anbindung an feste Bauwerke in der Deponie aus? – Auf diese Problematik wird in der Literatur nur wenig eingegangen. Nach Ryser (1993) sind Durchdringungen von Leitungen einfach und einwandfrei herstellbar und haben sich nach den spezifischen Setzungsverhältnissen zu richten. Einschränkend wird jedoch deutlich darauf hingewiesen, daß Durchdringungen möglichst zu vermeiden sind, da diese auch bei bester Ausführung generell Schwachpunkte im Dichtungssystem darstellen. Zur Problematik der Anschlüsse und Durchdringungen führt Schuhbauer (1992) aus, daß an Anschlüssen zwischen Asphaltbetondichtung und Betonkonstruktion die unterschiedlichen Setzungen oft zu erheblichen Setzungssprüngen führen. An diesen Unstetigkeiten träten im Asphaltbeton große Spannungen auf. Die Fähigkeit von Asphaltbeton, Spannungen abzubauen und Setzungen zu folgen, beschränke sich auf gleichmäßige Setzungsmulden und langsam wachsende Spannungen (Venrier, 1988; Conclusion GR Q61, 1988; Ehasz, 1982; König & Idel, 1973). Unterschiedliche Setzungen führen zu Rissen mit erheblichen Wasserverlusten (Venrier, 1988; Ehasz, 1982; König & Idel, 1973; Blinde & Göggel, 1986; Duncanson & Johnston, 1988).

### 5.3 Beständigkeit gegen biologische Angriffe

#### Bisheriger Kenntnisstand

Es gibt eine Reihe von Bakterien und Pilzen, die sehr gut auf Bitumen als einziger Energie- und Kohlenstoffquelle wachsen. Dieses zeigten Laboruntersuchungen von Gray & Martin (1947), Kerner-Gang (1967), Becker &

Kerner-Gang (1969), Phillips & Traxler (1963), Traxler et al. (1965) sowie von Muñoz Cebrián (1983), aber auch Beobachtungen an einem Bitumenanstrich in einem Trinkwasserbehälter (Schoenen, 1978). Bei den bitumenverwertenden Mikroorganismen handelt es sich zum einen um Pilze vornehmlich der Gattungen *Candida* (Hefepilze), *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Penicillium* und *Trichoderma*, zum anderen um Bakterien vor allem der Gattungen *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Nocardia*, *Mycobacterium* und *Corynebacterium*. Die genannten Mikroorganismen sind Bestandteil der natürlichen Bodenpopulationen; ihr Anteil an der Gesamtmikroorganismenpopulation nimmt in Gegenwart von Rohölprodukten schlagartig zu, wodurch sie sich leicht anreichern lassen (Harris, 1966; Muñoz Cebrián, 1983). Diese Erkenntnisse über Kohlenwasserstoffverwertende Mikroorganismen haben auch Einzug in die Lehrbücher gefunden (beispielsweise Schlegel, 1991 sowie Brock et al., 1991). Kerner-Gang (1967) sowie Becker & Kerner-Gang (1969) können aufgrund ihrer Untersuchungen regelrecht Testorganismen zur Prüfung der biologischen Bitumenbeständigkeit vorschlagen.

Die genannten Mikroorganismen besiedeln nicht einfach nur den Bitumen, sondern rufen an ihm Änderungen hervor wie

- Gewichtsveränderung (zurückzuführen auf Oxidationsprozesse)
- Oberflächenzerklüftung
- Steigerung der Viskosität

(Traxler et al., 1965; Phillips & Traxler, 1963; Muñoz Cebrián, 1983).

Allen bisher genannten Untersuchungen ist gemeinsam, daß die jeweilige Bitumensorte den Mikroorganismen "als Oberfläche" angeboten wurde, d. h. als dünne Beschichtung auf einer Pappe, als dünner Film auf Glasflächen (Muñoz Cebrián, 1983) oder als Emulsion in der Kulturlösung (Traxler et al., 1965). Das beobachtete rege Wachstum der betreffenden Organismen auf dem Bitumen ist in fast allen Fällen eindeutig aerober Natur gewesen, d. h. die angesprochenen Bakterien und Pilze verwerteten den Asphalt in Gegenwart von Sauerstoff; die Oberfläche des Bitumens wurde in den genannten Experimenten hinreichend mit Sauerstoff versorgt.

Grundsätzlich muß hierzu gesagt werden, daß der mikrobielle Abbau von aliphatischen, zyklischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen im ersten Abbau-schritt Sauerstoff erfordert, damit ein Mikroorganismenwachstum möglich ist. Die wenigen bisher bekannt gewordenen Bakterien, die die genannten Substanzen komplett ohne Sauerstoff abbauen können, sind als Ausnahmeerscheinung zu werten und wachsen vergleichsweise langsam. Anderenfalls wäre uns das Erdöl in den unterirdischen Lagerstätten nicht so unverändert erhalten geblieben, sondern weitgehend dem mikrobiellen Abbau anheimgefallen.

## Übertragung der bisherigen Erkenntnisse auf die Verhältnisse an der Deponiebasis

Traxler (1966) verdeutlicht, daß die biologische Beständigkeit des Bitumens entscheidend davon abhängt, ob er – wie in den beschriebenen Untersuchungen – in äußerst geringer Schichtdicke bzw. in feinsten Verteilung den Mikroorganismen ausgesetzt ist oder in Schichtdicken um 10 cm, welche weit eher der Realität des Asphalt-Deponiedichtungsbaus entsprechen. Versuche, in denen verschiedene Asphalte "in relativ hoher Schichtdicke" für 1/2 Jahr in natürliche Böden eingegraben worden waren, zeigten, daß der Abbau des Bitumens, gemessen am Gewichtsverlust, entscheidend langsamer vor sich geht als unter den oben genannten Kulturbedingungen, und bei bestimmten Asphalten sogar zum Stillstand kommt. Die Abbauraten wurden dabei entscheidend vom Wassergehalt des Bodens beeinflusst.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen Laborexperiment und Deponiebasis: An der Deponiebasis hat man es nicht nur mit einem asphaltverwertenden Mikroorganismus zu tun, sondern gleichzeitig mit verschiedenen. Jede Bakterien- oder Pilzart hat zudem ein anderes Substratspektrum, bevorzugt also eine andere Substanzgruppe bzw. unterschiedlich viele verschiedene Substanzen des Bitumens. Die stoffwechselphysiologische Untersuchung der asphaltverwertenden Bakterien *Mycobacterium ranae* und *Nocardia coeliaca* (Traxler, 1966) zeigten, daß diese Organismen – stellvertretend für andere Asphaltverwerter – auf verschiedenen Asphalten höchst unterschiedlich intensiv wachsen. Traxler schlüsselte beispielsweise auf, warum ein bestimmter Bakterienstamm auf keinem der eingesetzten Asphalte wuchs: Er wuchs nur auf einer bestimmten Fraktion: den aliphatischen Kohlenwasserstoffen; die aromatischen Bestandteile dagegen wirkten auf diesen Bakterienstamm wachstumshemmend. Die anderen Bakterienstämme der untersuchten Arten hatten diese Probleme nicht; sie hatten ein breiteres Spektrum an verwertbaren Bitumenbestandteilen.

Aus den beschriebenen Untersuchungen Aussagen über die biologische Beständigkeit von ca. 10 cm dicken Asphaltbetondichtungen an der Deponiebasis abzuleiten, hält der Verfasser für nicht möglich. Dazu sind die Versuchsbedingungen der beschriebenen Laborexperimente zu verschieden von den Bedingungen bzw. vom Aufbau an der Deponiebasis. Weitere Untersuchungen sind vonnöten, die die Bedingungen an der Deponiebasis möglichst treffend simulieren (nach dem Prinzip des ungünstigen Falls, vgl. August et al., 1992). Folgende wesentliche Punkte müssen in diesen Untersuchungen Berücksichtigung finden:

- Untersuchung gängiger Asphalte gemäß Stand der Technik
- Einsatz von Asphaltproben mit Schichtdicken > 1 cm
- Herstellung von Milieubedingungen wie an der Deponiebasis

- Arbeiten mit natürlich an der Deponiebasis vorkommenden Mikroorganismen (in Mischkultur)
- Einhaltung definiert aerober oder anaerober Bedingungen
- Beobachtung der Konzentrationen aller wichtigen Nährsubstrate.
- die thermisch-energetischen Effekte
- die destillativen Vorgänge
- die oxidativen Reaktionen, die praktisch immer mit katalytischen Wirkungen von Schwermetallen u. a. verbunden sind.

## 5.4 Alterung von Asphalt

So wie bei jedem organischen Werkstoff unter den jeweiligen Einsatzbedingungen (Temperatur, Medien, mechanische Belastungen u.s.w.) sich langfristig für den vorgesehenen Einsatz nachteilige Eigenschaftsänderungen ergeben (Alterung), die im Grenzfall dazu führen, daß das Bauteil seine Aufgabe nicht mehr erfüllt, so gibt es auch beim Asphalt Alterungsmechanismen. Diese gilt es zu untersuchen, um für den möglichen Einsatz von Asphalt als Deponieabdichtung werkstoffliche Optimierungen, aber auch Abschätzungen für langfristige Vorhersagen der Lebenserwartung sowie der Funktionstüchtigkeit des Dichtungswerkstoffes unter Deponiebedingungen machen zu können. Extrem lange Lebenserwartungen, die weit über das beim Einsatz von Asphalt im Straßenbau, Erd- und Wasserbau übliche gehen, sind hier gefragt, um beim Bürger über das Angebot ausreichender Sicherheitstechnik Akzeptanz auch für zukünftige Deponien mit wassergefährdenden Inhaltsstoffen zu finden. Akzeptanz kann nur erreicht werden, wenn Folgen für das Grundwasser wissenschaftlich beurteilt werden können, weil entweder Erfahrungen vorliegen und/oder ausreichende Grundlagenkenntnisse für das Werkstoffverhalten vorliegen.

Von Ryser (1993) wird zur Frage der Alterungsbeständigkeit ausgeführt, daß eine hohe Alterungsbeständigkeit durch die dichte Struktur gegeben sei. Ryser räumt jedoch ein, daß zu Fragen der Beständigkeit und Alterung noch viele weitere Untersuchungen und Gutachten erfolgen müßten, die zu beachten sind. Vergleiche mit alten Straßenbelägen, die eine andere Zusammensetzung aufweisen, lehnt er ab, da die Asphaltzusammensetzung für Deponieabdichtungen sich grundsätzlich von Mischungen für Straßenbeläge unterscheidet.

### 5.4.1 Alterungsmechanismen, Vorhersage der Einsatzdauer

In Verbindung mit der Diskussion der Ursachen für das Auftreten von Rissen in Spurrinnen in Asphaltstraßendecken (Dübner, 1985) wird immer wieder die Qualität der Bitumenbindemittel – und hier besonders ihr Alterungsverhalten – angesprochen. Zur Versachlichung der Diskussion werden von Arand (1982) Fakten über Mechanismen der Alterung von Bitumen dargestellt. Danach gibt es eine Reihe von "hypothetischen" Alterungsmechanismen mit der Folge der Verhärtung und Versprödung des Bitumens:

- die selektive Absorption

Neumann (1987) sowie Neumann et al. (1992) beschränken dagegen die Bitumen-Alterung auf die letzten drei Prozesse und stellen diese als reale, nicht als hypothetische Mechanismen vor. Sie führen aus, daß der Alterung jeder der genannten drei Gruppen für die Wiederverwendung von Ausbauasphalt (Recycling von Fräsgut, Aufbruch) eine besondere Bedeutung zukommt, insbesondere unter dem Gesichtspunkt, daß es sich bei der Alterung um irreversible Prozesse handelt. Nach Dübner (1991) sind im Falle der Wiederverwertung von Asphalt auf jedem Fall umfangreiche Voruntersuchungen notwendig, so daß die Wiederverwendung, vor allem im Bereich von Tragschichten im Asphaltstraßenbau, insgesamt einen erhöhten Prüfaufwand verlangt. Huschek (1992) führt hierzu aus, daß in der Praxis bei der Mischgutproduktion unter Verwendung von Asphaltgranulat das im Granulat enthaltene Bitumen voll auf den Gesamtbindemittelgehalt angerechnet werde. Hierbei werde in der Regel die Qualität des bereits gealterten Bindemittels nicht berücksichtigt. Das resultierende Mischbindemittel (Bindemittel aus dem Granulat und frisches Bitumen) entspräche mitunter nicht den sonst üblichen Qualitätsanforderungen.

Zenke (1975 und 1977) unterscheidet klar drei Alterungsmechanismen:

- a) (schwach:) Verdunstungseffekte der "leichten", stark fluxend wirkenden Anteile der niedermolekularen Fraktionen.
- b) (stärker:) Bindung von Sauerstoff, Zunahme sauerstoffhaltiger polarer Gruppen, Intensitätsanstieg der Carbonylbande, Zunahme fest auf der Chromatographiesäule verbleibender Maltenanteile mit steigendem EP und RuK.
- c) (stark:) Dehydrierung und Polykondensation durch Sauerstoff, kenntlich an der Abnahme der "cyclics", der Zunahme der Asphaltene sowie der Abnahme der mittleren Molgewichte der vermutlich als Reaktionszwischenprodukt fungierenden Resins.

