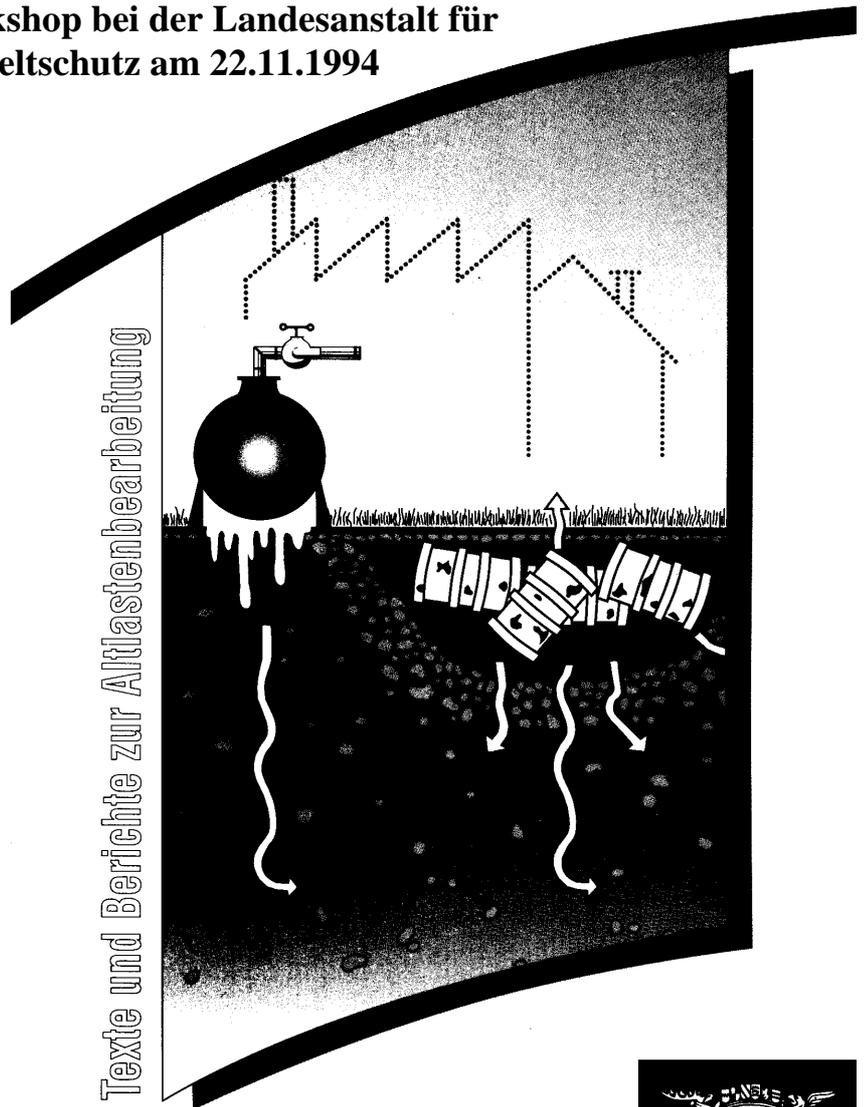


Zentraler Fachdienst Wasser - Boden - Abfall - Altlasten bei
der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

**Handbuch Altlasten
und Grundwasserschadensfälle**

Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

zur Sicherung von Altablagerungen –
Workshop bei der Landesanstalt für
Umweltschutz am 22.11.1994

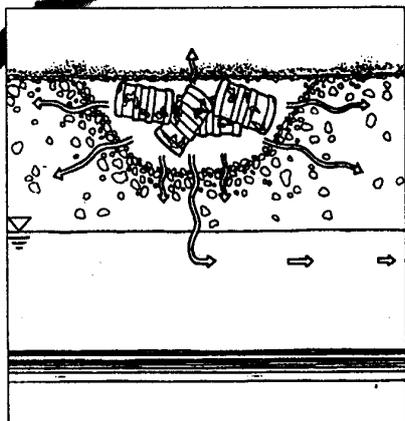


**BODEN
ABFALL
ATLASTEN**



Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

zur Sicherung von Altablagerungen –
Workshop bei der Landesanstalt für
Umweltschutz am 22.11.1994



Herausgegeben von der
Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
1. Auflage

Karlsruhe 1995



Altlastenfachinformation im WWW

Impressum

Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe

Redaktion: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Abteilung Boden, Abfall, Altlasten
Referat 54 – Altlastensanierung
Frieder Kern

Verfasser: Dr. K. Fischer
A. Schultheis
D. Steinbach
Universität Stuttgart
Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft
Abteilung Siedlungsabfall
70550 Stuttgart

Karlsruhe, Juli 1995

Bei diesem Ausdruck handelt es sich um eine Adobe Acrobat Druckvorlage. Abweichungen im Layout vom Original sind rein technisch bedingt. Der Ausdruck sowie Veröffentlichungen sind -auch auszugsweise- nur für eigene Zwecke und unter Quellenangabe des Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| TEIL I: EINLEITUNG..... | 1 |
| ABSTRACT | 1 |
| TEIL II: ZUSAMMENFASSUNGEN DER BEITRÄGE, ERGÄNZUNGEN DURCH DISKUSSION UND AUFGEZEIGTER FORSCHUNGSBEDARF..... | 4 |
| THEMENKREIS I - VORGÄNGE IM DEPONIEKÖRPER..... | 4 |
| <i>Überblick über das Verbundforschungsvorhaben „Deponiekörper“</i> | 4 |
| <i>Einfluß von Oberflächenabdichtungen auf das Emissionsverhalten von Abfallablagerungen</i> | 5 |
| <i>Abschätzung der Einflüsse von Deponieabdeckungen auf die Sickerwasseremissionen aufgrund experimenteller Untersuchungen des Deponiewasserhaushalts.</i> | 6 |
| <i>Setzungen von Deponieoberflächenabdichtungssystemen - Ermittlung von Kenndaten.....</i> | 8 |
| <i>Untersuchungen zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Landschaftskörpern mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen anhand von Lysimeterversuchen.</i> | 9 |
| THEMENKREIS II - TECHNOLOGIE DER OBERFLÄCHENABDICHTUNG | 10 |
| <i>Die mineralische Barriere.....</i> | 10 |
| <i>Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Altablagerungen.....</i> | 11 |
| <i>Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien und Altlasten.....</i> | 12 |
| THEMENKREIS III - ZIELE VON REKULTIVIERUNGSMASSNAHMEN, UMWELTVERTRÄGLICHKEIT VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN..... | 13 |
| <i>Umweltauswirkungen von Oberflächenabdichtungen</i> | 13 |
| <i>Studien zum Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten</i> | 14 |
| <i>Überblick über die neueren Arbeiten und Forschungen zur Wasserbilanzierung mit dem HELP- Modell</i> | 16 |
| TEIL III: VORTRÄGE DER TEILNEHMER | 17 |
| THEMENKREIS I - VORGÄNGE IM DEPONIEKÖRPER..... | 17 |
| <i>Überblick über das Verbundforschungsvorhaben „Deponiekörper“</i> | 17 |
| <i>Der Einfluß von Oberflächenabdichtungen auf das Emissionsverhalten von Abfallablagerungen.....</i> | 18 |
| <i>Abschätzung der Einflüsse von Deponieabdeckungen auf die Sickerwasseremissionen aufgrund experimenteller Untersuchungen des Deponiewasserhaushalts.</i> | 24 |
| <i>Setzungen von Deponieoberflächenabdichtungssystemen - Ermittlung von Kenndaten.....</i> | 31 |
| <i>Untersuchungen zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Landschaftskörpern mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen anhand von Lysimeterversuchen</i> | 38 |
| THEMENKREIS II - TECHNOLOGIE DER OBERFLÄCHENABDICHTUNG | 40 |
| <i>Die mineralische Barriere.....</i> | 40 |
| <i>Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Altablagerungen.....</i> | 44 |
| <i>Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien und Altlasten.....</i> | 48 |
| THEMENKREIS III - ZIELE VON REKULTIVIERUNGSMASSNAHMEN UMWELTVERTRÄGLICHKEIT VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN..... | 67 |
| <i>Umweltauswirkungen von Oberflächenabdichtungen</i> | 67 |
| <i>Studien zum Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten</i> | 80 |
| <i>Überblick über die neueren Arbeiten und Forschungen zur Wasserhaushaltsbilanzierung mit dem HELP- Modell</i> | 86 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 95 |
| TABELLENVERZEICHNIS | 96 |
| INDEXVERZEICHNIS..... | 97 |

Teil I: Einleitung

Abstract

In Baden-Württemberg zeigt der Stand der Altlastensanierung auf, daß von den ca. 18.000 auf Hochrechnungen basierenden Altablagerungen ca. 10.700 erfaßt wurden. Nach Abschluß sämtlicher Bewertungsverfahren kann sich der Sanierungsbedarf bei derzeitig 12 Altablagerungen noch auf 30-50 erhöhen.

Altablagerungen erfahren aus unterschiedlichen Aspekten eine Relevanz. Zu nennen sind hierbei insbesondere gesundheitliche, wasserwirtschaftliche, ökologische, aber auch in jüngerer Zeit immer häufiger versicherungstechnische Gründe. Sind diese Punkte nach den orientierenden und technischen Erkundungen sowie den Gefährdungsgradabschätzungen bei einer Altablagerung betroffen, bleibt in der Regel nur die Sanierung des betroffenen Standorts.

Als eine Form der Sanierung haben sich in den letzten Jahren Abdichtungssysteme, insbesondere die nachträglich relativ einfach aufzubringende Oberflächenabdichtung, herausgestellt. Da in diesem Zusammenhang noch viele Fragen offen sind, initiierte die LfU Baden-Württemberg einen Workshop, bei dem die Umweltauswirkungen von Oberflächenabdichtungen auf Altablagerungen behandelt wurden. Hierbei standen insbesondere die Auswirkungen der technischen Maßnahme „Oberflächenabdichtungssystem“ auf die Vorgänge im Deponiekörper, den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten sowie unterschiedliche Anforderungen an Abdichtungssysteme im Vordergrund.

Basierend auf den Erkenntnissen unterschiedlicher wissenschaftlicher Fachrichtungen, den Erfahrungen von Planungsbüros sowie den Forderungen von Behörden wird weitergehender Forschungsbedarf aufgezeigt.

Gemäß den o.g. Themenkreisen gliedert sich der Workshop in die nachfolgenden drei Hauptblöcke, wobei innerhalb der einzelnen Blöcke der jeweilige spezifische Forschungsbedarf formuliert wird:

- Vorgänge im Deponiekörper
- Technologie der Oberflächenabdichtung
- Ziele von Rekultivierungsmaßnahmen, Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

Der *erste Hauptblock* behandelt die Vorgänge im Deponiekörper sowie deren Veränderungen durch die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung. Hierbei steht insbesondere die Frage des Wasserhaushaltes nach der Abdichtung im Vordergrund.

Andere noch weitgehend offene Fragen beschäftigen sich mit dem Zeitpunkt, wann eine Oberflächenabdichtung aufzubringen ist, wobei die biologische/chemische Aktivität des Deponiekörpers der ausschlaggebende Faktor ist. Um eine Inertisierung des Deponiekörpers zu erreichen, muß die organische Substanz weitestgehend abgebaut sein. Dieser Abbau kann jedoch, da es sich um einen biologischen Prozeß handelt, nur unter der Anwesenheit von Wasser statt-

finden. Der Schwerpunkt des Forschungsbedarfs bewegt sich daher in folgende Richtung: wann ist der Abfallkörper stabil und wie ist stabil zu definieren, eine Fragestellung, die interdisziplinär insbesondere unter Einbeziehung von Geochemikern zu klären ist.

Weiterhin ist von Interesse, wieviel Wasser eine Abdeckung/Abdichtung durchsickern darf, damit zum einen ein größtmöglicher Abbau (Inertisierung) stattfindet, zum anderen aber so wenig Sickerwasser wie möglich anfällt.

Ein weiterer großer Themenbereich ist das Verhalten von Schadstoffen, die sowohl in organischer als auch anorganischer Form vorliegen. Hierbei sind insbesondere die Schadstoffmobilisierung, -immobilisierung, Schadstoffsinken unter den spezifischen Verhältnissen (Anaerobie, einbrechende Aerobie, Bindung an organische Substanz und Tonminerale, Wanderungsbahnen etc.) zu klären.

Setzungen bei Deponien stellen nach wie vor ein Problem dar. Hierbei spielt besonders die Vorhersage von Setzungen in der Anfangsphase, deren Dauer aufgrund der Inhomogenität der Abfälle bislang noch nicht zu definieren ist, eine wichtige Rolle. Weiterführende Untersuchungen sind zum Thema Scherfestigkeit und Standsicherheit weitestgehend abgebauter Ablagerungen, wo aufgrund der fehlenden organischen Substanz die Reibung nachläßt sowie dem E-Modul von Abfall vorzunehmen.

Die Frage nach den Auswirkungen eines Schadensfalles in der Abdichtung ist weiterhin relevant. Hierbei spielt vor allem der Zeitpunkt, an dem die Abdeckung aufgebracht wird/wurde die entscheidende Rolle, da die jeweiligen Organik- und Schadstoffpotentiale durch die eintretende Austrocknung des Deponiekörpers quasi konserviert wurden.

Der *zweite Hauptblock* beschäftigt sich mit Fragen nach der Technologie von Oberflächenabdichtungen. Hierbei steht der finanziell und technisch tragbare Aufwand bei der Ausführung einer Abdichtung im Vordergrund. Mineralische Dichtungsmaterialien und Dichtungsbahnen werden ebenso wie Ansätze zu kontrollierbaren Abdichtungen behandelt.

Im *Block Rekultivierung und Umweltauswirkungen* wird die Problematik der Einbeziehung von Ablagerungen in den Landschaftshaushalt sowohl mit als auch ohne Oberflächenabdichtung diskutiert.

Weiterhin wird die Verminderung des Eintritts von Niederschlagswasser in den Deponiekörper durch eine Rekultivierungsschicht sowie einer Vegetationsdecke behandelt. Hierbei sollte untersucht werden, inwieweit eine optimale Rekultivierungsschicht, die nicht nur als Deckschicht, sondern als Boden und Pflanzenstandort mit entsprechendem Gefüge, Nährstoffhaushalt, Bodenleben etc. anzusprechen ist, in Verbund mit einer angepaßten, transpirationsstarken Vegetationsdecke zum Wasserrückhalt beiträgt. Hierbei gilt es boden- und biotechnische Verfahrensvarianten zu untersuchen.

Für Wasserhaushaltsberechnungen sollten verstärkt Simulationsmodelle eingesetzt werden, die insbesondere für den Abfallkörper an sich, für Schadstofffrachten während der verschiedenen Phasen der Deponie sowie für die Verdunstungs- und Versickerungsraten der Rekultivierungsschichten zu modifizieren sind. Hierbei gilt es vor allem die Schwächen der derzeit auf dem Markt vorhandenen Modelle aufzuzeigen und zu beseitigen sowie neue Ansätze zu schaffen. Vor einem weitergehenden Einsatz dieser Modelle muß allerdings die Verifizierung

mittels Lysimeter oder gemessenen Abflußdaten erfolgen. Hierbei sind insbesondere die klimatischen Unterschiede innerhalb der Bundesrepublik zu berücksichtigen, damit standörtlich angepaßte Berechnungen vorliegen.

Als Fazit des Workshops bleibt festzuhalten, daß trotz derzeitiger Forschungsvorhaben, die z.T. 1995 auslaufen, noch großer Bedarf für weitergehende Grundlagenforschung sowie für anwendungsorientierte Forschung vorhanden ist. Dies kann dazu beitragen, die Entscheidung für oder wider unterschiedlicher Oberflächenabdichtungssysteme wissenschaftlich zu begründen.

Teil II: Zusammenfassungen der Beiträge, Ergänzungen durch Diskussion und aufgezeigter Forschungsbedarf

Themenkreis I - Vorgänge im Deponiekörper

Überblick über das Verbundforschungsvorhaben „Deponiekörper“

Dipl.-Ing. T. Scheelhaase, Technische Universität Wuppertal

Das Verbundvorhaben Deponiekörper erlangt seit 1993 Förderung durch das BMFT. Das Thema lautet: Welche Reaktionen laufen tatsächlich im Deponiekörper ab? Die Black-Box Deponiekörper soll geöffnet werden.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in 4 Arbeitsgruppen mit folgenden Themenschwerpunkten:

TU Aachen: Zusammensetzung und Standsicherheit des Mülls. Es werden Erkundungen auf Deponien durchgeführt, z.B. Aufgrabungen des Materials.

TU Hamburg-Harburg: Abschätzung des langfristigen Gefährdungspotentials von Abfällen durch Einbau des Materials in Simulatoren.

TU Dresden: Langzeitverhalten und Gefährdungsabschätzung von Müll aus den neuen Bundesländern, da sich die Zusammensetzung aufgrund höheren Industrie- und Schlackenanteils unterscheidet.

TU Wuppertal: Untersuchungen bezüglich künftiger Abfallzusammensetzung, d.h. biologisch oder biologisch-mechanisch vorbehandelter Siedlungsabfälle.

Zu diesen Themenkreisen findet im April 1995 ein Statusseminar statt.

Forschungsbedarf:

Im Rahmen dieses stark gekürzten Verbundforschungsvorhabens wird nur ein Bruchteil der aktuellen Fragen gefördert. Insbesondere Fragestellungen zu Altablagerungen werden nur wenig tangiert. Der Workshop soll dazu beitragen sowohl bestehenden als auch weiterführenden Forschungsbedarf zu formulieren.

Einfluß von Oberflächenabdichtungen auf das Emissionsverhalten von Abfallablagerungen

Dipl.-Ing. K.-U. Heyer, Technische Universität Hamburg-Harburg

Altanlagen verfügen aufgrund ihrer Abfallherkunft aus kommunalen Bereichen (Siedlungsabfälle) und industriellen Rückständen in der Regel über ein nicht eindeutig definierbares Schadstoffinventar. Die hieraus resultierenden Emissionen über den Sickerwasser- und Gaspfad können mittels einer Oberflächenabdichtung begrenzt werden.