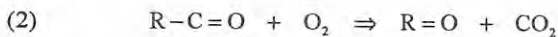
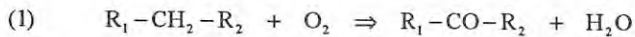
Untersuchungen an 20 Jahre im Einsatz gewesenen Straßenasphalten (Zenke, 1977) zeigen, daß diese Alterungseffekte deutlich stärker bei "offenen" (großer Hohlraumgehalt) als bei "dichten" Asphalten auftreten.

Zenke (1975) beschreibt Versuche zur Simulation der beim Verarbeiten von Asphalt (Bitumen) auftretenden Alterungseffekte. Ziel ist die getrennte Erfassung von oxidativen und destillativen Partialeffekten im direkten Nachweis. Um Einflüsse unterschiedlicher Schichtdicken zu vermeiden, wurden die Proben im Rotationskolben während der thermischen Behandlung bewegt. Da mit

definierten, reinen Sauerstoff-/Stickstoffgemischen gearbeitet wurde, konnte dank eines gewissen Zeitraffereffekts eine beschleunigte Durchführung der Untersuchungen erreicht werden. Folgende Angaben zu den Untersuchungen sollen hier Erwähnung finden:

- Vergleichsproben: aus technisch aufbereiteten Proben gleicher Zusammensetzung zurückgewonnenes Bitumen.
- Bitumenproben: je 50 g B80 aus normaler Produktion
- Temperatur: 200 °C unter Gasstrom, 500 ml/min, mit unterschiedlichem N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Verhältnis, unter Luft 150 °C und 100 °C
- N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Gemisch mit O<sub>2</sub>-Gehalten von 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 %
- Rotationsgeschwindigkeit : 15 U/min
- Über die Versuchszeit (Alterung) erfaßte Kennwerte bzw. deren Änderungen: Erweichungspunkt, Gewicht, Penetration.

Bei 100 % N<sub>2</sub> erhält man die destillativen Effekte abgetrennt (reine Gewichtsabnahme) von den oxidativen Vorgängen. Enthalten sind in den Werten allerdings noch die Effekte aus der Dehydrierung (1) und der Dekarboxylierung (2).



Die Vorgänge verlaufen erwartungsgemäß; mit zunehmender O<sub>2</sub>-Konzentration und steigender Temperatur ist jeweils ein schnellerer exponentieller Verlauf der Kennwerte zu verzeichnen.

Folgerung: Die bisher auf hypothetischen Partialeffekten der Oxidation und destillativen Veränderung basierende Alterung kann als nachgewiesen angesehen werden.

Im Zusammenhang mit katalytisch beeinflussten Oxidationsprozessen, wie sie bei Geotextilien von Müller et al. (1992) beobachtet wurden, wäre auch die Beantwortung der Frage interessant, ob die reichlich in der Deponie vorhandenen Nitrate in Verbindung mit Schwermetallsalzen bei Abwesenheit von Luftsauerstoff auch bei Bitumen bzw. Asphalt eine wesentliche Rolle als Oxidantien spielen können.

Schuhbauer (1992) führt zur oxidativen Alterung, zur Verdunstungsalterung und Strukturalterung aus, daß alle drei Mechanismen mit steigender Temperatur beschleunigt werden. Die Geschwindigkeit der Alterung wird auch von der Rohölprovinienz und der Bitumenherstellung beeinflusst. Im Asphalt tritt schon bei der Herstellung, bei der Heißlagerung des Bitumens, beim Mischprozeß, bei der Lagerung im Silo, beim Transport und beim Einbau eine starke Alterung auf, wobei hier die Verdunstungsalterung (destillative Alterung) und die

oxidative Alterung überwiegen. Die Alterung ist um so größer, je höher die Temperatur beim Mischprozeß ist und je mehr Luftsauerstoff mit dem Asphalt reagieren kann (Richter, 1989).

Von Huschek (1992) wurden in Labor-Experimenten mit einem Modellmischer, einer 1:3-Nachbildung eines Doppelwellen-Zwangsmischers (30 kg Nenncharge), der Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes von Ausbaumaterial (Recycling) und der Temperatur auf die Bindemittelverhärtung untersucht. Die Untersuchungen ergaben, daß die Bindemittelverhärtung im wesentlichen durch die Mischtemperatur bedingt wird. Bei einer Zugabetemperatur der frischen Mineralstoffe von 250 °C lag die durchschnittliche Erhöhung des Erweichungspunktes bei 3,2 °C, während die Erhöhung bei den regulären Mischungen (Temperatur der frischen Mineralstoffe 180 °C bei 0 % Feuchtigkeitsgehalt im Granulat und 200 °C bei 3 % Feuchtigkeitsgehalt im Granulat) im Mittel bei 0,9 °C lag. Bei relativ geringen Mischtemperaturen (hier: angestrebte Mischguttemperatur 150 °C) haben die Art der Bindemittelzugabe, die Mischdauer und der Feuchtegehalt im Granulat praktisch keine Bindemittelverhärtung zur Folge.

### Selektive Absorption

Unter selektiver Absorption (vgl. Arand, 1982) wird verstanden, daß aus dem Bitumen als Bindemittel im Asphalt, bestehend aus Asphaltene (5-10 nm-Teilchen) und Erdölharzen (1,5 nm-Teilchen), die in einer öligen Phase (Maltene, mit Molmassen von einigen hundert) kolloidal dispergiert sind (Neumann et al., 1992), bevorzugt die niedrigviskosen Kohlenwasserstoffe aus dem Maltenbereich in die porösen Hohlräume der mineralischen Komponenten eindringen, d. h. absorbiert werden. Als Folge kann es zur Anreicherung der Asphaltene und Erdölharze und zu einer Verhärtung bzw. Versprödung des Bindemittels kommen. Allerdings konnten Untersuchungen bei Arand keinen Beitrag zur Stützung der Hypothese dieses Alterungsprozesses leisten.

### Thermisch-energetische Effekte, Strukturalterung

Alle geordneten Strukturen der organischen Chemie altern! Bitumen sind kolloidale Systeme, die Strukturen bilden, denen die Eigenschaft zu altern inhärent ist (Neumann, 1987). Beobachtungen, daß mechanisch unwesentlich belastete Asphaltflächen, wie beispielsweise wenig frequentierte Parkplätze, verspröden und Risse zeigen, wird auf Strukturveränderungen zurückgeführt, die ihrerseits auf einen Übergang des Bitumens vom Solzustand zum Gelzustand zurückzuführen sind (Brdicka, 1962; Arand, 1982).

Untersuchungen von Zenke (1974) zur Tieftemperatur-Duktilität von Asphalt B80 weisen darauf hin, daß strukturelle Veränderungen ohne wesentliche Konsistenzveränderungen am Bindemittel stattgefunden haben können, er spricht in diesem Zusammenhang von einer

thermischen Alterung. – Die im Bitumen kolloidal dispergierten Stoffe sind Asphaltene und Erdölharze (Neumann et al., 1992). Sie bilden große spezifische Grenzflächen mit einer hohen freien Grenzflächenenergie aus, deren Verminderung über eine Teilchenvergrößerung bis hin zum Zerfall in zwei Phasen unter Gewinn an freier Energie erfolgt. Solche Systeme mit hoher freier Grenzflächenenergie befinden sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht. Jedes nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindliche System altert.

Eine Strukturalterung von Kolloiden bedeutet stets eine Vergrößerung der kolloidal dispergierten Teilchen, es vollzieht sich der irreversible Alterungsprozeß:

Sol  $\Rightarrow$  strukturiertes Sol  $\Rightarrow$  Koagel  $\Rightarrow$  Gel.

Ein Bitumen kann als Sol, als System im Übergang Sol-Gel oder als Gel vorliegen (Barth, 1962; Neumann & Rahimian, 1992). Diese Übergänge sind fließend. Der Endzustand des Alterns führt stets über ein Gel, das durch Verlust von flüssiger, nicht koagulierter Phase und dem damit verbundenen Zusammentreten der koagulierten Kolloide weiter altert (Synärese; vgl. Sonntag, 1977). Damit gewinnt das Bitumen an Härte sowie an innerer Festigkeit aufgrund der fortschreitenden Strukturierung; es verliert an Elastizität und an Plastizität. Durch die dichtere Packung kann es auch an Volumen abnehmen (Schrumpfen), was im Zusammenhang mit der Ribbildung (Migliarina, 1984) zu sehen ist. Extrem gealtertes Bitumen versprödet. Die Vergrößerung der Teilchen setzt sich so lange fort, bis diese den kolloid dispersen Teil verlassen haben und in den grob dispersen eingetreten sind. Die Grenze zwischen beiden liegt für sphärische Teilchen bei 1  $\mu\text{m}$ . Damit ist das System zwei- oder mehrphasig geworden. Das Minimum an freier Grenzflächenenergie ist erreicht ("tote Asphaltene").

Nach Kopsch (1992) und Neumann et al. (1992) altern auch polymermodifizierte Bitumen. In den meisten Fällen liegen Netzwerkstrukturen der Erdölkolloide vor, in die Polymer-Makromoleküle (z. B. PE-HD, EDPM, EPM, SBS) eingelagert sind, die ebenfalls kolloidale Strukturen aufweisen. Beide Gruppen der Kolloide, die Micellkolloide des Bitumens und die Molekülkolloide des Polymers, altern in ähnlicher Weise durch eine Strukturvergrößerung unter Gewinn an freier Grenzflächenenergie. Der Annahme, daß bei Zugabe von leichter (als Bitumen) oxidierbaren Polymeren das Bitumen geschützt wird, widerspricht Kopsch (1992). Die bei der Oxidation von Polymeren entstehenden Radikale können auch im Bitumen die Radikal-Kettenreaktion starten. Eine wirksame Stabilisierung gegen Oxidation kann nur mit sog. "Radikal-Fängern" erreicht werden, die einen Kettenabbruch der Reaktion bewirken.

#### Destillative Vorgänge und oxidative Reaktionen

Unter destillativer Alterung wird das Verdunsten von leichten Kohlenwasserstoffen (KW) aus der Maltenphase

mit der Folge der Viskositätserhöhung verstanden, wobei Arand (1982) zwischen Kurzzeitalterung (wesentlich bei der Herstellung, Lagerung, Transport und Einbau des Mischguts) und Langzeitalterung während der Nutzungsdauer zu unterscheiden empfiehlt. Dorner (1991) spricht in diesem Zusammenhang von Vor- und Nachalterung.

Nach Zenke (1977) findet die stärkste Veränderung aller Fraktionen im Asphalt während der Asphaltaufbereitung und seines Einbaus gegenüber den nur langsamer ablaufenden Veränderungen während der Nutzungsdauer statt. Einer Abnahme der zyklischen KW steht eine entsprechende Zunahme der mittelmolekularen Erdölharze und der höhermolekularen Asphaltene gegenüber, d. h., letztere bilden sich aus ersteren.

Untersuchungen von Zenke (1974) haben gezeigt, daß Alterung (Verhärtung des Bindemittels) rein destillativ, aber auch verstärkt durch oxidative Prozesse unter Luftsauerstoff stattfinden und daß beide Partialeffekte voneinander trennbar sind. Die Bilanzierung hat ergeben, daß i. d. R. die oxidative Alterung die durch destillative Effekte bewirkte Alterung übertrifft.

Von Dorner (1991) werden Methoden zur Untersuchung des Alterungsvorganges genannt:

- Bestimmung der Penetration
- Erweichungspunkt mit Ring und Kugel (RuK)
- Erkennung des Alterungsfortschrittes aus der Bestimmung der Anteile und der geänderten chemischen Zusammensetzung der Maltene, Asphaltene und Erdölharze.

Kenngrößen sind hier die Gehalte der Stoffanteile bzw. die Sauerstoffaufnahme oder Wasserabgabe (Dehydratisierung), die zur Oxidation führen (Dorner, 1991). Dies gilt unter der Voraussetzung, daß die Zusammensetzung des Bitumens bei Einbau und der Oxidationsgrad der Asphaltene, der Maltene und Erdölharze genau bekannt sind. – Andernfalls ist nur unvollständig ein Rückschluß auf die Alterungsbeiträge möglich. Speziell oxidative Vorgänge lassen sich am schnellsten und empfindlichsten infrarotspektroskopisch durch Bestimmung der Carbonylgruppen (CO-Streckschwingung bei 1680 bis 1730  $\text{cm}^{-1}$ ) ermitteln.

Von Ivanov et al. (1980) sowie von Neumann (1987) wird berichtet, daß die oxidative Alterung nicht spontan, sondern erst mit Verzögerung nach einer Induktionsperiode einsetzt. Systematische Messungen von Arand (1982) an Bitumen B200, 400 Stunden bei 120 °C rotierend erwärmt, konnten diesen Effekt nicht bestätigen. Messungen des Erweichungspunktes Ring + Kugel in zeitlichen Intervallen zeigten einen mit Versuchsbeginn einsetzenden linearen Anstieg des Erweichungspunktes von 40 °C auf 92 °C in den 400 Stunden Versuchsdauer.