Wichtige Fragestellungen zu Oberflächenabdichtungen sind dabei:

- Auswirkungen auf das Emissionsverhalten: Hierbei sind insbesondere die Fragen nach der Austrocknung des Abfallkörpers, der zeitliche Verlauf der Wassergehaltsänderung sowie die Dauer der biologischen Abbauprozesse, der chemischen Reaktionen und Auslaugungen von Interesse.
- Grundsätzlich stellt sich die Frage, wann die Abbauprozesse abgeschlossen sind. Bei Oberflächenabdichtungen können Beschädigungen auftreten und die Abbauprozesse erneut in Gang setzen. Somit wäre eine kontrollierte Wasserrückführung, d.h. Verrieselung von Wasser unter einer Oberflächenabdichtung, quasi als „gesteuerter Bioreaktor“, eventuell sinnvoller. Es ergibt sich jedoch das Problem einer gleichmäßigen Befeuchtung aufgrund der durch Inhomogenitäten und Sperrschichten bedingten sehr unregelmäßigen Feuchteverteilung.
- Ist für den Gashaushalt eine aktive Entgasung notwendig oder kann auch eine passive Entgasung ausreichen?
- Der Zeitpunkt der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung muß unter den Parametern Abfallzusammensetzung (RM, HM, Industriemüll, Klärschlamm etc.), dem Grad der Umsetzung sowie den Randbedingungen, wie Basisabdichtung, Grundwasserspiegel, Sickerwassereinstau, Setzungen u.a., betrachtet werden.
- Es stellt sich grundsätzlich die Frage, ob eine Oberflächenabdichtung zu einer verzögerten Schadstofffreisetzung führt. Es wird der Gasabbau und die Gasumsetzung in verschiedenen Abdeckungen wie z.B. Mergel, Kompost usw. untersucht, um herauszufinden, welche Biozönose einen vollständigen Methanabbau bewirkt.
- Zum Aspekt des Langzeitverhaltens sind geeignete Monitoringmaßnahmen zur Nachsorge sowie Fragen nach der Schadstofffreisetzung (unterbunden oder verzögert) einzusetzen.

Es werden Versuche mit abfallverfüllten Stahlbehältern durchgeführt, um die Versickerung und ähnliches zu bestimmen.

Durchgeführt wurden bereits Untersuchungen bezüglich des Abbaus von Deponiegaskomponenten in Abdichtungs- u. Abdeckschichten sowie Oberflächenabdichtungen u. Deponiegasbehandlung durch Kombination kapillarbrechender Sperrschicht und Kompostfilterschicht. Weitere Themenbereiche sind das Abbauverhalten von ausgewählten org. Schadstoffen unter Deponiemilieubedingungen, u.a. finden Untersuchungen zum Abbau von Spurengasen (FCKW) im Deponiegas statt. Desweiteren laufen Untersuchungen zum Einfluß von Oberflächenabdichtungen im Rahmen des Verbundvorhabens „Deponiekörper“.

Forschungsbedarf:

- Bewertung und Erfassung des Schadstoffinventars und Emissionspotentials. Proben sollten per Grabung/Bohrung entnommen und im Labor Untersuchungen über das Schadstoffinventar und den biologischen Abbaugrad durchgeführt werden. Damit könnten die bisherigen Ergebnisse des Verbundprojektes „Deponiekörper“ verifiziert und erweitert werden.
- Der Aspekt der Austrocknungsprozesse infolge Oberflächenabdichtungen sowie Methan- und Spurenstoffabbau in der Dichtungsschicht sind in Laborversuchen aufbauend auf bisherigen Kenntnissen weiter zu untersuchen.
- Desweiteren ist die Schadstofffreisetzung bei unterschiedlichen Abdichtungssystemen zu untersuchen. Die Ergebnisse sollten mittels Monitoring (Meßprogramme) an Depo-niestefeldern verifiziert werden. Das heißt, die langfristige Kontrollierbarkeit von Oberflächenabdichtungen sollte sichergestellt werden.
- Ein weiterer Schwerpunkt bezüglich des Forschungsbedarfs liegt in Untersuchungen zur passiven Entgasung an Versuchsfeldern. Dabei soll die Übertragbarkeit der bislang vorliegenden Laborergebnisse untersucht werden.

Abschätzung der Einflüsse von Deponieabdeckungen auf die Sickerwasseremissionen aufgrund experimenteller Untersuchungen des Deponiewasserhaushalts.

Dr.-Ing. P. Spillmann, Universität Rostock

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse des Forschungsprogramms der DFG sowie ergänzende Untersuchungen vorgestellt. Die Ergebnisse basieren auf 15-jährigen Untersuchungen an 15 zylindrischen Deponieausschnitten. Die Themenschwerpunkte und einige Untersuchungsergebnisse sind im folgenden kurz zusammengefaßt.

- Niederschlagseintrag
Untersuchungen bezüglich des Niederschlagseintrags lassen darauf schließen, daß die gegenwärtig an Betriebsdeponien gemessenen Abflußraten erheblich geringer sind als der Niederschlagseintrag in eine offene Betriebsfläche. Dasselbe gilt für einfache begrünte Abdeckungen. Das bedeutet, daß die Differenz aus dem Wasserrückhalt im Deponiekörper zurückzuführen ist.
- Kapazität des Wasserrückhaltes
Die kapillare Speicherkapazität der organischen Substanz als Teil des Wasserrückhalts ist nach weitgehendem Abbau der leicht abbaubaren organischen Substanz etwa gleich der Trockenmasse der organischen Substanz einschließlich der Kartonagen des Verpackungsverbundes.
- Wasserneubildung
Die Untersuchungen zeigten, daß in Deponien ohne intensive aktive Entgasung in den oberen Schichten Methan mikrobiell oxidiert bzw. bei eindringendem Luftsauerstoff ein direkter aerober Abbau stattfindet.
- Schadstoffmobilisierung durch Abbau der Speicherkapazität
Mit dem Abbau der Speicherkapazität durch Abbau der organischen Substanz werden auch gespeicherte Stoffe (Schwermetalle, Cyanide) wieder freigesetzt. Mit dem Abbau

der Abfälle sowie dem Umbau zu hinreichend stabilen Huminstoffen nimmt die Mobilisierung trotz hohen Schadstoffpotentials ab. Bei schwer wasserlöslichen organischen Verbindungen (Lindan, Simazin) werden durch einen verstärkten Sickerwasserstrom keine Belastungsspitzen erzeugt, vielmehr werden proportional höhere Frachten vom belasteten zum nächsten unbelasteten Abfall transportiert.

- **Zeitlicher Verlauf der Mobilisierungs- und Konsolidierungsvorgänge**
Beispiel der Deponie Wien: Mit Druckstoßbelüftung werden Wasser und Ergänzungsnährstoffe in den Deponiekörper mit einem Druck von 8 bar in dichten Abständen eingedüst. Damit soll die Humifizierung des Abfalls gefördert werden, um auf lange Zeiträume hin stabile nicht wasserlösliche Huminstoffe zu erhalten. Diese Huminstoffe stehen als Komplexbildner für Schwermetalle zur Verfügung. Eine weitere Stabilisierung erfahren solche Komplexe durch Ton oder Kohle.
- **Kurz-, mittel- und langfristige Wirkungen**
Der Abfluß eines gegenwärtig wenig belasteten Sickerwassers bietet keine Gewähr dafür, daß auch künftig keine hohen Belastungsschübe auftreten. Durch eine sperrend wirkende Abdeckung können Belastungsschübe, die sich aus der Summe des Niederschlagseintrags und freigesetztem Speicherinhalt sowie der langsamen Verlagerung schwer löslicher Schadstoffe zusammensetzen verringert oder gar verhindert werden. Eine auf maximale Verdunstung ausgelegte Abdeckschicht verhindert erst langfristig eine Infiltration in den Deponiekörper. Kurzfristig wirken dagegen nur sperrende Deckschichten, die jedoch dann nicht ausreichen, wenn bereits Schadstoffe mobilisiert wurden.

Sperrende Deckschichten führen langfristig allerdings auch zur Austrocknung des Abfallkörpers wodurch der biochemische Abbau unterbrochen wird und eine Konservierung der Abfälle erfolgt. Bei Undichtigkeiten der Sperrschicht ist diese Unterbrechung jedoch reversibel. Eine zeitliche Verlagerung von Belastungen durch die Konservierung ist durch Maßnahmen zur biochemischen Stabilisierung der Abfälle in Ergänzung zu einer sperrenden Abdeckung vermeidbar. Das heißt, vor der Abdeckung von Deponien und Altablagerungen ist eine weitgehende Stabilisierung der Abfälle wichtig. Allerdings stellt sich die Frage bis auf welchen Organikgehalt eine Deponie biologisch stabilisiert werden muß.

Forschungsbedarf:

Bezüglich zuverlässig sperrender Oberflächenabdeckungen besteht technischer Entwicklungsbedarf für die:

- Herstellung schub- und zugtoleranter Sperren
- Ermittlung der Dauerstandszeiten für schubbelastete PEHD-Bahnen

Zur Beurteilung alter Deponien einschließlich zutreffender Prognosen zur künftigen Sickerwasseremission sind folgende Forschungen erforderlich.

- Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung des Emissionspotentials einer Altablagerung (Problem: Industrielle Belastungen liegen oft als "Linsen" vor).
- Untersuchung der Möglichkeiten zur Einstufung der geochemischen Stabilität einer Ablagerung nach den Kriterien der Bodenkunde und Biochemie (Problem: Die Inhomogenität der Ablagerung ist so groß, daß repräsentive Proben zur Anwendung der z.Zt. anerkannten Laborverfahren nicht gewonnen werden können).

- Ermittlung der biochemischen Stabilisierungsvorgänge und Emissionen nach Einbau einer sperrenden Deckschicht in Abhängigkeit vom zuvor erreichten Stabilisierungsgrad und der Speichersättigung.
- Untersuchungen zur Beurteilung der langfristigen Bindungsstabilität von umweltbelastenden Industrieprodukten an Minerale und Huminstoffe.