Traxler (1961) weist darauf hin, daß die Veränderung der KW-Gemische im Bitumen aufgrund ther-

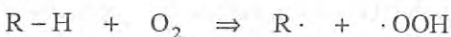
mischer/oxidativer Prozesse durch Katalysatoren beschleunigt ablaufen können, und nennt eine Reihe katalytisch wirkender Substanzen wie

- Oxide des Kupfers, Aluminiums, Molybdäns, Vanadiums und Phosphors
- Metallpulver des Zinks, Eisens, Kupfers Mangans und weitere
- Sulfide des Phosphors
- diverse Metallsalze, Metall-Chlorverbindungen und Schwefelsäure.

Hierbei bleibt offen, ob im Einzelfall die genannten Verbindungen reaktionshemmend oder -fördernd wirken. Green et al. (1976) folgern aus über dreijährigen statistischen Untersuchungen an Asphalt, daß die Sauerstoffalterung durch Vanadiumspuren (200 ppm) katalytisch beschleunigt wird.

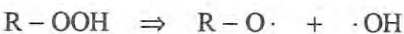
Arand (1982) empfiehlt, Alterungsuntersuchungen an praxiskonformen Asphaltmischungen durchzuführen. Die Einbeziehung der Mineralstoffe wird von ihm auch deswegen für wesentlich gehalten, weil nicht feststeht, ob der Sauerstoff aus der Luft oder vielleicht auch aus dem Gestein kommt.

Nach Neumann (1987) vollzieht sich die oxidative Alterung von Bitumen mit Luftsauerstoff über Radikalreaktionen. Die Radikale werden aus Kohlenwasserstoffen (KW) durch Einwirkung von UV-Strahlung gebildet. Liegen für einen Kettenstart, der die Folge einer Radikalbildung ist, nur KW und molekularer Sauerstoff vor, so beginnt die Alterung sehr langsam über eine Induktionsperiode. Sie wird schneller mit der Zahl der gebildeten Radikale. Eine Startreaktion gemäß



erfordert hohe Aktivierungsenergien von etwa 445 kJ/mol, die thermisch erst bei Temperaturen über 450 °C erreicht werden können.

Sind erst einmal Hydroperoxide gebildet worden, so werden Startreaktionen gemäß



entscheidend, wobei zur Spaltung der O-O-Bindung bei einigen Peroxiden nur noch 50 °C notwendig sind. Der Verfasser vertritt die Ansicht, daß die eigentliche Startreaktion zur Alterung von Straßenasphalt nicht über die Homolyse, sondern über photochemische Prozesse läuft. Diese Alterung findet nach Neumann (1987) an den Oberflächen statt, die im Kontakt mit dem Luftsauerstoff stehen und dem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Es werden als Zwischenverbindungen Hydroperoxide, Ketone, Alkohole, Phenole, Aldehyde und Carbonsäuren gebildet. Als Endprodukt entstehen Asphaltene, die sauerstoffarm

sowie wasserunlöslich sind und neutral reagieren. Fehlt unter den genannten Bedingungen jedoch eine der beiden Komponenten Luftsauerstoff oder Lichtenergie, so kann keine oxidative Bitumenalterung eintreten.

Zu der von Neumann et al. (1992) zuvor genannten notwendigen sehr hohen Aktivierungsenergie von 445 kJ/mol für die Startreaktion der Oxidation führt Kopsch (1992) aus, daß diese bei Anwendung thermoanalytischer Untersuchungsmethoden nie gefunden wurde. Die ermittelten Aktivierungsenergien liegen für den LTO-Bereich (Low Temperature Oxidation) zwischen 65 und 115 kJ/mol, je nach Substanz. Das bedeutet, daß in praxi wohl immer Substanzen anwesend sind, die entsprechend leicht Radikale bilden und so die Radikal-Kettenreaktion initiieren. Kopsch (1992) sieht darin die Erklärung dafür, daß bei niedrigen Temperaturen Oxidationsvorgänge durch Lichtenergie unter Sonneneinstrahlung bei Oberflächentemperaturen von nur 60–80 °C angeregt werden können. Auch Moschopedis & Speight (1975) berichten über den oxidativen Abbauprozess von Bitumen, wobei es weniger um einen Abbau geht als vielmehr um die Bildung komplexer Verbindungen mit höherem Molgewicht.

Mit fortschreitender Alterung sind folgende wichtige Reaktionen für die Bitumenoxidation charakteristisch (Neumann et al., 1992):

- Erhöhung der Konzentration an aromatischen Verbindungen im Bitumen
- eine Wasserbildung, verbunden mit einer Dehydrierung der KW
- eine Kurve für die Säurezahl, die als Funktion der Zeit ein Maximum durchläuft
- eine Erhöhung des Asphaltgehaltes (durch Aromatisierung und Decarboxylierung, die beide das Bitumen sauerstoffärmer machen)
- eine Erhöhung der mittleren Molmasse.

In der Summe führt die oxidative Bitumen-Alterung zu einem asphaltenreichen und damit härteren Bitumen.

#### 5.4.2 Untersuchungen zur Alterung; ausgebaute Asphaltproben

Arand et al. (1992b) berichten, daß eine Alterung des Bindemittels Bitumen stattfindet. Nach Untersuchungen von Bellin (1992) ist die Alterung von Asphalt bzw. des Bindemittels während der Nutzungsdauer im starken Maße von dessen Hohlraumgehalt abhängig. Aus Untersuchungen an einer Böschung aus einem Schiffahrtskanal und einer 5–10 Jahre alten, mit Asphaltbeton abgedichteten Deponie wird der Schluß gezogen: "...Bei ordnungsgemäß ausgeführten Asphalt dichtungen von Deponien mit Hohlraumgehalten bis zu 3 Vol.-% ist daher mit einer Alterung praktisch nicht zu rechnen...".



Diese Ausführungen, daß mit einer Alterung von Asphaltsschichten praktisch nicht zu rechnen ist, sofern der Hohlraumgehalt unter 3 Vol.-% liegt, sind in aller Schärfe mit Sicherheit nicht haltbar. Hierfür fehlen exakte wissenschaftliche Untersuchungen. Die Untersuchung von 10 bis 30 Jahre alten Asphaltproben zeigen nach Schönian (1986), daß mit abnehmendem Hohlraumgehalt Alterungsvorgänge durch oxidative Veränderungen verlangsamt, mit Sicherheit jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Der zuvor genannte Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und der Verhärtung des Bindemittels hingegen konnte durch umfangreiche statistische Untersuchungen von Shahin & McCullough (1973) an Asphaltdeckschichten nicht bestätigt werden. Von Zenke (1975 und 1977) wird vermutet, daß dieses Ergebnis darauf zurückzuführen ist, daß die untersuchten Asphalte wahrscheinlich alle relativ hohe Hohlraumgehalte hatten.

Von Haas (1989) wird zur Lebensdauer bzw. Alterungsbeständigkeit bituminöser Dichtungen ausgeführt, daß die Babylonier bereits vor 5000 Jahren bituminöse Dichtungswerkstoffe und Mörtel in Gebrauch hatten, die sich bis heute nicht verflüchtigt haben.

Proben, die aus einer 1935 verlegten Asphaltdeckung entnommen wurden (Dortmund-Ems-Kanal), zeigten, daß das Bindemittel (Bitumen) eine Verhärtung erfahren hatte (Oxidation), indem der Erweichungspunkt von 51 °C auf 64 °C bis zum Jahre 1987 angestiegen war. Ansonsten war die Dichtung funktionsfähig. Ein wesentlicher Teil der Erweichungspunkterhöhung ist auf Oxidationsvorgänge bei der Herstellung, Zwischenlagerung und beim Transport des Asphalts zurückzuführen und liegt üblicherweise bei 3 bis 8 °C, die Nadelpenetration nimmt um ca. 30 % ab (Haas, 1979; Schönian, 1980).

Dorner (1991) berichtet von Untersuchungen zum relativen Alterungszustand von Deck-, Binder- und Tragschichten aus Asphalt nach ca. 18- bzw. 25jähriger Nutzungsdauer hinsichtlich Vor- und Nachalterung. Die Untersuchungen ergaben tendenziell, daß die Sauerstoffaufnahme der Bindemittel in den Fein- und Grobbinderschichten oberhalb eines Oxidationsgrades von 0,2 größer war als jene der Bindemittel in den Tragschichten. Der Oxidationsgrad der Maltene war deutlich geringer als der der Asphaltene. – Wenn auch die Ergebnisse nicht statistisch abgesichert sind, so werden doch zumindestens halbquantitativ Korrelationen zwischen den schichtbezogenen Alterungsparametern Hohlraumgehalt, Erweichungspunkt und Konsistenz gezogen. Die Hohlraumgehalte der Asphaltfeinbinder- und -grobbinderschichten lagen nur unwesentlich oberhalb von 7 %, bei den Asphalttragschichten maximal bei 5 %, so daß sie als hohlraumarm eingestuft werden können. Trotz dieser niedrigen Hohlraumgehalte wurden in manchen rückgewonnenen Bindemitteln aus der Fein- und Grobbinderschicht Anstiege des Erweichungspunktes RuK von bis zu 28 °C festgestellt, dem eine maximale

Verhärtung auf ein B15 entspricht. Im Konsistenzdiagramm liegen alle rückgewonnenen Bindemittel aus den verschiedenen Asphaltsschichten in einem ungewöhnlich engen Bereich der Penetrationsindizes von  $\pm 0$  bis + 1. Dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen von Zenke (1975 und 1977), der für Tragschichten eine Spannweite der Penetrationsindizes von -0,8 bis +1,0 gefunden hat.

Von Schönian (1980) werden als wesentliche Faktoren für die Dauerbeständigkeit von Asphalt genannt:

- die Eignung der Zuschlagstoffe (wasser- und frostbeständig)
- die Wahl eines geeigneten Bitumens
- die Zusammensetzung des ausgewählten Gemisches und
- die Einbaugüte des Asphalts.

Für die Dauerbeständigkeit des Asphalts im praktischen Einsatz ist die Oxidation durch den Luftsauerstoff entscheidend, die durch UV-Lichteinwirkung verstärkt wird. Wie groß Veränderungen sein können, wird an einigen Beispielen demonstriert:

- 1) Talsperre El Ghrip, Baujahr 1936/37, 12 cm Asphaltbeton 0/25 mm mit 8 Gew.-% B25 in 2 Lagen auf 8 cm Dränschicht aus Magerbeton mit Abdeckung aus Zementmörtel. Die beobachteten Änderungen in der Nadelpenetration und dem Erweichungspunkt RuK entsprechen zwei Bitumensorten.
- 2) Oberbecken Hieflau, Pumpspeicherwerk Wag-speicher, Baujahr 1962/63, Bitumengehalt zwischen 7,4 und 8,5 Gew.-%. Die beobachteten Änderungen in der Nadelpenetration und Erweichungspunkt RuK entsprechen 2 Bitumensorten.
- 3) Talsperre Trapan, Baujahr 1966, 10 cm Asphaltbeton 0/14mm auf 10 bis 40 cm Asphaltdrän- und 8 cm Asphaltfilterschicht. Ausgangsbitumen B65 hat sich zu B45 verändert. Die Dichtungsschicht verfügte über keine Oberflächenversiegelung, wie sie in Deutschland als UV-Schutz seit Jahrzehnten üblich ist.
- 4) Oberbecken, Pumpspeicherwerk Geesthacht bei Hamburg, Baujahr 1956/57, Asphaltbetondichtung besteht, aufbauend auf 5 cm Bitumensand mit 5 Gew.-% B80 als Walzunterlage, aus 2 · 3 cm Asphaltbeton 0/8 mm (Sohle) bzw. in der 1:2,5-Böschung aus 2 · 3,5 cm Asphaltbeton 0/8 mm mit Oberflächenversiegelung (2–3 kg/m<sup>2</sup> bitumenreiche Versiegelungsmastix). Der Asphaltbeton ist mit 1 Gew.-% Asbestfasern, 3 Gew.-% Naturasphalt-pulver und 7,8 Gew.-% B80 aufbereitet worden. Dauerbelastung des Beckens durch tägliche Befüllung und Entleerung ("beträchtliche elastische Verformung"). Nahtbereiche erwiesen sich innerhalb weniger Jahre den Biegezugbeanspruchungen nicht gewachsen, so daß die meisten Nahtbereiche gerissen sind. ("Sanierung" durch Infrarot-Wiedererwärmung,

Nachverdichtung). Nach ca. 30 Jahren Einsatz Verhärtung des Bitumens um 2 bis 3 Sortenspannen.

und 0/16 mm (gebrochenes Korn) mit 6,5 Gew.-% B65.