Setzungen von Deponieoberflächenabdichtungssystemen - Ermittlung von Kenndaten

Dipl.-Ing. K. Münnich, Technische Universität Braunschweig

Nach TASI müssen verfüllte Deponieabschnitte mit einem Oberflächenabdichtungssystem abgedichtet werden. Da das Mindestgefälle nach Abklingen der Setzungen mindestens 5 % betragen soll, muß das Abdichtsystem mit einer gewissen Überhöhung aufgebracht werden. Im allgemeinen wird von einem Setzungsbetrag von 20-30 % der Ausgangshöhe als Setzungsbetrag ausgegangen (örtlich höhere Setzungen). Aufgrund dieser relativ hohen Beträge wird teilweise empfohlen, eine Oberflächenabdichtung nicht sofort aufzubringen, sondern ein zweistufiges Vorgehen mit einem flexiblen System bis zum Abklingen der Setzungen und einem anschließenden endgültigen System zu wählen.

Das Setzungsverhalten von Siedlungsabfällen zeigt große Unterschiede zu demjenigen von Böden. Dies liegt insbesondere daran, daß einzelne Komponenten zusammengedrückt oder tragende Strukturen durch den biologischen Abbau zerstört werden. Weiterhin erfolgt die zeitliche Veränderung der mechanischen Festigkeit von Abfallbestandteilen durch Alterung. Die Inhomogenität der Abfälle kann unterschiedliche Verformungen bewirken (Entstehen von inneren Spreizspannungen). Problematisch sind weiterhin ein möglicher temporärer und lokaler Einstau von Wasser durch Gasentwicklung sowie der Dauereinstau von Wasser durch Versagen der Dränung. Alle genannten Prozesse sind in der Praxis nicht voneinander trennbar.

Die vier Hauptgründe für Setzungen sind mechanische Konsolidation, biochemische Veränderung und Abbau, Versagen von Hohlräumen sowie Verlagerung von Feinmaterial in größere Hohlräume. Als weiterer Grund sollte die plötzliche Entspannung von eingestautem Wasser oder Gas angesehen werden. Über den Zeitraum der Setzungen (v.a. Primärsetzungen) sind derzeit noch keine Angaben möglich.

Neben den o.g. Verdichtungssetzungen spielen Formänderungssetzungen, bei denen sich das Volumen des Abfalls nicht ändert, eine wichtige Rolle. Beispiele sind Bewegungen (Gleiten) in Böschungsbereichen, bei denen die Scherfestigkeit überwunden wird. Das Trag- und Verformungsverhalten von Abfällen unterscheidet sich deutlich von der Bodenmechanik. Durch den hohen Faseranteil des Abfalls können hohe Zugkräfte aufgenommen werden. Biochemische Prozesse können zu einer Herabsetzung der Zugkräfte führen, was verstärkt zu Setzungen führen kann. Bei der Mineralisierung der Abfälle besteht dagegen kaum noch eine Aufnahmefähigkeit für Zugkräfte. Dies kann ein Kippen der Deponie zur Folge haben.

Messungen von Setzungen können relativ einfach über die Vermessungskunde durchgeführt werden. Vertikale Setzungen sind somit über Inklinationsmessungen, horizontale Messungen eventuell über die Gasdrainage durchführbar. Durch die genannten Verfahren können aller-

dings nur Aussagen über die Gesamtsetzungen getätigt werden, Aussagen über einzelne Abfallsschichten sind eventuell über spezielle Setzungsrohre zu ermitteln.

Die nachträgliche Vermessung von Deponien ist allerdings für die Planung von Deponien wenig hilfreich, weshalb die Ermittlung von Kenndaten in der Abhängigkeit der Abfallart, Höhe der Deponie und Einbauart der Abfälle anzustreben ist. Zu erwartende Setzungen können dann hieraus abgeleitet werden. Kompressionsversuche nach dem Meßprinzip der Bodenmechanik werden dazu in einem Großödometer, wobei das beim Zusammendrücken entstehende Sickerwasser volumetrisch erfaßt werden kann, durchgeführt. Die Festigkeitseigenschaften werden über Zugversuche ermittelt, wobei die kennzeichnenden Größen das zukünftige mechanische Verhalten von Abfällen bereits bei der Anlieferung abschätzbar machen, woraus das zu erwartende Setzungsverhalten an der Oberfläche zu ermitteln ist.

Die oben angeführten Versuche haben bezüglich der primären Setzung ergeben, daß diese bei hoher Auflast im Versuchsmaßstab nach ca. einem Monat abgeschlossen sind. Aussagen zur Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf Deponien können nicht gemacht werden.

Forschungsbedarf:

Als offene Fragen stehen, zur Abschätzung des Einflusses des Ausgangsmaterials, die Ermittlung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens sowie das E-Modul des Abfalls an. Von Interesse ist außerdem die zeitliche Veränderung der Materialeigenschaften sowie der Einfluß von Wassergehalt und Einbaudichte sowie die Auswirkungen der Austrocknung des Deponiekörpers auf die wirkenden Kräfte.

Untersuchungen zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Landschaftskörpern mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen anhand von Lysimeterversuchen.

Dipl.-Ing.agr. A. Maile, Universität Gesamthochschule Essen

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Wasserhaushalt von urbanen "Deponien", d.h. ehemaligen Industrie- und Zechengelände, die z.T. erheblich mit Schadstoffen belastet sind. Die Ablagerung soll in Form von Erddeponien auf dem belasteten Gelände selbst erfolgen (sog. Landschaftskörper). Dabei steht die Frage nach geeigneten Abdichtungssystemen im Vordergrund, die bei Minimierung des Wassereintrags sowohl der Ressourcenschonung als auch dem Kostenaspekt Rechnung tragen. Es werden zur Zeit Versuche in Großlysimetern mit unterschiedlichen Varianten von Oberflächenabdichtungen durchgeführt.

Themenkreis II - Technologie der Oberflächenabdichtung

Die mineralische Barriere

Prof.Dr.Dr. K. Czurda, Universität Karlsruhe

Der mineralische Anteil einer Oberflächenabdichtung hat die Aufgabe zum einen den Austritt von Niederschlagswasser nach unten und zum anderen den Deponiegasaustritt nach oben zu verhindern.

Die Funktionstüchtigkeit einer mineralischen Barriere wird durch Setzungen, Frost-Tau- sowie Austrocknungsprozessen beeinträchtigt. Eine große Rolle für die Permeabilität und die Reaktion auf äußere Einflüsse spielen die Art der Tonminerale (Zwei- oder Dreischichttonminerale) und das Mikrogefüge des Mineralgemisches.

Wasser beeinflusst die Eigenschaften eines Mineralgemisches nachhaltig. Der Wassergehalt der mineralischen Oberflächenbarrieren wirkt sich - besonders bei bindigen Böden auf die inneren Widerstände, auf die Tragfähigkeit, auf die Zusammendrückbarkeit, auf die Permeabilität etc. sehr weitgehend aus

Tonbarrieren erweisen sich immer dann als besonders frostgefährdet, wenn Wasser entweder kapillar zur Frostfront aufsteigen kann oder durch Niederschlag während Tauphasen in den Ton eindringt. In Tonen wird das Wasser beim Gefrieren in Form von Eislinsen an der Gefrierfront gebunden.

Vor allem Tone mit Gehalten an expandierenden Phasen reagieren durch Rückquellung beim Tauvorgang abdichtend, d.h. erhöhte Durchlässigkeit in der ausgetrockneten Zone oder im ehemals gefrorenen Bereich durch Aggregatbildung werden wieder rückgängig gemacht.

Aus Gründen der Frostsicherheit in mineralischen Oberflächenbarrieren sollte auf nichtquelnde Komponenten, wie z.B. Kaolinit verzichtet werden, falls nicht ausreichender Frostschutz durch eine Abdeckung gewährleistet ist.

Die Verwendung von Bentoniten oder anderen Tonen mit hohem Anteil an expandierenden Phasen, ist wegen der Austrocknungsproblematik und der stark veränderlichen Zustandsform nicht zu empfehlen. Bezüglich der Frostsicherheit erweisen sich Bentonite jedoch wegen des Selbstheilungseffektes beim Tauen besser geeignet als andere Schichtsilikate. Mineralgemische mit geringen Tonmineralanteilen, evtl. Flugaschen, die die geforderte geringe Durchlässigkeit von $\leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bei Sonderabfällen bzw. $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei Siedlungsabfällen durch Verdichtung erreichen, sind als Alternativen anzusehen.

In der an den Beitrag anschließenden Diskussion wurde nochmals betont, daß sich die verschiedenen Tone in ihren Eigenschaften und ihrer Eignung stark voneinander unterscheiden. So eignen sich beispielsweise Mergel, die z.T. höhere Sand- und Kalkgehalte (Gefährdung durch Entkalkung) aufweisen, nicht als mineralische Abdichtung.

Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Altablagerungen

Dipl.- Ing. S. Urban-Kiss, Ingenieurgemeinschaft RUK, Stuttgart

Unter Oberflächenabdichtungen versteht man ein definiertes und beständiges Dichtungselement, das im wesentlichen den Niederschlagseintrag verhindern, Geruchsemissionen und Emissionen durch Deponiegas minimieren sowie Pflanzenwachstum ermöglichen soll. Andere Aufgaben können sowohl von Oberflächenabdichtungen als auch von -abdeckungen, die jedoch keine definierte Dichtfunktion besitzen, übernommen werden. So z.B. die Vermeidung von Staub- und Abfallverwehungen sowie der Brandgefahr und die Verhinderung der Zugänglichkeit für Tiere.

Für die Wahl des Abdichtungs- oder Abdeckungssystems besteht die Erfordernis nicht in der Verwendung eines festgelegten Abdichtungssystems (z.B. nach TASI), sondern richtet sich nach Kriterien, die die spezifischen Bedingungen auf der jeweiligen Deponie berücksichtigen

Bezüglich der zu erfüllenden Funktionen einer Abdichtung wie Wasser- und Gasbarriere, Beständigkeit und Kontrollierbarkeit, kann auf verschiedenen Untersuchungen z.T. im Rahmen von F+E-Vorhaben zurückgegriffen werden.