5) Deckwerk Eiderdamm, Schleswig-Holstein, Baujahr 1970, (vgl. Schönian, 1972), Asphaltbeton 0/25 mm

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse an den 5 Dichtungen:

Dichtung	Hohlraumgehalt (Vol.-%)	Änderung Nadelpenetration		Änderung Erweichungspunkt EP (RuK)		Alter***) (Jahre)
		vorher (mm)	nachher (mm)	EP (°C)	Δ EP (K)	
1)	0,4-5,4*)	20/30	10/15	59/69	+8-14**)	18
2)	0,4-2,0	80	38-48	48,5	+7,5-12,5	20
3)	2,1-2,5	66	26-47	52	+3-13	11
4)	1,7-2,7	Ber.B65	27-29	Ber.B65	+60,5-72	28-30
5)	4,0	52	52	53,5	nahezu 0	12

\*) von unten nach oben zunehmend

\*\*) inclusive üblichen Anstiegs bei der Fertigung von 3 bis 8 °C

\*\*\*) zum Zeitpunkt der Untersuchung

Ber. = Bereich

Werden besondere Anforderungen an die Dehnbarkeit des Asphaltbetons gestellt, so kann nach Schönian (1980) "polymermodifizierter" Asphaltbeton eingesetzt werden. Dieser Asphalt verfügt über elastische Eigenschaften, die von keinem Straßenbaubitumen nach DIN 1995 erreicht werden kann. Die Dehnbarkeit erhöht sich um das 5- bis 10fache. Zur Alterungsbeständigkeit von polymermodifiziertem Asphalt liegen aus der Praxis noch keine Erfahrungswerte vor. Nach Dübner (1991) wird dem polymermodifizierten Bitumen auch eine höhere Alterungsresistenz zugesprochen. Diese pauschale Feststellung wird durch die Ausführungen von Kopsch (1992) nicht unterstützt.

Die Untersuchung von Bitumen, welches aus 10–30 Jahre liegenden Asphaltbetondichtungen im Wasserbau extrahiert worden ist, zeigt, daß für solche Dichtungen mit niedrigem Hohlraumgehalt < 3 Vol.-% bei sorgfältiger Behandlung des Gemisches eine Dauerhaftigkeit von mehreren Jahrzehnten gegeben ist (Schönian, 1986). Durch den niedrigen Hohlraumgehalt ist dem UV-Licht und dem Luftsauerstoff nur ein Zutritt in die oberen Millimeter einer Dichtungsschicht möglich. So behält der Kern der Dichtung im wesentlichen seine plastischen Eigenschaften bei.

Umfangreiche Angaben zur Alterung des Mischgutes und des verlegten Asphaltbetons werden von Schuhbauer (1992) gemacht. Danach darf bei der Aufbereitung des Mischgutes (Mischtemperaturen 130 bis 180 °C) bis hin zum Fertiger von Asphaltbeton im Straßenbau der An-

stieg des Erweichungspunktes (EP) nicht mehr als 8 °C über der oberen Grenze der verwendeten Bitumensorte liegen, d. h., für einen B80 mit einem EP von 44–49 °C darf der EP auf 52–57 °C ansteigen. Nach Schuhbauer werden jedoch im Straßenbau bei sorgfältiger Mischgutaufbereitung diese Werte bei ca. 3 % der Stichproben überschritten. Dabei ist zu bedenken, daß die Erhöhung des EP um 8 bis 13 °C schon einer kräftigen Änderung entspricht und der Alterung von dichtem Asphaltbeton in den ersten 10 Jahren gleichzusetzen ist. Nach Schuhbauer (1992) gibt es hierzu im Asphaltwasserbau kaum veröffentlichte Untersuchungsergebnisse. Für den Zirmseedamm wird bei einem EP des Ausgangsbitumens von im Mittel 46 °C ein Anstieg von 4 bis 10 °C angegeben. Neuerdings werden im Wasserbau mit bis zu 200 °C deutlich höhere Mischtemperaturen als im Straßenbau angewendet (N. N., 1991). Da die Alterung des Bindemittels exponentiell mit der Temperatur verläuft, ist im Asphaltwasserbau mit einer wesentlich größeren Verhärtung des Bitumens zu rechnen (Schuhbauer, 1992).

In der fertig verdichteten Schicht hängt die Weiteralterung des Bitumens stark vom Hohlraumgehalt und von der Temperatur ab. Von Richter (1989) wird im Sinne einer Vorhersage des Alterungsverlaufes ausgeführt, daß bei einem Asphaltbeton mit einem Hohlraumgehalt von  $2,2 \pm 0,8$  Vol.-% ein Anstieg des Erweichungspunktes um 0,3 °C pro Jahr und bei einem Hohlraumgehalt von  $8,5 \pm 1,4$  Vol.-% um 2,8 °C pro Jahr angegeben.

Bei einem amerikanischen Forschungsvorhaben, bei dem 53 Straßen mit Asphaltbeton mit 6 Bindemitteln der Ursprungspenetration 85/100 verschiedener Herkunft untersucht wurden, betrug die Penetration des Bindemittels nach 12 Jahren Liegezeit bei 1 % Hohlraum im Mittel  $65 \cdot 1/10\text{mm}$ , bei 2 % Hohlraum 42, bei 3 % Hohlraum 35, bei 5 % Hohlraum  $25 \cdot 1/10\text{mm}$  (Welborn, 1970). Nach Schuhbauer (1992) bedeutet das in etwa, daß bei einem Ausgangsbitumen B80 mit 1 % Hohlraum aus diesem nach 12 Jahren ein B65, bei 2 % ein B45 und bei 4 % ein B25 wurde!

Im Asphaltwasserbau gibt es hierzu nur wenige Angaben. Nach Schuhbauer (1992) scheint die Alterung des fertigen Asphaltbetons im Wasserbau etwa in dem gleichen Bereich wie beim Straßenbau zu liegen, obwohl der Bindemittelgehalt deutlich höher liegt als im Straßenbau und der Asphaltbeton immer mit einer zusätzlichen dichten Mastixschicht versiegelt ist.

## 5.5 Praxiserfahrungen aus freigelegten Deponien

Deters & Hoffmann (1974) empfehlen für die Deponieabdichtung Kunststoffdichtungen in Verbindung mit Asphaltbetonschichten. Auf eine Mastixversiegelung kann nicht verzichtet werden, "da der Asphaltbeton in den verbleibenden Hohlräumen vor Mikroorganismen geschützt werden muß". Folgender Aufbau von oben nach unten wird empfohlen:

- 4 cm Asphaltfeinbeton 0/12 mm, der nach oben mit einer Flüssigfolie versiegelt wird
- 7 cm Bitumen-Dränschicht 3/35 mm (Kontrollschicht)
- 3 cm Bitumen-Tragschicht
- 15 cm Mineralbeton.

Mit einer Dichtung dieses Aufbaus wurde die Industriemülldeponie Gochsheim ausgerüstet. Da es sich um eine Deponie handelte, auf der Öle nicht ganz auszuschließen waren, wurde eine Versiegelung mit einer "Flüssigfolie" vorgenommen. Zum mechanischen Schutz dieser Versiegelung wurde eine 15–20 cm Sandschicht empfohlen.

Auf der Zentraldeponie Bornhausen (Ldkrs. Goslar, Sohlfläche 1 ha) wurde für den 1. Deponieabschnitt (1974–1977) aus wirtschaftlichen Gründen eine Sohldichtung aus einer 8 cm Asphalttragschicht und einer 1 cm dicken Asphaltmastixschicht eingebaut. Wegen der mangelhaften Tragfähigkeit des Unterbodens (kiesige, schwach schluffige Sande) mußte später jedoch eine weitere 6 cm dicke Tragschicht eingebaut werden. – Die Sohle wies ein Gefälle von 1–4 % in Richtung zu einem in Drainkies 3/30 mm eingebetteten PVC-Dränrohr von 100 mm Durchmesser auf. Auf der teilweise sehr steilen Böschung erfolgte die Abdichtung nicht mit Asphalt, sondern mit einer 1 mm dicken

ECB-Folie. Eine dichte und scherfeste Verbindung zwischen Folie und Asphaltmastix im Bereich des Böschungsfußes wurde durch einen Haftkleber, der mit  $2 \text{ kg/m}^2$  in einer Breite von 1 m aufgebracht wurde, erreicht. Zum Schutz der Mastixabdichtung gegen LKWs und Müllkompaktoren diente jeweils eine 15–20 cm Sandschicht. Der 2. Deponieabschnitt (1977–1981) wurde mit einer ECB-Folie, der 3. Abschnitt (ab 1981 bis 1994) wurde mit einer 0,4 m Tonschicht, im Böschungsbereich mit ECB-Folie abgedichtet.

Schellenberg & Maurer (1992a und 1992b) berichten von Asphaltproben, die nach Einsatzzeiten von 5 bzw. 10 Jahren aus der Deponie Oberndorf-Bochingen ausgebaut wurden, welche seit 1971 in ehemaligem Gipssteinbruch in Betrieb ist. 1980 wurde bei einer Erweiterung der Deponie über einer verdichteten 30 cm mineralischen Schicht (Verformungsmodul  $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$  bei einem Verhältniswert  $E_{v2} : E_{v1} \leq 2,2$ ) eine Sohlabdichtung aus Asphaltbeton eingebaut.

Diese Asphaltabdichtung wies folgenden Aufbau auf:

Als Dichtungsschicht fungierte eine einlagige Tragdeckschicht 0/16 mm. Die Mineralstoffe waren aus 6 verschiedenen Körnungen aufgebaut: 56,4 % Kiesedelsplit (Quarzanteil > 70 %), 33,7 % Sand, 9,9 % Füller. Bindemittel: Straßenbaubitumen B80, 5,9 Gew.-%. Hohlraumgehalt nach Marshall: 1,5–2,1 Vol.-%. (Die Überprüfung 1991 ergab 3,3–4,5 %, an zwei Stellen 6–6,6 %.)

Der konstruktive Aufbau der Asphaltabdichtung bei der Erweiterung der Deponie 1985/86 war derselbe wie 1980 (Schellenberg & Maurer, 1992a und 1992b). Untersuchungen an 20 Mischgutproben ergaben Splittgehalte von 52–56 Gew.-%, Sandanteile von 33,2–38 Gew.-% und Füllermengen von 9,5–11,2 Gew.-% bei Bindemittelgehalten von 5,8–6,3 Gew.-%. An Bohrkernen wurden Hohlraumgehalte von 2,0–2,8 Vol.-% bestimmt. Die Überprüfung der Hohlraumgehalte mit einer Isotopensonde (Thin Layer, Modell 4640) ergab Hohlraumgehalte von 1,8 bis 3,2 Vol.-%.

1991 wurden Proben aus der 5 bzw. 10 Jahre alten Asphaltabdichtung genommen und untersucht. Im folgenden einige Ergebnisse in Stichworten:

Probestelle 1 (Alter 5 Jahre):

Hausmüll stark mit Erdmaterial durchsetzt, aber recht trocken. Asphaltabdichtung: keine mechanischen Beschädigungen. Oberflächenstruktur unverändert, kein Anlösen.

Probestelle 2 (Alter 5 Jahre):

Die über der Asphaltabdichtung liegende Müllschicht war während des Ausbaus relativ trocken. Unmittelbar auf der Asphaltabdichtung 10–20 cm kompakte Schicht aus anorganischen Stoffen. Die Sohlabdichtung aus Asphalt war trocken, wie bei Probestelle 1 war kein Angriff der Asphaltoberfläche festzustellen.

Probestelle 3 (Alter 10 Jahre):

Die Müllüberdeckung betrug ca. 10 m, 3 m über der Sohldichtung stand in erheblichem Umfang Sickerwasser (300 m<sup>3</sup>). Die Oberfläche des Asphalts war gegenüber den Probestellen 1 und 2 etwas dunkelfarbiger, aber weitgehend gleichartig unverändert hinsichtlich Struktur und Beschaffenheit wie bei den Probestellen 1 und 2.

Die Ergebnisse der analytischen Untersuchungen lassen sich für die Probe 3 wie folgt zusammenfassen:

Asphaltbohrkerne wurden unterteilt nach oberem, mittlerem und unterem Drittel untersucht, d. h. feingemahlen, und dann nach DEV S4 (DIN 38 414) eluiert. Die Ergebnisse zeigen bezüglich Chlorid, Kupfer und

Zink keine Änderung gegenüber einer Vergleichsprobe aus der Zufahrt der Deponie. Die CSB-Werte der Nullprobe und aus dem mittleren und unteren Drittel betragen ca. 9 mg/l, aus dem oberen Drittel ca. 20 mg/l. Am zurückgewonnenen Bindemittel (hier wurde offensichtlich keine Unterscheidung in oberes, mittleres und unteres Drittel vorgenommen!) wurde über Nadelpenetration (DIN 52 010) und Erweichungspunkt RuK (DIN 52011) eine gewisse Verhärtung des Bitumen-Bindemittels von 2,5 bis 4 °C festgestellt. Schellenberg & Maurer (1992a und 1992b) führen aus, daß dieser Wert für einen B80 Bitumen sehr gering ist und die ZTV (1990) eine Verhärtung im Rahmen der Herstellung der Bitumenschicht von bis zu 8 °C zuläßt. Eine Bindemittelverhärtung, bedingt durch Sickerwassereinfluß, wird vom Autor für unwahrscheinlich gehalten.

## 6 Durchlässigkeit von Asphaltdeckungen

Fragen zur Barrierewirkung von Asphalt, wie z. B. der Nachweis der "Wasserundurchlässigkeit" mit und ohne gelösten Schadstoffen unterschiedlicher Konzentration, und die "Problematik der Permeation" führten zu den Arbeiten von Arand (1992b) und Haug (1988) und zu einem F-Vorhaben (Arand, 1992a; Haas, 1991; Steffen, 1992). Die Dichtigkeitsprüfungen erfolgten in Drucktöpfen mit perforierten Böden, in die zylindrische 1 bis 4 cm dicke Asphaltproben eingebaut und mit Prüf Flüssigkeiten beaufschlagt wurden (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Auch Ryser (1993) betont mit Bezug auf die vorgenannten Untersuchungen die hervorragende Dichtigkeit der Asphaltbetone im Deponiebau, wobei er die dichten Wirkung in Zusammenhang bringt mit den Asphalteeigenschaften

- hoher Bindemittelgehalt mit ausreichender Viskosität
- 6-8 % "weiches bis mittelhartes" Bitumen mit hoher Klebkraft und guter Alterungsbeständigkeit
- geringer Porengehalt (1,5-3 %)
- hohe Zähelastizität.

Darüber hinaus sollen die Asphaltdeckungen über eine gewisse Selbstheilwirkung verfügen, die entstandene Risse sich wieder schließen läßt; nach Ryser hat die dichte flexible Matrix aufgrund des zähelastischen, amorphen Charakters unter Druck und Verformung eine gewisse Selbstheilwirkung.

### 6.1 Strömungsdurchgang von Flüssigkeiten (Konvektion)

Nach Haas (1989 und 1990) und Arand (1992a) können Asphaltdeckungen mit absoluter Dichtigkeit gegen wässrige Lösungen sowohl in sehr verformungsfähiger als auch in sehr stabiler Ausführung hergestellt werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß der Hohl-

raumgehalt im Asphalt < 3 Vol.-% ist (Haas, 1989; Dübner, 1991), was durch qualitätssichernde Maßnahmen sichergestellt werden muß.

Nach Schuhbauer (1992) ist Asphaltbeton nur wasserdicht bei einem Hohlraumgehalt < 3 Vol.-%, bei Bindemittelgehalten von 5,5-7,5 % und maximalen Korngrößen 8-16 mm.

#### 6.1.1 Laboruntersuchungen zum konvektiven Durchgang

Arand et al. (1992b) beschreiben Durchlässigkeitsversuche unter einem hydrostatischen Druck von bis zu 5 bar und bei Asphaltdeckungen von 1-4 cm sowie 16 cm. Als Prüfmedien wurden Salzlösungen sowie Salzlösungen mit Netzmittel gewählt. Die mit diesen anorganischen Medien festgestellte "absolute" Dichtigkeit wird auf organische Stoffe übertragen. Obwohl die Prüfzeiten in der Größenordnung von 24 Stunden in Relation zu Einsatzzeiten von 50, 100 und mehr Jahren auf der Deponie außerordentlich kurz sind, sind die Feststellungen zur Beanspruchung "Einwirkung von Flüssigkeiten, gegen die Bitumen beständig ist," sicher für die genannten Zeiträume korrekt.

Die Dichtigkeitsprüfungen nach Arand et al. (1992a), Haas (1991) und Steffen (1992) erfolgten in Drucktöpfen mit perforierten Böden, in die zylindrische 1 bis 4 cm dicke, unter Laborbedingungen hergestellte Asphaltproben eingebaut und mit den Prüf Flüssigkeiten beaufschlagt wurden. Bei den Prüf Flüssigkeiten handelte es sich zum einen um eine wässrige Lösung von Chloriden, Sulfaten und Ammoniumsalzen in größeren Konzentrationen, sowie von Schwermetallen in relativ geringeren Konzentrationen. Der pH-Wert einer solchen Prüflösung wurde variiert (Lösung 1: pH 4,5 - sauren Regen simulierend; Lösung 2: pH 7 - neutral; Lösung 3: pH 10).

Als alternative Prüfmedien wurden

- 2) die eben beschriebenen anorganischen Mischlösungen, aber mit Netzmittel (ebenfalls 3 pH-Werte)
- 3) Trichlorethylen und
- 4) Wasser eingesetzt.

Die Versuchstemperatur betrug 20 °C. Randumlaufigkeiten wurden durch eine dünnwandige Gummimembran, durch Mastixverguß des Probekörpers und bei den 1 cm-Proben durch eine ringsumlaufende Aufkantung (schüsselförmiger Körper) verhindert. Für je eine Stunde wurde der Probekörper mit konstantem Druck beaufschlagt, in der Reihenfolge 1, 2, 3, 4 bar. Anschließend wurde ein Druck von 5 bar 20 Stunden lang angelegt. In einer zweiten Versuchsphase wurde der Druck von 5 bar von Versuchsbeginn an für 24 Stunden aufgebracht. Die Versuchsdauern für die untersuchte Asphaltmastix 0/2 mm, 12 % B65 betragen zwischen 4 und 96 Stunden. Stundenweise wurde festgestellt, ob Testflüssigkeit ausgetreten war. Anschließend wurden Probekörper herausgenommen, mit "Wollappen abgetupft", dann mit Hammer und Meißel in zwei Teile gespalten. Die Bruchflächen wurden mittels Universal-Indikatorpapier bzw. Filterpapier "betupft", um zu prüfen, ob Prüf-flüssigkeit in den Probekörper eingedrungen war (lt. Angabe "bis auf wenige Millimeter genau").

Arand und Haas kommen zu dem Hauptergebnis,

- daß die Eindringtiefe keines der Prüfmedien, auch nicht von Trichlorethylen, 5 mm überschritt, und
- daß an der Unterseite der Prüflinge zu keiner Versuchszeit irgendwelche Mengen an Prüfmedium austraten.

Allerdings werden in diesem Zusammenhang keine Angaben zu Nachweisgenauigkeiten gemacht.

Bei vergleichbaren Prüfdauern wurden für Asphaltbeton 0/8 mm, 6,1 % B65, bzw. 0/16 mm, 5,6 % B65 dieselben Ergebnisse erzielt.

Trotz dieser zeitlich recht kurzen Versuchsdauern wird von Arand, Haas und Steffen eine "absolute" Dichtigkeit von Asphalt für konvektiven Flüssigkeitstransport festgestellt. Kritisch ist anzumerken, daß keine Angaben zum Hohlraumgehalt der Probekörper gemacht wurden, an denen die Dichtigkeitsuntersuchungen durchgeführt wurden. Nach Schuhbauer (1992) sind auch Vorbehalte bezüglich der Bindemittelgehalte, die seiner Ansicht nach zu niedrig waren, und zu hoher Bindemittelhärte anzumelden, so daß in den Versuchen kein "Wasserbauasphalt" geprüft wurde. Je weniger Bitumen ein Asphalt aufweist, desto "beständiger" ist er gegen flüssige Kohlenwasserstoffe. Je härter das Bitumen ist, desto geringer ist seine Löslichkeit.

## 6.1.2 Erfahrungen zur Wasserdichtigkeit von Deponien, Dämmen und Becken mit Asphalt-Betondichtungen

Es ist außerordentlich schwer, sich ein Bild davon zu machen, welche Systemdurchlässigkeiten, integral erfaßt über alle Fehlstellen an Nähten, Rissen und Anbindungen an feste Bauwerke, bei Asphalt-dichtungen üblich sind, da nur wenige Zahlen darüber veröffentlicht sind.

Arand et al. (1992b) zitieren zur Systemdurchlässigkeit Schönian (nicht veröffentlicht) mit außerordentlich günstigen Werten; hieraus wird der Schluß gezogen, diese Werte bewiesen, daß die Herstellung einwandfreier Nähte zwischen den einzelnen Fertigerbahnen problemlos möglich ist.

Boxall & Kubrycht (1989) berichten über die Planung einer Deponie in der Nähe von Hong Kong in einem entlegenen, nicht bewohnten Tal in den Bergen. Die vorgesehene Größe der Ablagerungsfläche beträgt 67 ha, die max. Höhe des "Müllberges" ca. 140 m, bei einem Fassungsvermögen von etwa 37 Mio. m<sup>3</sup>, wobei man plant, zunächst einmal auf eine Höhe von 80 m aufzufüllen, um zu messen und zu beobachten, und erst dann auf die volle Höhe zu gehen, weil es für derartige Müllschütthöhen noch keine Erfahrungen gibt.

Vorgesehen ist ein "Liner"system, wobei am Boden des Tales eine sog. Unterdränage vorgesehen ist, die einerseits natürliches Wasser (Oberflächenwasser, aus der Basis austretende Grundwässer u. ä.) möglichst ohne Berührung mit dem Müllkörper abführen soll, andererseits als Kontrollsystem für die eigentliche Abdichtung dienen wird. Es folgt die eigentliche Dichtungsschicht an der Basis als 15 cm dicke Asphaltbetonschicht, um das Einsickern von Sickerwasser in den Untergrund zu minimieren. Über der Dichtung ist eine Entwässerungsdränage und eine Filterschicht vorgesehen. Es wird davon ausgegangen, daß keine hundertprozentige Dichtung herstellbar ist. Man setzt auf die Funktion der Unterdränage, die stets bei kleinen Leckagen dafür sorgen soll, daß es zu einer Verdünnung kommt, so daß tiefer liegende Grundwässer nicht in Mitleidenschaft gezogen werden. Man rechnet aufgrund hydrogeologischer Abschätzungen mit einem minimalen Wasser-aufkommen in der Unterdränage von 86 m<sup>3</sup>/d. Dann wäre, wenn der Ammoniakgehalt noch innerhalb der Trinkwasseranforderung bleiben soll, eine maximale Leckrate von 0,009 m<sup>3</sup>/d noch tragbar. Die Fläche der Deponiebasis, ohne Böschung, beträgt etwa 20 ha. Eine Leckratenabschätzung nach Darcy wurde zum Vergleich für eine 150 mm-Asphaltbetonschicht und eine 1,5 mm Kunststoffdichtungsbahn vorgenommen, mit angenommenen mittleren Einstauhöhen  $h = 1$  m und  $h = 0,1$  m. Dabei wurden  $k$ -Werte von  $10^{-14}$  bis  $10^{-12}$  m/s vorausgesetzt. So ergaben sich beispielsweise für den Fall  $k = 10^{-13}$  m/s und  $h = 1$  m Leckraten von

0,05 m<sup>3</sup> / (ha · d) für die Dichtungsbahn und 0,0005 m<sup>3</sup> / (ha · d) für den Asphaltbeton. Basierend auf diesen Berechnungen, den duldbaren Schadstoffraten, Kostenerwägungen, der einfachen Herstellung von Asphaltbeton und dem "zu erwartenden Langzeitverhalten", hat man sich vorläufig für die Verwendung von Asphaltbeton entschieden.

Nach Schuhbauer (1992) wird die Wasserdichtigkeit, die in der Praxis beim Bau von Dämmen, Pumpspeicherwerken und Kanälen erreicht wird, von Fachleuten im Wasserbau im allgemeinen als zufriedenstellend beurteilt. Allerdings streuen die Werte stark. Als zufriedenstellend werden Wasserverluste von 5 bis 10 l/s, bezogen auf das Bauwerk, bezeichnet, wenn die Standsicherheit der Dämme oder Böschungen nicht beeinträchtigt wird und das Wasser gefahrlos abgeführt werden kann. Degen & Brams (1987) führen aus, daß als Dammdichtungen (von Bundeswasserstraßen) vorwiegend Oberflächendichtungen aus Asphaltbeton eingebaut worden seien. Von einer absoluten Wirksamkeit könne nicht ausgegangen werden.

Weitere Beispiele zu Restdurchlässigkeiten und anderen Schäden an Asphalt dichtungen, die sicher nicht allein als Folge einer nicht ausreichenden Qualitätssicherung bei der Herstellung der Dichtungen anzusehen sind, sondern auch durch Setzungen, fehlerhaften Anbindungen und durch Alterung hervorgerufen wurden, können Schuhbauer (1992) entnommen werden. Die Angaben zur Systemdurchlässigkeit von Becken schwanken sehr stark, die Angaben liegen zwischen 1 l/s und ca. 50 l/s (Tschernutter & Wellacher, 1985; Venier et al., 1988; Conclusions GR Q61, 1988). Der ICOLD-Kongreß in San Francisco, zu dem 55 Beiträge über die Dichtigkeit von Becken mit Asphalt oberflächendichtungen geliefert wurden, fand 1988 statt. In der Schlußfolgerung zu diesem Kongreß wird ausführt, daß ganz allgemein gesagt werden kann, daß Wasserverluste eher eine wirtschaftliche als eine Frage der Sicherheit sind.

## 6.2 Durchlässigkeit für KW bzw. CKW (diffusiv)

Nach Haas (1990) lassen sich Asphaltbeläge herstellen, die nicht nur absolut konvektions-, sondern auch diffusionsdicht sind.