Forschungsbedarf:

- Modifizierung von Rechenmodellen (HELP, Creams) v.a. unter den Aspekten Klima und Relief
- Ermittlung von Kennwerten verschiedener Abdichtungssysteme bezüglich Beständigkeit und Langzeitwirkung
- Bezüglich der Belastungsansätze sind Untersuchungen zur Dauer der Setzungsaktivitäten (Unterteilung in Haupt- und Restsetzungen, Setzungsmaße) von Interesse
- Erhebung von Basisdaten zur Entwicklung des Wassergehalts im Deponiekörper in Abhängigkeit von Abfallarten, Verfüllungsgeschwindigkeit, Verdichtung und Betriebsabdeckung.
- Untersuchungen zur Dauer und Intensität der mikrobiellen Abbauprozesse sowie der Deponiegasproduktion
- Untersuchungen von Systemen zur Kontrollierbarkeit von Oberflächenabdichtungen
- Funktionsveränderung von einer Oberflächenabdichtung zur Zwischenabdichtung

Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien und Altlasten

Dipl.-Ing. G. Burkhard u. Dipl.-Geol. Th. Egloffstein; c/o ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda & Partner mbH

Kontrollierbare und reparierbare Abdichtungen für Deponien werden in Zukunft häufiger eingesetzt werden als bisher. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben nach TA Abfall /6/ müssen Sonderabfalldeponien mit kontrollierbaren Oberflächenabdichtungssystemen ausgerüstet werden. Das neue Umwelthaftungsgesetz und die sich daraus ergebenden Konsequenzen (Umwelt-Haftpflichtversicherung, Versicherbarkeit) sowie eine höhere Akzeptanz und damit erhöhte Genehmigungsfähigkeit von Deponien mit kontrollierbarer Abdichtung werden dazu führen, daß auch Siedlungsabfalldeponien mit kontrollierbaren Abdichtungssystemen ausgestattet werden. Sinnvoll sind solche Systeme jedoch nur, wenn sie eine Leckage vor Eintritt eines Umweltschadens melden und genug Zeit zur Reparatur des Schadens verbleibt.

Bei der Auswahl eines kontrollierbaren Abdichtungssystems ist vorab festzulegen, welche Anforderungen im speziellen Einzelfall gestellt werden (z.B. Genauigkeit der Lokalisierung etc.). Die in Frage kommenden auf dem Markt befindlichen Systeme sind hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zu untersuchen (z.B. bei Oberflächenabdichtungssystemen: Standsicherheit). Nachdem diese Vorauswahl getroffen wurde, muß für die tauglichen Systeme eine Kostenbetrachtung angestellt werden. Als Alternative hierzu ist ein freier Wettbewerb unterschiedlicher Systeme anzusehen (Ausschreibung eines Ideenwettbewerbs). Allerdings ist hier sehr sorgfältig zu bewerten, ob die zugesagten Eigenschaften der angebotenen Systeme auch in der Praxis einzuhalten sind.

An das Kontrollsystem ist die Anforderung zu stellen, daß es langlebiger als die Abdichtung ist. Die Funktionskontrolle hat (quasi)- kontinuierlich zu erfolgen. Bezüglich des Langzeitverhaltens der Kontrollsysteme können aufgrund mangelnder Erfahrung keine konkreten Aussagen gemacht werden.

In den USA werden TDR-Sonden zur Messung der Feuchteänderung verwendet. Allerdings sollte neben Wasser auch Gas detektiert werden, so daß dieses System nicht ohne weiteres zu übernehmen ist.

Forschungsbedarf:

Entwicklung von Kontrollsystemen, die einfach und kostengünstig (max 10% der Kosten der Abdichtung) sind.

Themenkreis III - Ziele von Rekultivierungsmaßnahmen, Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

Umweltauswirkungen von Oberflächenabdichtungen

Dipl.-Geogr. D. Steinbach u. Dipl.-Geogr. A. Schultheis, Universität Stuttgart

Im vorliegenden Beitrag wurden die Beziehungen zwischen einer Altablagerung und ihrer Umgebung sowie die Wirkung einer nachträglich aufgetragenen Oberflächenabdichtung betrachtet.

Nach der Darstellung des bestehenden Landschaftshaushaltes erfolgte mittels einer ökologischen Bodenbewertung sowie einer Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem Programmsystem "HELP" eine Bewertung der vorhandenen Deckschicht hinsichtlich ihrer Barrierewirkung gegen eindringendes Niederschlagswasser.

In einem Szenario wurden die möglichen Auswirkungen einer mineralischen Oberflächenabdichtung gemäß Deponieklasse I dargestellt. Für die "Hintere Halde" konnte mittels der "HELP"-Simulation eine bestehende Barrierewirkung der Deckschicht bestätigt werden. Für die "Federlesmahd" liegen die Perkulationswerte höher, was zum Teil durch Mängel im Programm bedingt ist und damit von einer niedrigeren Perkulation als der durch das Programm errechneten auszugehen ist. Die Entwicklung eines Szenarios für die Auswirkungen einer Oberflächenabdichtung zeigt die negativen Auswirkungen auf das bestehende Ökosystem, das infolge der beschränkenden Vorgaben für die Rekultivierung auch nicht ersetzt werden kann.

Der landschaftsökologische Aspekt kann kein alleiniges Entscheidungskriterium darstellen, da auch durch den Austrag umweltrelevanter Stoffe aus dem Deponiekörper direkt, aber meist weniger offensichtlich, in Ökosysteme eingegriffen wird. Bislang steht bei der Altlastenproblematik in der Regel der Schutz der menschlichen Gesundheit im Vordergrund. Hierbei spielen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen gegen direkte Schädigungen die größte Rolle. Die Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt oder den allgemeinen Eintrag der Schadstoffe in die Biosphäre können nur unzureichend bewertet werden, da eine Quantifizierung des Stoffaustrags kaum realisierbar ist.

Für die Entscheidung über die Notwendigkeit einer Oberflächenabdichtung an einer Altablagerung muß auch das bestehende emissionsmindernde Potential der Abdeckung in Form von Speicherkapazitäten und Evapotranspirationsvermögen Berücksichtigung finden. Bestätigen labortechnische Untersuchungen der Bodenarten der Deckschicht eine geringe Wasserleitfähigkeit und werden durch entsprechende Anpflanzungen Transpiration und Evaporation erhöht, so kann diese "natürliche" Barriere zumindest teilweise die Funktion einer Oberflächenabdichtung übernehmen. Dadurch kann zwar keineswegs der gleiche Wirkungsgrad einer geregelten Oberflächenabdichtung erreicht werden, aber es bleibt abzuwägen, ob bezüglich des jeweiligen Gefährdungspotentials für einen Standort diese Lösung nicht die am ehesten mit der Umwelt verträgliche Maßnahme darstellt.

Forschungsbedarf:

- In welchem Zeitraum nach Aufbringung einer Deckschicht wird eine Stabilisierung der Abfälle erreicht und wie ist der stabile Zustand zu definieren.
- Welche Wassergehalte des Ausgangsmaterials und welche Menge an Infiltrationswasser sind ausreichend für optimale biologische Abbauprozesse während der ersten Jahre und wie kann eine optimale und gleichmäßige Verteilung des Wassers erreicht werden. Wann ist der richtige Zeitpunkt, um eventuell das Abdeckungs/Abdichtungssystem mit dem Wechsel der Phasen/Zustände zu ändern (Korrelation mit „Rettenberger Phasen“).
- Wie muß eine Abdichtung/Abdeckung konzipiert sein, daß während des Zeitraums der biologischen Aktivität genügend Wasser zur Verfügung steht, in der Phase nach Abklingen der Abbauprozesse aber nur soviel Wasser in den Untergrund gerät, daß so wenig Schadstoffe wie möglich ausgelaugt werden. Wie erreicht man eine nur geringe Ableitung von Überschußwasser in den Untergrund. Wie ist der Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem keine Gewässerunreinigung mehr besteht (Parameter).
- Versuche zur Optimierung derzeit vorhandener Abdeckungen durch Verdichtung der Vegetation und der Initiierung von Bodenbildungsprozessen (Einbringung organischer Substanz, Gefügebildung etc.) in der Deckschicht. Hierbei sind auch Untersuchungen über Pufferwirkungen gegenüber Umwelteinflüssen (Erosion, Frost-/Trockenrisse, saurer Regen) durchzuführen. Bei diesen Aspekten können bereits vorliegende Daten von Altdeponien aus dem Modellstandortprogramm Baden-Württemberg (LfU) miteinbezogen werden.
- Durchführung einer Gefährdungsabschätzung von Abtablagerungen mit dem HELP-Modell (Abflußmengen, Grundwasserneubildung) nach Verifizierung des Programms anhand von Lysimeterdaten, Abflußmessungen aus Drainageschichten und unter Einbeziehung von verschiedenen regionalen Klimaten. Wie sieht dabei die Art der Mindestsicherung aus, so daß weder Fracht noch Konzentration überschritten werden.
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit zur Entwicklung eines Wasserhaushaltsmodells auf der Basis „Finiter Elemente“, um Wechsel in der Wasserbewegung und physikalische Eigenschaften der Deckschichten besser simulieren zu können.