### Laboruntersuchungen zum diffusiven Durchgang

In einem AIF-Forschungsvorhaben (Arand et al., 1992b; Haas, 1989 und 1990) wurde der diffusive Schadstofftransport durch Asphaltbeton untersucht. Als Permeenten dienten organische Stoffe, die Bitumen aus dem Asphalt herauslösen können, wie Trichlorethylen und ein sog. "Neunergemisch" aus gleichen Gewichtsanteilen Trichlorethylen, Tetrachlorethylen, Aceton, Methanol,

Tetrahydrofuran, i-Octan, Xylol, Chlorbenzol und Toluol. Zunächst folgen einige Angaben zu den Versuchsbedingungen in Stichworten:

- Asphaltprobekörper (im Labor hergestellt):  
Zylinderdurchmesser 150 mm. Stirnseitig befanden sich in den Probekörpern topfähnliche Vertiefungen mit 120 mm Durchmesser, die sich auf 110 mm verjüngten und zur Flüssigkeitsaufnahme 30 mm tief waren.

Asphaltmastix 0/2 mm mit 12 bzw. 14 Gew.-% B65: in Schichtdicken von 1, 2, 4, 8, 16 cm

Asphaltbeton 0/8 mm mit 6,1 bzw. 6,9 Gew.-% B65: in Schichtdicken von 4, 8, 16 cm

Asphaltbeton 0/16 mm mit 5,6 bzw. 6,2 Gew.-% B65: in Schichtdicken von 8, 16 cm

- Probekörperverdichtung:  
In Stahlformen, 0/8 und 0/16 mm mit Vibrations- und Knetverdichtung, bei den Gemischen 0/2 mm und 12 % bzw. 14 % Bindemittelgehalt nur mit geringem bzw. gar keinem Verdichtungsaufwand.
- Meßzellenaufbau:  
Die Probekörper kamen in zylindrische Töpfe, deren Böden perforiert waren, und wurden mit der Prüfflüssigkeit bis maximal 10 mm Höhe einmalig "gefüllt". Anschließend wurden die Töpfe mit Aluminiumblech bzw. Glasdämmstoff abgedeckt und ihre Gewichtsänderung mit einer Sartoriuswaage, Typ C 30 000 verfolgt. Die hochgezogenen Probekörper ränder hielten dem Einfluß von 40 °C und Lösemittel nicht ausreichend stand, so daß in abgewandelten Prüftöpfen die "Topfränder" der Probekörper dadurch "gestützt" wurden, daß die topfartigen Vertiefungen mit Diabas-Splitt der Körnung 2/3,5 mm aufgefüllt wurden.

- Permeenten:  
Trichlorethylen sowie Neunkomponentengemisch der BAM aus gleichen Gewichtsanteilen Aceton, THF, Methanol, i-Oktan, Toluol, Xylol, Trichlorethylen, Tetrachlorethylen, Chlorbenzol (vgl. August et al., 1992).

Beaufschlagungsmengen: 10 l/m<sup>2</sup> (100 cm<sup>3</sup> pro Topf, Flüssigkeitshöhe 1 cm); 5 l/m<sup>2</sup> (50 cm<sup>3</sup> pro Topf, Höhe 5 mm) und 1 l/m<sup>2</sup> (10 cm<sup>3</sup> pro Topf, Höhe 1 mm).

- Auswertemodalitäten:  
Erfassung der Gewichtsänderungen gravimetrisch, Korrekturen für Luftdruck- und Temperaturschwankungen (Auftriebskorrekturen) sowie für Staubablage wurden vorgenommen.

Die Versuchsergebnisse gestalten sich wie folgt: Für die angebotene Permeentenmenge von 10 l/m<sup>2</sup> (aufgebracht bei Versuchsbeginn) wurden folgende Werte ermittelt:

Probekörper	Dicke (cm)	Permeenten			
		Trichlorethylen (Diff.-Rate in $g/m^2 \cdot d$ ) {Effusionszeit in Tagen}		Gemisch (Diff.-Rate in $g/m^2 \cdot d$ ) {Effusionszeit in Tagen}	
0/2 mm, 12 % B65	1	104	{3}	36,8	{8}
" "	2	23	{19}	6,4	{40}
" "	4	2,3	{90}	0,8	{170}
" "	8	*		*	
" "	16	*		*	
0/2 mm, 14 % B65	1	70	{5}	19	{12}
" "	2	45	{10}	3,7	{68}
" "	4	3,7	{75}	1,3	{160}
" "	8	0,4	{145}	*	
" "	16	*		*	
0/8 mm, 6,1 % B65	4	2,3	{118}	0,3	{183}
" "	8	*		*	
" "	16	*		*	
0/8 mm, 6,9 % B65	4	2,2	{140}	0,3	{220}
" "	8	*		*	
" "	16	*		*	
0/16 mm, 5,6/6,2 % B65	8	*		*	
" "	16	*		*	

\* Während der Meßzeit von 500 Tagen konnte keine Permeationsrate ermittelt werden.

Zu diesen "Permeationsraten" und Effusionszeiten (die Zeiten, bis eine merkliche Gewichtsabnahme der Probekörper registriert wurde) muß der Verfasser anmerken, daß diese Werte ganz wesentlich durch die begrenzten Mengen, mit denen Trichlorethylen bzw. das Neun-Komponenten-Gemisch der Probenoberfläche angeboten wurden, bestimmt worden sind. Bedingt durch den Versuchsaufbau, bei dem geringste Mengen Lösemittel auf große Bitumenmengen (Mastix) der Asphaltprobe einwirken, werden Zweifel geäußert, ob die gemessenen Diffusionsraten überhaupt im Zusammenhang mit der diffusiven Durchlässigkeit der Asphaltproben stehen oder ob sie lediglich vom Versuchsaufbau abhängig sind. Die untersuchten Werkstoffe Asphaltbeton bzw. Asphaltmastix sind gegenüber dem Permeenten nicht beständig. Aus diesem Grund wurden von Arand et al. (1992b) im Versuch die Permeenten nur in begrenzter Menge angeboten, um ein Auflösen der Proben zu unterbinden.

In diesem Zusammenhang wäre interessant gewesen zu wissen, wie die Oberflächen der untersuchten Asphaltproben bei Versuchsende ausgesehen haben. Ist das Bindemittel beträchtlich angelöst worden oder eben wegen der geringen angebotenen Mengen Lösemittel nur

unbedeutend, und wie hätte sich der Asphalt verhalten, wenn diese Lösemittelmengen deutlich erhöht worden wären?

Aus der Straßenbaupraxis ist bekannt, daß Destillationsbitumen B80, B200 oder B300 durch Zumischen von 20 bis 30 Gew.-% Lösemittel (Benzine, Benzole, Chlorkohlenwasserstoffe u. a.) stark verflüssigt werden, während ihre Viskosität stark erniedrigt wird. Dieser Effekt wird bei der großtechnischen Herstellung von sogenanntem Kaltbitumen ausgenutzt. Dessen Ausflußzeit, gemessen im sogenannten Straßenteerviskosimeter mit einer Düsenöffnung von 4 mm Weite, liegt bei 25 °C zwischen 120 und 200 Sekunden.

Prinzipiell ist zu den Diffusionsversuchen von Haas und Arand festzustellen, daß es wenig sinnvoll ist, Permeationsmessungen mit einem Stoff durchzuführen, der den zu permeierenden Stoff löst. Aus diesem und den zuvor genannten Gründen sind die von Arand et al. genannten "Permeationsraten" nicht vergleichbar mit Permeationsraten, wie sie von August et al. (1992) bei konstantem Schadstoffangebot in Langzeitversuchen mit einer Laufdauer von über 7 Jahren ermittelt wurden.

Die Diffusion von Wasser durch Asphalt ist insbesondere im Hinblick auf den Feuchtehaushalt der mineralischen Dichtungsschichten und des Deponielagers unterhalb einer Asphaltschicht von erheblicher Bedeutung. Damit Wasserdampf durch ein Medium wie z. B. Asphalt oder Luft durchtreten (diffundieren) kann, muß ein Wasserdampfdruckgefälle vorhanden sein. Der Dampf wird dann aus der Zone mit höherem Wasserdampfdruck in diejenige mit niedrigerem Druck diffundieren. Der Wasserdampf kann jedoch nicht ungehindert im Druckgefälle transportiert werden. Je nach chemischer Beschaffenheit des Mediums, Hohlraumgehalt und Porendurchmesser, wird dem diffundierenden Wasserdampf ein größerer oder kleinerer Widerstand entgegengesetzt. Der Diffusionswiderstandsfaktor  $\mu$  besagt, um wieviel mal der Diffusionswiderstand des Mediums größer ist als derjenige einer gleich dicken Luftschicht bei gleicher Fläche, gleicher Temperatur und gleicher Druckdifferenz des Wasserdampfes. Untersuchungen zum Wasserdampfdiffusionsverhalten von Asphaltbeton 0/5 mm wurden von Michalski & Vater (1979) durchgeführt. Die Laboruntersuchungen wurden an zwei Mineralgemischen

bei verschiedenen Bindemittelgehalten durchgeführt. Die Mineralmischungen unterschieden sich lediglich in der zugesetzten Füllermenge um 2 Gew.-% (4 bzw. 6 Gew.-% Kalksteinmehl absolut). Auf diese Art sollte der Einfluß des Hohlraumgehaltes auf den Diffusionswiderstandsfaktor bei unterschiedlicher Zusammensetzung des Mischgutes erfaßt werden. Zur Untersuchung wurden Prüfkörper von 2 cm Dicke und einem Durchmesser von 9,7 cm verwendet. Die Verdichtung der Körper erfolgte im Marshall-Gerät bei 2·50 Schlägen (Normverdichtung). Die Messung erfolgte auf gravimetrischem Wege in Anlehnung an DIN 53 122 bei 23 °C und einem Luftfeuchtegefälle von 0 auf 85 % (vgl. DIN 53 429).

Aus den Meßergebnissen geht hervor, daß der Diffusionswiderstandsfaktor gegenüber Wasserdampf in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt des Asphaltes zwischen 200 bei 10 Vol.-% Hohlraumgehalt und 2000 bei 5,5 Vol.-% Hohlraumgehalt schwankt. Die Vergrößerung des Hohlraumgehaltes um 1 Vol.-% bewirkt eine Abnahme des Wasserdampf-Diffusionswiderstandsfaktors um ca. 400.

## 7 Ausblick

Der augenblickliche Kenntnisstand erlaubt keine abschließende Beurteilung bezüglich der Eignung von Asphalt dichtungen für Deponien zur Lagerung von Siedlungsabfällen und Sonderabfällen. Insbesondere die Fragen der Beständigkeit, des Alterungsverhaltens und der Qualitätssicherung lassen Bedenken aufkommen, ob die bisher angewendeten Bauarten grundsätzlich für diesen Anwendungszweck geeignet sind und ob nicht andere Bauarten bessere Voraussetzungen mitbringen. Zu nennen wären hier vor allen die für Brückenabdichtungen entwickelten vorgefertigten Dichtungsbahnen, die teilweise sogar mit Edelstahlkaschierungen ausgestattet

sind, welche eine absolute Diffusionssperre gewährleisten, wenn die Fügetechnik entsprechend weiterentwickelt wird. Die Verwendung vorgefertigter Produkte erleichtert die Qualitätskontrolle erheblich und garantiert bei entsprechender Überwachung eine große Lieferkonstanz. Für spezielle Anwendungsfälle, bei denen kein nennenswerter Anfall von organischen Lösemitteln und anderen Bitumen angreifenden Stoffen zu erwarten ist, wie z. B. bei Deponien für landwirtschaftliche Abfälle, ist bei entsprechender Dimensionierung durchaus eine Anwendung von Asphalt der vorgenannten Weise denkbar.

## 8 Literatur

Arand, W. (1982): Zur Alterung von Bitumen. Die Asphaltstraße 4, S. 159-163.

Arand, W. (1990): Eignung von Asphalten als Baustoff für Basisabdichtungen von Deponien – AIF-Forschungsvorhaben des deutschen Asphaltinstitutes. Bitumen 52, Heft 2, S. 76-78.

Arand, W.; Haas, H.; Steinhoff, G. (1992a): Eignung von Asphalten als Baustoff für Basisabdichtungen von Deponien. Abschlußbericht des AIF-Vorhabens Nr. 7959.

Arand, W.; Haas, H.; Steinhoff, G. (1992b): Zur Herstellbarkeit, Beständigkeit und Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen. Bitumen 4, S. 152-162.

Asbeck, W. F. van (1968): Bitumen im Wasserbau. Band 2. Mainz und Heidelberg: Verlagsanstalt Hüthig und Dreyer.

August, H.; Tatzky R.; Jakob, I. (1985): Kunststoffe schützen Grundwasser vor Deponieschadstoffen – kombinierter Einsatz von polymeren und mineralischen Baustoffen führt zur Problemlösung. Kunststoffe im Bau 20, Heft 4, S. 208-211.

August, H.; Tatzky-Gerth, R.; Preuschmann, R.; Jakob, I. (1992): Permeationsverhalten von Kombinationsdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. F+E-Vorhaben 102 03 412. Durchgeführt im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Barth, G. J. (1962): Asphalt Science and Technology. New York, London: Gordon and Breach. S. 197-205.



- Becker, G.; Kerner-Gang, W. (1969): Recent Research Work on Biodeterioration of Materials in Berlin-Dahlem. *Int. Biodeterioration Bulletin* 5, Heft 3, S. 125-133.
- Bellin, P. (1992): Wird der Asphalt in den USA neu erfunden? – Ursachen, Stand und Ziele der Bitumen- und Asphaltforschung im Strategic Research Programm (SHRP). *Bitumen* 2, S. 69-74.
- Bitumen- und Asphalt-Taschenbuch. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH.
- Blinde, A.; Göggel, H. (1986): Nachträgliche Maßnahmen zur Verbesserung von Anschlüssen zwischen Asphaltbetondichtungen und Kunstbauwerken – Sanierung von Wasserbauten. *DVWK Schriften*. Heft 77.
- Boxall, J.; Kubrycht, S. A. (1989): The North East New Territories Landfill, Hong Kong. *Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium*, 9.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. D.XII-1-17.
- Brdicka, R. (1962): Grundlagen der physikalischen Chemie, 3. Auflage. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften. S. 774-823.
- Brock, T. D.; Smith, D. W.; Madigan, M. T. (1991): *Biology of Microorganisms*, 6th Edition. London: Prentice-Hall International.
- Conclusions GR Q61 (1988). 16. ICOLD San Francisco, Q 61.
- Degen, F. P.; Brams, J. (1987): Wirkung von Dichtungsleckagen. *Wasserwirtschaft* 77, Heft 6.
- Deters, R.; Hoffmann, H. G. (1974): Abdichtung von Mülldeponien. *Teerbau Veröffentlichungen* 21, S. 74-83.
- DIN 55 946 (1983): Bitumen und Steinkohlenteerpech.
- Ditter, K.; Haug, W. (1981): Regenerierung von bituminösen Außenhautdichtungen bei Staudämmen und Pumpspeicherbecken. *STRABAG Schriftenreihe* 11. Folge H 1.
- Doell, F. (1990): Die "Sandwichdichtung" für Abfalldeponien, ein Beitrag zur Langzeit-Emissionsbegrenzung von Basis-, Flanken- und Oberflächenabdichtungen. *EntsorgungsPraxis* 10, S. 572-578.
- Dorner, H. W.; Amort, K. (1991): Bindemittelveränderungen in Deck-, Binder- und Tragschichten von Asphaltfahrbahnen. *Bitumen* 3, S. 106-111.
- Dübner, R. (1985): Asphaltstraßenbau: Fahrbahndecken. *ARBIT-(Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie-) Schriftenreihe Bitumen* 47, S. 1-48.
- Dübner, R. (1991): Baustoffe im Asphaltstraßenbau *ARBIT-(Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie-) Schriftenreihe Bitumen* 50, S. 1-64.
- Düllmann, H.; Eisele, B. (1989): Schadensanalyse von Deponiebasisabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahnen. F+E Vorhaben 103 02 225. *Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.
- Duncanson, J. K.; Johnston, T. A. (1988): The Impervious Membranes at Colliford and Roadford Reservoirs in South West England. 16. *ICOLD San Francisco*.
- EAAW 83 (1983): Empfehlungen f. die Ausführung v. Asphaltarbeiten im Wasserbau. *EAAW* 83, 4. Ausgabe. Essen: Deutsche Gesellschaft für Erd- u. Grundbau e.V.
- Ehasz, J. L. (1982): Experience with upstream impermeable membranes. 14. *ICOLD Rio de Janeiro*, Q 55, R 27.
- EN 29 004 (1987): Europäische Norm EN 29 004: Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätssicherungssystems – Leitfaden.
- EN 45 000 (1989): Europäische Normenreihe EN 45 000 über Prüfung, Zertifizierung und Akkreditierung.
- EN 45 001: Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflabors.
- Engelmann, B. (1992): Strategien zur Bewertung der Wirksamkeit von Deponieabdichtungssystemen. 8. Nürnberger Deponieseminar "Geotechn. Probleme beim Bau von Abfalldeponien". S. 29-44.
- Gauer, P. K. (1992): Relaxationsverhalten von Asphalt. *Bitumen* 2, S. 75-78.
- Gosset, J. P.; Herment, R.; Bienaimé, C.; Vovard, S. (1989): Watertightness with a Bituminous Geomembrane of a "Class 1" Landfill. *Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium*, 9.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. B.I-1-11.
- Gourc, J. P.; Perrier, H.; Leclercq, B.; Benneto, J. P. (1989): Standard Tensile Test for Geomembranes. *Proceedings Sardinia 89, Second International Landfill Symposium*, 9.-13. Oktober 1989, Porto Conte, Sardinia, Italy. S. B.IV-1-17.
- Gray, W. D.; Martin, G. W. (1947): The Growth of Fungi on Asphalt-Treated Paper. *Mycologia* 39, S. 587-601.
- Green, E. L.; Tolonen, W. J.; Peters R. J. (1976): *Transportation Research Record* 595. Washington: TRB. S. 1-8.

- Haack, A.; Emig, K.-F. (1990): Parkdeckabdichtungen mit Bitumenwerkstoffen, Grundlagen – Planung – Bemessung – ausgewählte Details. ARBIT-(Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie-)Schriftenreihe Bitumen 55.
- Haas, H. (1959): Technische Eigenschaften von Asphaltbeton für Wasserbauzwecke. Die Bautechnik 9, S. 1-8.
- Haas, H. (1989): Zur Eignung von Deponieabdichtungen aus Asphaltbeton. Kommunalwirtschaft 1, S. 1-8.
- Haas, H. (1990): Flächendichtungen aus Asphaltbeton für Deponien und Auffangbecken. VDI Berichte 773, S. 271-287.
- Haas, H. (1991): Eignung von Asphalten zur Herstellung von Deponiebasisabdichtungen. Die Asphaltstraße 2, S. 16-24.
- Haas, H. (1992): Zur Verformbarkeit von Dichtungsbelägen aus Asphalt. Bitumen 4, S. 163-166.
- Harris, J. O.; Kline, R. M.; Crumpton, C. P. (1956): A Study of the Presence of Hydrocarbons Utilizing Bacteria at the Soil Asphalt Interface of Kansas Highways. Trans. Kansas Acad. Sci. 59, S. 495-499.
- Harris, J. O. (1966): Asphalt Oxidizing Bacteria of the Soil. Industrial + Engineering Chemistry 58, Heft 6, S. 65-69.
- Haug, M. D.; Kozicki, P. (1982): Selection Criteria for Slurry Cutoffs. Proceedings, 1982 Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering. Vol. 2. S. 721-740.
- Haug, W. (1984): Regenerierung von Asphaltaußenhautdichtungen bei Staudämmen und Pumpspeichern. Wasserwirtschaft 74, Heft 3.
- Haug, W.; Alchholz, H. (1986): Sanierung des Alzkanals – Bauausführung. Wasserwirtschaft 76, Heft 3.
- Haug, W. (1988): Asphaltabdichtungen im Wasserbau und für Deponien. Die Asphaltstraße 5, S. 13-17.
- Huschek, S. (1992): Der Mischprozeß von Asphalt bei Mitverwendung von Asphaltgranulat; Untersuchung mit Hilfe eines Modellmischers. Bitumen 2, S. 57-62.
- Huth, P.; Ditter, K.; Heidbrink, W. (1988): New Placing Techniques for Asphaltic Concrete Linings at the Geeste Storage Reservoir. Seizieme Congres des Grands Barrage, San Francisco. Q. 61 R. 11. S. 177-187.
- Ivanov, S. K.; Rouchev, D. D.; Markova, K. J. (1980): Study of Initial Oxidative Process in Bituminous Coals and Anthracites by Manometric Methods. Fuel 59, S. 273-184.
- Jones, T. K. (1965): Effect of Bacteria and Fungi on Asphalt. Material Protection 4, S. 39-43.
- Kerner-Gang, W. (1967): Zur Prüfung von Bitumen auf Widerstandsfähigkeit gegen Schimmelpilzbefall. Material und Organismen 5, Heft 3, S. 161-177.
- König, H. W.; Idel, K. H. (1973): Report on Behavior of Impervious Surface of Asphalt. 11. ICOLD Madrid, Q 42, R 20.
- Kopsch, H. (1992): Auswahlkriterien für Polymere zur Modifizierung von Bitumen: Alterungsverhalten. Bitumen 2, S. 63-68.
- Kulmann, F. E. (1958): Microbiological Deterioration of Buried Pipe and Cable Coatings. Corrosion 14, S. 23-32.
- Lehdrich, J. (1981): Messungen zur Ermittlung des Einflusses der Heißsilolagerung auf mögliche Veränderungen der Bindmitteleigenschaften. Bitumen 43, Heft 6, S. 190-192.
- Leuthner, R. (1979): Untersuchung des Schichtverbundes beim bituminösen Oberbau. Bitumen 41, S. 84-91.
- Michalski, Ch.; Vater, E.-J. (1979): Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von Asphaltbeton. Unveröffentlicht.
- Migliarina, K. (1984): Asphaltstraßenbau, Unterhaltung von Asphaltbefestigungen. ARBIT-(Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie-)Schriftenreihe Bitumen 32, S. 1-56.
- Moschopedis, S. E.; Speight, J. G. (1975): Oxidation of Bitumen. Fuel 54, S. 210-212.
- Müller, H. W. (1966): Flüssigkeitsdichte Schutzschichten aus Bitumen. In: Kleines Handbuch des Säureschutzes. Weinheim (Bergstraße): Verlag Chemie GmbH.
- Müller, U.; August, H.; Müller, W.; Neubert, D. (1992): Prüfung der Beständigkeit von Geotextilien unter deponiespezifischen chemischen Beanspruchungen. 2. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik (K-Geo), 20-22. Mai 1992, Luzern, Schweiz. SVG Schweizerischer Verband der Geotextilhersteller. S. 335ff.
- Muñoz Cebrian, J. M. (1983): Microbial Deterioration of Bituminous Materials: Selection of Microorganisms with Specific Metabolic Capacity on Hydrocarbons. In: Oxley, T. A.; Barry, S. (Hrsg.): Biodeterioration 5. New York: John Wiley and Sons. S. 472-485.
- N. N. (1991): Merkblatt Asphaltabdichtungen für Talsperren und Becken. Bonn: DVWK. Entwurf, Stand Juni 1991.

- N. N. (1992): Zur Beurteilung der Eignung von Asphalt für Basisabdichtungen von Deponien, kurze Tagungsmitteilung. Bitumen 2, S. 84.
- Neumann, H.-J. (1987): Oxidationsverhalten von Bitumen bei Gebrauchstemperaturen (Oxidation Behaviour of Bitumen at Utility Conditions). Erdöl Erdgas Kohle 3, S. 131-133.
- Neumann, H.-J.; Rahimian, I. (1992): Zur Rheologie des kolloidalen Systems Bitumen. Erdöl-Kohle-Erdgas-Petrochemie 45, S. 41-44
- Neumann, H.-J.; Rahimian, I.; Paczynska-Lahme, B. (1992): Zur Strukturalterung von Bitumen. Bitumen 2, S. 54-56.
- Partl, M. (1992): Qualitätssicherung durch Materialprüfung bei Asphaltstraßen. Bitumen 4, S. 146-152.
- Phillips, U. A.; Traxler, R. W. (1963): Microbial Degradation of Asphalt. Appl. Microbiol. 11, S. 235-238.
- Richter, E. (1989): Zur Verhärtung des Bitumens und deren Auswirkung auf die Lebensdauer von Asphaltbetondeckschichten. Bitumen 51.
- Ryser, W. (1993): Erfahrungen mit der Planung und Herstellung von Deponieabdichtungen aus Asphaltbeton in der Schweiz. UTECH Berlin, 15.02.1993, Ablagerung von Siedlungsabfällen. Berlin: Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin e.V. S. 51-72.
- Schellenberg, K.; Maurer, W. (1992a): Asphaltabdichtung in Deponien: Hausmülldeponie Oberndorf-Bochingen. AbfallwirtschaftsJournal 4, Heft 5. S. 425-429.
- Schellenberg, K.; Maurer, W. (1992b): Asphaltabdichtung in Deponien: Hausmülldeponie Oberndorf-Bochingen. Bitumen 1, S. 27-31.
- Schlegel, H. G. (1991): Allgemeine Mikrobiologie, 7. Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- Schoenen, D. (1978): Über die mikrobielle Besiedlung eines Bitumenanstrichs in einem Reinwasserbehälter. Material und Organismen 13, Heft 2. S. 81-88.
- Schönian, E. (1972): Asphaltdeckwerke für den Bau des Eiderdammes. Bitumen 4, S. 1-7.
- Schönian, E. (1986): Langzeitverhalten von Asphaltabdichtungen im Wasserbau. Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau. Heft 62. S. 67-80.
- Schönian, E. (1991a): Asphaltbeton-Dichtungen im Deponiebau. Müll und Abfall 1, S. 12-19.
- Schönian, E. (1991b): Asphaltbeton-Dichtungen im Deponiebau (Ergänzungen zu Schönian, 1991a). Müll und Abfall 3, S. 173.
- Schuhbauer, A. (1992): Asphaltabdichtungen für Deponien. Gutachten (unveröffentlicht) für das Expertengespräch "Asphalt im Deponiebau" am 27.08.1992 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin.
- Shahin, M.; McCullough, B. F. (1973): Highway Research Record Nr. 466. Washington. S. 96-112.
- Smith, L. L.; McPerson, H. H.; Oechsel, R. G. (1988): Longterm Performance of Asphalt Lined Upper Reservoir Seneca Pumped Storage Station. 16. ICOLD San Francisco, Q 61, R 25.
- Smith, M. E. (1993): The Gilt Edge Asphalt Leach Pad: A Case History. Geosynthetics '93 - Vancouver, Canada. S. 1203-1214.
- Sonntag, H. (1977): Lehrbuch der Kolloidwissenschaft. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft. S. 180-181.
- Spillmann, P. (1992): Stand und Entwicklungstendenzen in der Deponiebautechnik. In: Fettweis, G. B.; Golser, J.; Hengerer, D. (Hrsg.): Deponietechnik und Entsorgungsbergbau, Kongreßbericht der 1. DEPOTECH Kongreßmesse Leoben/Österreich 18.-19.11.1992. Rotterdam: Balkema. S. 27-34.
- Springer, E.; Beier, A.; Kluge, H.-J. (1991): Beständigkeit und Dichtigkeit von Asphalt gegen Mineralölprodukte. Bitumen 2, S. 84-88.
- Steffen, H. (1979): Abdichten von Mülldeponien unter Verwendung von örtlich anstehenden Materialien, dargestellt am Beispiel einer Deponie der Stadt Bonn. Kommunalwirtschaft 1, S. 13-20.
- Steffen, H. (1992): Die Eignung von Asphalt zur Deponieabdichtung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Abdichtung von Deponien und Altlasten. Grundkursus. Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH. S. 183-201.
- Traxler, R. N. (1961): Asphalt, Its Composition, Properties and Uses. New York: Reinhold Publisher Corporation.
- Traxler, R. W.; Proteau, P. R.; Traxler, R. N. (1965): Action of Microorganisms on Bituminous Materials, I. Effect of Bacteria on Asphalt Viscosity. Appl. Microbiol. 13, Heft 6. S. 838-841.