Studien zum Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten

Priv.Doiz.Dr. G. Wessolek u. P. Döll; Technische Universität Berlin

Für die Höhe von Versickerungsraten spielen die Faktoren Klima, Boden und Relief eine entscheidende Rolle. So weisen z.B. aus rein klimatischen Gründen die Räume Berlin (niedrige) und München (hohe) unterschiedliche Versickerungsraten auf. Neben diesen regionalen großklimatischen Verhältnissen spielen auch lokale Klimaverhältnisse wie die Exposition eine größere Rolle. So erfahren z.B. südexponierte Hänge auf Löß ca. 30 %, Sandböden ca. 5 % weniger Versickerung, während Nordhänge umgekehrte Versickerungsraten aufweisen.

Als weiterer wichtiger Einflußfaktor ist die Temperatur zu nennen. An einer untersuchten Deponie wurde ein Temperaturgradient zwischen 2 und 3 Meter Tiefe von 5,5°C/m festgestellt. Es kann also eine verstärkte Verdunstung bzw. verminderte Versickerung der Deckschicht aufgrund der Deponietemperaturen vermutet werden. Die Folge von ausschließlich isothermen

Betrachtungen des Wasserhaushalts sind demnach eine Überschätzung der Wassergehalte und gegebenenfalls der Versickerung.

Der Wasserhaushalt muß also als gekoppelter Feuchte- und Wärmetransport betrachtet werden. Flüssiges Wasser wird aufgrund der Gravitation und des Matrixpotentialgradienten, Wasserdampf aufgrund des Dampfdichtegradienten bewegt. Hierbei sind sowohl das Matrixpotential als auch die Wasserdampfdichte von der Temperatur abhängig. Die Temperaturgradienten bewirken also einen zusätzlichen Transport von Wasser und Wasserdampf von wärmere in kältere Bodenzonen.

Deponien verfügen demnach im Jahresmittel über einen nach oben gerichteten Temperaturgradienten, der zu einer Abfuhr von Wasserdampf nach oben führt. Durch den Anstieg des Matrixpotentials mit der Temperatur findet ein ebenfalls nach oben gerichteter Transport von flüssigem Wasser statt.

Es findet aufgrund der Temperatur eine Reduktion der Nettoversickerung (ca. 120 mm) bei flüssigem Wasser um 2 % und Wasserdampf um 0,3 % statt. Unter mitteleuropäischen Klimabedingungen scheint der Temperatureinfluß auf den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten vernachlässigbar zu sein. Diese Schlußfolgerung muß aber nicht endgültig sein, da eine Reihe von Prozessen, wie die erhöhte Bodentemperatur auf die Evapotranspiration, nicht berücksichtigt bleiben. Die Temperatur einer Deponie kann demnach als weiterer Parameter, neben klimatischen Gegebenheiten und physikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht bei der Entscheidung, wann eine Oberflächenabdichtung aufzubringen ist, dienen.

Der Schwerpunkt der Forschung liegt zur Zeit in der Untersuchung des internen Wärmehaushalts und dessen Einfluß auf Deckschichten. Wichtig ist dabei der temperaturinduzierte Wasserdampftransport (Konvektion und Diffusion nach de Vries).

Forschungsbedarf:

Es sind umfangreiche Geländemessungen auf bestehenden Deponien als Datengrundlage für eindeutige Aussagen durchzuführen. Die hieraus resultierende richtige Abschätzung der Sickerwassermenge kann mit als Grundlage, neben der Untersuchung der spezifischen regionalen Klimabedingungen, für die Erstellung von Sanierungskonzepten für alte, noch warme Hausmülldeponien dienen. Es können somit zuverlässigere Abschätzungen getroffen werden, für welchen Standort welche Abdichtung erforderlich ist.

Überblick über die neueren Arbeiten und Forschungen zur Wasserbilanzierung mit dem HELP-Modell

Dr. N. Markwardt, pedo tec GmbH, Ingenieurbüro für Boden und Wasser

Die bisherigen Forschungen bezüglich des HELP-Modells und seiner Anwendung auf Deponien und Altablagerungen stellen die Erfassung der Verdunstung (Evapotranspiration) in den Vordergrund. Die Modifizierung des bestehenden HELP-Programms ergibt eine auf hiesige Klimaverhältnisse abgestimmte Möglichkeit zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration. Auch je nach Hangneigung und Exposition unterschiedliche Einstrahlungs- und damit Verdunstungsverhältnisse wurden in die Berechnungen einbezogen. Die vorgenommenen Änderungen im Programm wurden durch Lysimeterversuche verifiziert. Um die Benutzerfreundlichkeit des Originalprogrammes zu verbessern, wurden die Ein- und Ausgabedateien verändert.

In der Diskussion wurde betont, daß die Niederschlagsmengen regional stark differieren, so daß sich daraus auch regional unterschiedliche Anforderungen an Oberflächenabdichtungen ergeben könnten. Dabei tritt jedoch immer das Problem auf, daß bei zwei aufeinanderfolgenden regenintensiven Jahren die Feldkapazitäten überschritten werden und ein nennenswerter Abfluß in den Deponiekörper stattfindet.

Es wurde angeregt, daß im Falle einer großen Anzahl von Altlasten, der klimatische Faktor als ein zusätzliches Entscheidungskriterium für die Sanierungspriorität hinzugezogen werden kann. Hierzu wurde eingewendet, daß die Zulässigkeit von Grundwasserverunreinigungen auf der Basis von Bewirtschaftungsplänen als Einzelfallentscheidungen zu betrachten sind, da die Evapotranspiration nicht ausreicht, um eine Sickerwasserbildung zu verhindern.

Forschungsbedarf:

Erweiterung des HELP-Modells um den bislang noch nicht genügend berücksichtigten Faktor Windgeschwindigkeit (Wind). Diese Komponente sollte zukünftig für die Ermittlung der Verdunstung von Deponienhangbereichen und von höheren Vegetationsbeständen sowie der Interzeptionsverdunstung einbezogen werden.

Zusätzlich formulierter allgemeiner Forschungsbedarf

Die neuen Bundesländer zeigen aufgrund ihrer Randbedingungen zusätzliche Problematiken bezüglich Oberflächenabdichtungen, da zum einen sehr unterschiedliche Abfälle innerhalb einer Deponie abgelagert wurden und zum anderen das Deponiegas aufgrund des hohen Braunkohleanteils sehr schadstoffbelastet ist. Es stellt sich dabei insbesondere die Frage nach den Langzeitwirkungen.

Teil III: Vorträge der Teilnehmer

Themenkreis I - Vorgänge im Deponiekörper

Überblick über das Verbundforschungsvorhaben „Deponiekörper“

T. Scheelhaase TU Wuppertal

Das Verbundvorhaben Deponiekörper erlangt seit 1993 Förderung durch das BMFT. Das Thema lautet: Welche Reaktionen laufen tatsächlich im Deponiekörper ab? Die Black-Box Deponiekörper soll geöffnet werden.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in 4 Arbeitsgruppen mit folgenden Themenschwerpunkten:

- *TU Aachen:* Zusammensetzung und Standsicherheit des Mülls. Es werden Erkundungen auf Deponien durchgeführt, z.B. Aufgrabungen des Materials.
- *TU Hamburg-Harburg:* Abschätzung des langfristigen Gefährdungspotentials von Abfällen durch Einbau des Materials in Simulatoren.
- *TU Dresden:* Langzeitverhalten und Gefährdungsabschätzung von Müll aus den neuen Bundesländern, da sich die Zusammensetzung aufgrund höheren Industrie- und Schlackenanteils unterscheidet.
- *TU Wuppertal:* Untersuchungen bezüglich künftiger Abfallzusammensetzung, d.h. biologisch oder biologisch-mechanisch vorbehandelter Siedlungsabfälle.

Zu diesen Themenkreisen findet im April 1995 ein Statusseminar statt.

Der Einfluß von Oberflächenabdichtungen auf das Emissionsverhalten von Abfallablagerungen

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann u. Dipl.-Ing. Kai-Uwe Heyer

Arbeitsbereich Abfallwirtschaft und Stadttechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg

1. Veranlassung / Problemstellung

In den letzten Jahrzehnten wurden sowohl durch die ungeordnete Abfallablagerung als auch durch die geordnete Ablagerung seit 1972 eine große Anzahl von Altablagerungen verschiedenster Größe und Zusammensetzung geschaffen. Diese Altablagerungen stellen aufgrund ihres nicht eindeutig definierbaren Schadstoffinventars, das sowohl von industriellen Rückständen als auch Siedlungsabfällen aus dem kommunalen Bereich herrührt, für Mensch und Umwelt u.U. ein hohes Gefährdungspotential dar, wobei neben der Bodenverunreinigung insbesondere die von den Altablagerungen möglicherweise ausgehenden **Emissionen** über den Luft- und Wasserpfad zu nennen sind:

- Sickerwasseremissionen, die infolge der Einsickerung von Niederschlägen in die Altablagerungen freiwerden.
- Gasemissionen, die infolge von biochemischen Umwandlungsprozessen der abgelagerten Abfallstoffe freiwerden. Diese Gefahr besteht besonders bei Altablagerungen, die organische Anteile aus der industriellen Produktion oder Siedlungsabfälle enthalten.