Traxler, R. W. (1966): Bitumen Attack by Microorganisms. Industrial + Engineering Chemistry 58, Heft 6. S. 59-64.

Tschernutter, P.; Wellacher, H. (1985): Die Sanierung eines Schüttdammes mit Asphaltoberflächendichtung im Hochgebirge. 15. ICOLD Lausanne, Q 59, R 33.

Tschernutter, P. (1986): Erfahrungen mit Oberflächendichtungen an Staudämmen im Hochgebirge – Sanierung von Wasserbauten. DVWK-Schriften. Heft 77.

Vallerga, B. A.; Halstead, W. J. (1972): Effect of Field Aging on Fundamental Properties of Paving Asphalts. AAPT Proc. 41.

Venrier, C.; Martini, O.; Mattier, J. L. (1988): Long Term Behavior of Bituminous and Cement Concrete Facings of Compensations Reservoirs in Switzerland. 16. ICOLD San Francisco, Q 61, R 18.

Weiss, D. (1992): Dünendecke an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern (Kurzmitteilung). Bitumen 2, S. 88.

Welborn, J. Y. (1970): Asphalt Hardening – Fact and Fallacy. Public Roads 35 (Febr.).

Wiedemann, P. M. (1992): Bürgerängste: Ausreden oder Einbeziehen? – Der Umgang mit Akzeptanzproblemen bei entsorgungswirtschaftlichen Vorhaben. Abfall und Deponie, Sonderband des Jahrbuches Umwelt 92/93. S. 9-14.

Zenke, G. (1974): Über die Problematik der Untersuchung und normfähigen Erfassung spezieller Eigenschaftsmerkmale von Bitumen, Teil I: Duktilität. Bitumen, Teere, Asphalte, Peche + verwandte Stoffe 25, S. 21-24.

Zenke, G. (1975): Modellversuche zum Ablauf der thermischen Alterung von Bitumen. Bitumen 2, S. 44-48.

Zenke, G. (1977): Zur Langzeitveränderung von Bindemitteln in Asphalt-Tragschichten. Bitumen 6, S. 175-184.

ZTV (1990): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau bituminöser Fahrbahndecken: ZTV bit.-StB. 84, Fassung 1990, ZTVT-StB. 86, Fassung 1990.

## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**  
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas  
**Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

J. Ziebs  
**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester  
**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit - Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner  
**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider  
**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz  
**Chromatographie und chemische Konstitution - Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith  
**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller  
**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin  
**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause  
**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg  
**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer  
**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl  
**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch  
**Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers  
**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos  
**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolphi  
**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig  
**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrütung**

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch  
**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske  
**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi  
**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

E. Knublauch  
**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise  
**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM - Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg  
**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich  
**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider  
**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon  
**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann  
**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher  
**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi  
**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nicht-stationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe  
**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff**

Nr. 35/1976

E. Limberger  
**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper - Vorschlag für ein Prüfverfahren -**

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt  
**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck  
**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen - Vorschlag für ein Prüfverfahren -**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig  
**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf  
**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche  
**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher  
**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Diellen  
**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

W. Struck  
**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976

W. Matthees  
**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"**

- Nr. 45/1976  
W. Paatsch  
**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**
- Nr. 46/1977 (vergriffen)  
G. Schickert, H. Winkler  
**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
**Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**
- Nr. 47/1977  
A. Plank  
**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**
- Nr. 48/1977  
U. Holzlohner  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**
- Nr. 49/1977  
G. Wittig  
**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**
- Nr. 50/1978 (vergriffen)  
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiers, G. Andreae, W. Markowski  
**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**
- Nr. 51/1978  
J. Sickfeld  
**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen**
- Nr. 52/1978  
A. Tomov  
**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**
- Nr. 53/1978  
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi  
**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**
- Nr. 54/1978  
H. Sander  
**Magnetisches Verhalten dünner Eisen-schichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 55/1978  
D. Klaffke  
**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999 % A1-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**
- Nr. 56/1979  
W. Brünner, C. Langlie  
**Stabilität von Sandwichbauteilen**
- Nr. 57/1979  
M. Stadthaus  
**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung**  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing**
- Nr. 58/1979  
W. Struck  
**Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau**
- Nr. 59/1979  
G. Plauk  
**Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der**
- Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl**
- Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
**Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken**
- Nr. 61/1979  
K. Richter  
**Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems**
- Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
**Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle**
- Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
**Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase**
- Nr. 64/1980  
W. Rücker  
**Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung**
- Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
**Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte**
- Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
**Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung**
- Nr. 67/1980  
W. Matthees  
**Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung**
- Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
**Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik. Entwicklung eines volleukzentrischen Präzisions-Goniometers**
- Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
**Untersuchungen zur Integrität den Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise**
- Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
**Schwellenwerte beim Betondruckversuch**
- Nr. 71/1980  
W. Matthees, G. Magiera  
**Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen**
- Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen**
- Nr. 73/1980  
P. Wegener  
**Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen**
- Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
**ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz**
- Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
**Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen**
- Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
**Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop**
- Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Mautzsch  
**Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen**
- Nr. 78/1981  
W. Rücker  
**Dynamische Wechselwirkung eines Schienenschwellensystems mit dem Untergrund**
- Nr. 79/1981  
V. Neumann  
**Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch**
- Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
**Ursachen der Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten**
- Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
**Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik**
- Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
**Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches**  
**Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test**
- Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
**Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen**  
**- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -**
- Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)**
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231 -X/1982  
H. Czichos  
**Technische Materialforschung und -prüfung - Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research" Materials Research and Testing - Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme "Basic Technological Research" -**
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimmelwitz  
**Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale**
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
**Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren**

- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
**Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall**
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
**Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid**
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
**Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz**
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
**Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden**
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
**Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen**
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
**Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen**
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
**Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten**
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
**Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken**
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
**Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung**
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
**Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren - Stretch- und Erholungsvermögen -**
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
**Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand**
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
**Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie**
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiers  
**Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton**
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
**Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien**
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
**Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen**
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
**Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen**
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last**
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
**Korrosion von Stahlradiatoren**
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
**Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen**
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
**Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N**
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
**Wasserstoff als Energieträger**
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
**Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte**
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützwow  
**Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen**
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
**Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen**
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit  
**Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen**
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985  
K. Richter  
**Farbempfindungsmerkmal Elementaruntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner  
**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985  
H. Czichos, G. Sievers  
**MaterialsTechnologies and Techno-Economic Development**  
A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985  
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler  
**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung - Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985  
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 1  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Slabs, Part 1
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986  
A. Hecht  
**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986  
P. Feinle, K.-H. Habig  
**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung**
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986  
J. Mischke  
**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**  
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986  
D. Rennoch  
**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986  
H.-M. Thomas  
**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)  
B. Droste, U. Probst  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986  
W. Stichel  
**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 1  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 1
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil 11  
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part 11
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load  
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit  
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates

- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986  
W. Struck  
**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material**
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986  
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load  
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil 11  
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part 11
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987  
Chr. Herold, F.-U. Vogdt  
**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)  
M. Woydt, K.-H. Habig  
**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987  
G. Andreas, G. Niessen  
**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987  
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich  
**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987  
H.-J. Deppe, K. Schmidt  
**Untersuchung zur Beurteilung von Brett-schichtverleimungen für den Holzbau**
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987  
M. Dogurike, F. Buchhardt  
**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben**
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987  
J. Olschewski, S.-P. Scholz  
**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987  
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak  
**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987  
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann  
**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987  
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes  
**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktor-gebäudes**
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987  
U. Holzlöhner  
**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**
- Nr. 146/ISBN 3-88314 714-1/1987  
W. Schon, M. Mallon  
**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987  
H.-D. Kleinschrodt  
**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988  
W. Müller  
**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988  
U. Holzlöhner  
**Bestimmung baugrunddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988  
M. Weber  
**VG3D Zeichenprogramm für vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988  
L. Auersch-Saworski  
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988  
G. Plauk, G. Kretschmarin, R.-G. Rohrmann  
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988  
H. Sander, W.-W. Maennig  
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988  
K. Breitkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke  
**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988  
L. Auersch  
**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989  
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt  
**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989  
E. Limberger, K. Brandes  
**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989  
R. Wäsche, K.-H. Habig  
**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht**
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989  
R. Müller, R. Rudolphi  
**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160, Teil 6**
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989  
W. Matthees  
**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989  
G. Mellmann, M. Maultzsch  
**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989  
W. Brünner  
**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989  
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck  
**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989  
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork  
**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Gobel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission - Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rucker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rucker  
**Integration der Untergrunddynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelfung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung**



- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991  
G. Schickert, M. Krause, H. Wiggenhauser  
**Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken**
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991  
G. Andrae, J. Knapp, G. Niessen  
**Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C**
- Nr. 179 / ISBN 3-89429-100-1/1991  
H. Eifler  
**Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente**
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991  
E. Klement, G. Wieser  
**Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten**
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991  
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow  
**Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs**
- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992  
M. Weber  
**Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken**
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992  
F. Buchhardt  
**Zur Dekonvolution im Zeitbereich**
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992  
M. Maultzsch, W. Stichel, E.- M. Vater  
**Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauwerke (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")**
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992  
Renate Müller  
**Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen**
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992  
B. Löffelbein, M. Woydt, K. -H. Habig  
**Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen**
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992  
Th. Schneider, E. Santner  
**Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten. Literaturübersicht**
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992  
K. Mailwitz  
**Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung**
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992  
W. Matthees, G. Magiera  
**Impedanzeigenschaften von Finiten Elementen Modellen bei Integration im Zeitraum**
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992  
G. Zachariev  
**Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch**
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992  
H.- M. Bock, S. Erbay, J. With  
**Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl**
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte; Lokales Ribwachstum, Ermittlung des Ribwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit**
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993  
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn  
**Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfea/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)**
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993  
U. Krause  
**Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen**
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993  
U. Schmidtchen, G. Würsig  
**Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln**
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993  
D. Lietze  
**Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme**
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993  
A. Skopp  
**Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C**
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994  
St. Meretz  
**Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen**
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994  
W. F. Rücker, S. Said  
**Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden**
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994  
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser  
**Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom**
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994  
U. Holzlöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune  
**Deponieabdichtungssysteme; Statusbericht**





**Bundesanstalt für  
Materialforschung und -prüfung (BAM)**

**Federal Institute for  
Material Research and Testing**

**Institut Fédéral pour la  
Recherche et l'Essai des Matériaux**

Unter den Eichen 87  
D-12205 Berlin  
☒ D-12200 Berlin

Telefon (030) 81 04-0  
Telefax (030) 8 11 20 29  
Telex 1 83 261 bamb d

- *Berichte*
- *Gutachten*
- *Zulassungen*
- *Zertifikate*
- *Tagungspapiere*
- *Prüfungszeugnisse*
- *Prüfstellenanerkennungen*