Zur Begrenzung der Emissionen kann als Sicherheitsmaßnahme eine Oberflächenabdichtung aufgebracht werden, die u.a. unter folgenden Aspekten zu betrachten ist:

- Auswirkungen auf das Emissionsverhalten. Kommt es zum Austrocknen des Abfallkörpers? Welchen zeitlichen Verlauf nimmt die Wassergehaltsänderung über die Höhe der Ablagerung? Wann kommen biologische Abbauprozesse, chemische Reaktionen und Auslaugungsvorgänge zum Erliegen? Da bisher so gut wie keine Oberflächenabdichtung n.d.S.d.T., wie ihn etwa die TA Siedlungsabfall fest schreibt, auf Deponien und Altablagerungen aufgebracht wurden, gibt es hierzu kaum Erfahrungen. Erste Informationen von Deponiebetreibern besagen, daß die Gasproduktion sehr schnell abnimmt, was aber auch mit dem Ende der Verfüllung zusammenhängen kann.
- Sollte zu einer kontrollierten Beeinflussung der o.g. Prozesse eine gezielte Verrieselung von Wasser unter der Oberflächenabdichtung durchgeführt werden? Erfahrungen zeigen, daß eine Beeinflussung der Abbauprozesse im Ablagerungskörper im Sinne eines gesteuerten „Bioreaktors“ nur sehr begrenzt möglich ist. Die Feuchteverteilung erfolgt durch Inhomogenitäten und Sperrschichten sehr unregelmäßig.
- Eine Oberflächenabdichtung verändert den Gashaushalt, insbesondere die Gaswegigkeit im Deponiekörper und den umgebenden Untergrund. Wird eine aktive Gaserasung unumgänglich oder reichen passive Entgasungsmaßnahmen, z.B. in Verbindung mit einem Biofilter, aus?
- Zu welchem Zeitpunkt sollte eine Oberflächenabdichtung aufgebracht werden? Zu berücksichtigen ist die Abfallzusammensetzung, z.B. Restmüll, Hausmüll, industrielle Rückstände, Klärschlamm, ferner der Grad der Umsetzung und die Randbedingungen der Ablagerung wie Basisabdichtung, Grundwasserspiegel, Sickerwassereinstau sowie die noch zu erwartenden (ungleichmäßigen) Setzungen.

- Welches Langzeitverhalten der Oberflächenabdichtung sowie der versiegelten Altablagung ist zu erwarten? Mit welchen Monitoringmaßnahmen sollte die Nachsorge betrieben werden? Wird die Schadstofffreisetzung unterbunden oder lediglich verzögert?

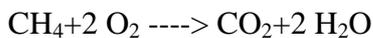
2. Eigene Voruntersuchungen und bisherige Ergebnisse

Im Arbeitsbereich Abfallwirtschaft und Stadttechnik wurden bereits zahlreiche Untersuchungen zum Einfluß von Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen auf das Emissionsverhalten von Abfallablagerungen durchgeführt.

2.1 Abbau von Deponiegaskomponenten in Abdichtungs- und Abdeckschichten

Im Rahmen einer Dissertation wurde das räumliche Verhalten von Gaskomponenten in einer Deponieabdeckung beschrieben, indem umfangreiche Laboruntersuchungen zur Methanoxidation in Boden- und Kompostschichten vorgenommen wurden (Stegmann, Figueroa, 1991). Es wurde Geschiebemergel, der mineralischem Dichtungsmaterial vergleichbar ist, sowie Mutterboden und Kompost verwendet. Dabei wurden Boden- bzw. Kompostsäulen von 70 cm Höhe mit einem definierten Gasgemisch, das der Zusammensetzung von Deponiegashauptkomponenten (60% Methan, 40% Kohlendioxid) entspricht, zwangsdurchströmt. Es wurde der Abbau des Methans über die Höhe der Säule anhand der CH_4 -Abnahme und CO_2 -Zunahme gemessen.

Die biologische Oxidation von Methan durch methanotrophe Mikroorganismen kann mit folgender vereinfachten Reaktionsgleichung beschrieben werden:



Methan wird mit Luftsauerstoff oxidiert. Es entsteht Kohlendioxid, Wasser und Biomasse.

Der flächenbezogene Volumenstrom in den Säulen lag zwischen 10 und 200 $\text{l/m}^2 \cdot \text{h}$. Bei allen drei Böden zeigte sich, daß bei einer spezifischen Flächenbelastung von 60 $\text{l/m}^2 \cdot \text{h}$ noch kein Methan an der Oberfläche des Abdichtungs-/ Abdeckmaterials feststellbar war. Bei Biomüllkompost hat sich bis zu einem Volumenstrom von 100 $\text{l/m}^2 \cdot \text{h}$ noch kein Methan an der Oberfläche der Kompostschicht nachweisen lassen, d.h. die Methanoxidation verläuft bei diesem Volumenstrom, der zumindest das Zehnfache von maximalen Gasaustritten aus Altablagungen über die Oberfläche trägt, noch vollständig. Trotz unterschiedlicher Porosität entwickeln der Kompost und der Geschiebemergel einen ähnlichen Verlauf der Gaskomponenten bei der Verdrängung von Luft durch das Deponiegas.

Die Grundlagenuntersuchungen im Labormaßstab zeigen, daß der Abbau der Gashauptkomponente Methan möglich ist. Der mikrobielle Methanabbau stellt im sauerstoffdurchlässigen Abdeckmaterial eine Emissionsbarriere für Deponiegas dar (Figueroa, 1993). Mit dem Forschungsprogramm können diese Ergebnisse nun auf den großtechnischen Maßstab übertragen und damit als Sanierungsmethode unter realen Randbedingungen überprüft und angewendet werden.

2.2 Oberflächenabdichtung und Deponiegasbehandlung durch die Kombination kapillARBrechende Sperrschicht und Kompostfilterschicht

Als Option zur Verminderung der Sickerwasserneubildung durch Niederschlagseintrag bietet sich die Kombination einer Kompostschicht mit einer kapillARBrechenden Sperrschicht an, deren Dichtwirkung durch die Kombination von zwei im Prinzip wasserdurchlässigen Schichten, nämlich Feinsand und Kies, ggf. in Verbindung mit einem Geotextil, erreicht wird (Brunschlik, Weigl, Wohnlich, 1994). Überlegungen und erste Laboruntersuchungen wurden im Zuge der Sanierungsarbeiten auf der Deponie Georgswerder/Hamburg durchgeführt.

Kapillarsperren bestehen aus zwei Schichten durchlässiger Lockersedimente. Die Grenze zwischen einer feinkörnigen Schicht (Kapillarschicht, z.B. Feinsand) über einer grobkörnigen Lage (Kapillarblock, z.B. Kies) bildet die eigentliche Sperre. Wasser, das in die feinkörnige Schicht infiltriert, wird an der Grenzschicht zur grobkörnigen Lage an einer weiteren Versickerung in den Kies gehindert. Der Hinderungseffekt wird durch die Kraft der Oberflächenspannung bewirkt, die an der Grenzfläche zwischen den wassergefüllten Poren im Feinsand und den luftgefüllten gröberen Poren im Kies wirkt und sogenannte „hängende Menisken“ bildet. Bei einer Oberflächenneigung kann das Wasser dann in der Feinsandschicht lateral als ungesättigter Fluß abgeführt werden. Dieser Vorgang verläuft stabil, solange nicht von oben mehr Wasser in die Kapillarschicht infiltriert als dort aufgrund hydraulischer Leitfähigkeit und Gefälle abgeführt werden kann. Sichert jedoch mehr zu als lateral abfließen kann, entsteht ein hydrostatischer Druck auf der Schichtgrenze, der die Oberflächenspannung schnell übersteigt und zu Durchbrüchen in der Schichtgrenze führt.

In der Schweiz wurde eine gesamte Deponie mit einer Kapillarsperre abgedeckt. Die verschiedenen Untersuchungen belegen die prinzipielle Eignung solcher Systeme; sie zeigen jedoch auch deutlich, daß die Systeme ab bestimmten Zusickerungsraten in die Kapillarschichten zusammenbrechen. Auf der Deponie Georgswerder in Hamburg wurde daher bei großtechnischen Versuchen zur Wirksamkeit von Kapillarsperren auf einem Versuchsabschnitt noch ein erweiterter Schichtenaufbau ausgeführt (Miehlich, Melchior, Steingräber, 1991): zur Vermeidung großer Zusickerungsraten in die Kapillarschicht, z.B. nach Starkregen oder Schneeschmelze, wurde hier oberhalb der eigentlichen Kapillarsperre eine dünne mineralische Dichtung mit einer Dränschicht eingebaut, welche die Zusickerung in die Kapillarschicht begrenzt und vergleichmäßigt. Dieser Aufbau zeigte nach zweijähriger Versuchsdauer eine hundertprozentige Wirkung. Eine vergleichbare Funktion würde eine Kompostschicht großer Mächtigkeit oder ein Bodengemisch aus Kompost und z.B. Mutterboden oder Geschiebemergel übernehmen. Der Wasserhaushalt soll so ausgeglichen werden, Spitzenabflüsse werden vergleichmäßigt. Besonders bei Altablagerungen, die nur ein sehr geringes Gasbildungspotential aufweisen, könnte dieses System neben der Sicherung der Altablagerung zugleich den biologischen Abbau der gasförmigen Emissionen sicherstellen.

2.3 Abbauverhalten von ausgewählten organischen Schadstoffen unter Deponiemilieubedingungen

In jüngsten Untersuchungen wurde das Abbauverhalten von ausgewählten organischen Schadstoffen unter kontrollierten Deponiemilieubedingungen in Laborlysimetern näher geklärt (Stegmann, Deipser, Woyczehowski, 1994). Es konnte nachgewiesen werden, daß Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe (LCKW) in anaerobem und auch aerobem Milieu biologisch angreifbar sind und Umbau- bzw. Abbauprozessen unterliegen. Sie durchlaufen wahrscheinlich eine reduktive Dehalogenierung, die cometabolisch von Methanbakterien durchgeführt werden kann. In allen Lysimeterversuchen war der Abbau nur dann festzustellen, wenn auch gleichzeitig Methan produziert wurde. Unter aeroben Milieubedingungen, wie in einer Kompostschicht oder im oberen Bereich einer nicht abgedeckten Ablagerung findet folglich bei Anwesenheit von Methan ein Abbau von, z.B. dem teilhalogenierten H-FCKW R22 und Vinylchlorid durch methanotrophe Bakterien statt.

Die Abbaurate ist mit $30 \text{ mg/m}^3_{\text{Material}} \cdot \text{h}$ zwar relativ gering, dennoch kann eine hinreichend dicke Kompostschicht, welche kein großes Nährstoffangebot für Mikroorganismen haben muß, eine bedeutende Schadstoffreduzierung durch Degradation von entweichenden Spurenstoffen bewirken. Diese Laborergebnisse können ebenfalls im großtechnischen Maßstab überprüft und weiterentwickelt werden. Die Einflüsse der Oberflächenabdichtung auf die Milieubedingungen und die hier aufgezeigten Abbauprozesse sind eingehender zu untersuchen, insbesondere bei Altablagerungen, wo die abgelagerten Stoffe eine vermehrte Freisetzung von Fluorkohlenwasserstoffen und leichtflüchtigen Chlorkohlenwasserstoffen befürchten lassen.

2.4 Untersuchungen zum Einfluß von Oberflächenabdichtungen im Rahmen des Verbundvorhabens „Deponiekörper“

Innerhalb des Verbundvorhabens „Deponiekörper“ (BMFT/UBA) befaßt sich das Teilvorhaben der TU Hamburg-Harburg mit der Prognostizierbarkeit des langfristigen Emissionsverhaltens von Abfallablagerungen. Es sollen die Zusammenhänge zwischen den Inhaltsstoffen einer Abfallablagerung, den Ablagerungsbedingungen und den Langzeitemissionen erforscht werden, so daß eine Bewertung des Gefährdungspotentials von Altablagerungen möglich wird. Mit umfangreichen Laboruntersuchungen in Deponiesimulationsbehältern und Auslaugtests sollen die Prozesse, die sich in der Altablagerung über Jahrzehnte und Jahrhunderte ereignen, in relativ kurzen Zeiträumen nachvollzogen werden. Dabei sind die verschiedenen Deponierandbedingungen wie der Temperatureinfluß, aerobe und anaerobe Zonen, der Übergang vom anaeroben zum aeroben Milieu und insbesondere der Wasserhaushalt einstellbar. Ein wichtiger Teilaspekt ist der Einfluß einer Oberflächenabdeckung auf die erwähnten Milieubedingungen und die Auswirkungen auf das Emissionsverhalten. So kann z.B. die allmähliche Austrocknung der Abfallprobe durch die nachträgliche Aufbringung einer Oberflächenabdeckung oder die Wiederbefeuchtung infolge einer schadhafte Oberflächenabdeckung überprüft werden.

3. Überlegungen zur Durchführung eines Forschungsvorhabens

Ein Forschungsprogramm der TU Hamburg-Harburg innerhalb eines Verbundvorhabens würde an die Fragen, die unter 1. formuliert wurden, anknüpfen und folgende inhaltliche Schwerpunkte aufweisen:

- **Beurteilung des Schadstoffinventars und des Emissionspotentials**
Abfälle unterschiedlicher Zusammensetzung, Hausmüll, industrielle Abfälle, organische Abfälle, ggf. Stäube, Gießereisande, kontaminierte Böden, können aus Altablagerungen, bei denen z.B. eine Oberflächenabdichtungsmaßnahme geplant wird, per Bohrung/Grabung gewonnen werden. Das Schadstoffinventar und der biologische Abbau-grad werden bestimmt und mit den Ergebnissen verglichen, die bisher im Rahmen des Verbundprojektes „Deponiekörper“ u.ä. gewonnen wurden.
- **Untersuchung der Schadstofffreisetzung in Laborversuchen bei unterschiedlichen Abdichtungssystemen, Beurteilung der Umweltauswirkungen**
In Laborversuchen erfolgt die Simulation des Einflusses unterschiedlicher Abdichtungssysteme auf das mittel- und langfristige Schadstofffreisetzungsverhalten der Altablagerung. Darauf baut die Beurteilung des Einflusses verschiedener Abdichtungssysteme auf, z.B. der kombinierten Oberflächenabdichtung nach TA Siedlungsabfall oder einer Kompostschicht mit kapillarer Sperrschicht, um Restgasemissionen biologisch abzubauen und trotzdem Niederschlagseintrag zu unterbinden. Mit den Laboruntersuchungen kann mit geringerem Aufwand das zukünftige Verhalten des Gesamtsystems „Altablagerung + Oberflächenabdichtung“ besser als im Großversuch beurteilt werden, weil im Labor über die Gewährleistung definierter Randbedingungen ein „Zeitraffereffekt“ erzielt werden kann. Besondere Berücksichtigung finden dabei die Aspekte der Austrocknungsprozesse infolge der Oberflächenabdichtung und der Methan- und Spurenstoffabbau in der Dichtungsschicht.
- **Vergleich mit Verhältnissen auf einer Altablagerung, Anlage eines Versuchsfeldes**
Zusätzlich ist ein Meßprogramm (Deponiemonitoring) auf einer Altablagerung zu installieren, wo eine derartige Abdichtungsmaßnahme durchgeführt wird; dabei wird die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen angestrebt, wie die gemeinsame Durchführung eines Großversuchs mit Testfeldern auf einer Altablagerung zur Beurteilung der Laborversuche und der Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Verhältnisse in situ. An den Versuchsfeldern kann die Realisierbarkeit von passiven Entgasungsmaßnahmen und die Qualitätskontrolle ihrer Funktion überprüft werden. Es stehen zu derartigen Untersuchungen im Labor verschiedene Labortestbehälter von 1 bis 120 l Volumen, die aerob und anaerob betrieben werden können, ferner Versuchsgeräte zur Beurteilung der biologischen Aktivität (Sapromat etc.) zur Verfügung. Ein gut eingerichtetes Labor zur Feststoff-, Sickerwasser- und Gasanalytik erlaubt eine gründliche Dokumentation der Untersuchungen. Zukünftig können auch die grundbaulichen Belange (Standicherheit der Altablagerung, Gleitsicherheit der Oberflächenabdichtung und Materialverhalten) eingehender untersucht werden, d.h. auch der Langzeitaspekt der Oberflächenabdichtung selbst wird in die Beurteilung miteinbezogen.

Literatur

- FIGUEROA, R:A. (1993): Methane oxidation in landfill top soils. Proceedings Sardinia 93; Fourth international Landfill Symposium CISA - Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, S. 701ff
- STEGMANN, R. u. FIGUEROA, R.A. (1991): Gas migration through natural liners. Proceedings Sardinia 91; Third international Landfill Symposium CISA - Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, S. 167ff
- STEGMANN, R. et al (1994): Untersuchungen zum Verhalten von ausgewählten organischen Schadstoffen unter kontrollierten Deponiemilieubedingungen in Laborlysimetern, DFG Abschlußbericht Februar 1991 - Januar 1993; noch unveröffentlicht
- BRUNSCHLIK, R., WEIGL, P., WOHNLICH, S. (1994): Kapillarsperren als alternative Barrieren in Oberflächenabdichtungen von Deponien; Entsorgungspraxis 3/1994, S. 16-21
- MIEHLICH, G., MELCHIOR, S., STEINGRÄBER, S. (1991): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten aus: 1. Arbeitstagung,, Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme“ September 1991; Veröffentlichung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin BAM

Abschätzung der Einflüsse von Deponieabdeckungen auf die Sickerwasseremissionen aufgrund experimenteller Untersuchungen des Deponiewasserhaushalts.

Dr.-Ing. P. Spillmann Universität Rostock

1. Methoden der Wasserhaushaltsuntersuchung

In einem interdisziplinären Forschungsprogramm der DFG, wurde der Wasser- und Stoffhaushalt von Abfalldeponien und dessen Wirkungen auf Gewässer über eine Zeitspanne von 15 Jahren von 12 Instituten aus verschiedenen Teilen Deutschlands an zentralen Versuchsanlagen untersucht, die vom Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig erstellt und betrieben wurden. Wesentliche Ergebnisse zum Wasser- und Stoffhaushalt wurden bereits in Buchform publiziert (Spillmann, Hrsg. 1986), ergänzt durch Fachaufsätze (Chammah et al., 1987; Spillmann 1990; Collins, Spillmann 1990). Die Abschlußpublikation ist in Vorbereitung.

Die Untersuchung wurde an 15 zylindrischen Deponieausschnitten durchgeführt, in denen unterschiedliche Ablagerungsmethoden mit verschiedenen Belastungen industriellen Ursprungs miteinander verglichen wurden.

Das Schwerpunktprogramm der DFG wurde durch weitere Untersuchungen ergänzt:

- Wasserhaushalt, Abbauverhalten, Volumenbedarf (Spillmann 1989),
- großtechnische Anwendung der Ergebnisse (z.B. Jourdan et al., 1982),
- Konsolidierungsverhalten von Altdeponien (Spillmann 1992)

Die Summe der Ergebnisse läßt Schlüsse auf die Auswirkungen von Deponieabdeckungen auf die Sickerwasseremissionen zu.

2. Untersuchungsergebnisse

2.1 Niederschlagseintrag

Durch den Vergleich gesättigter und ungesättigter Deponiekörper, deren Inhalt aufgrund unterschiedlicher Einbaumethoden verschieden schnell abgebaut wurde, konnte der Zusammenhang von Sickerwasserabfluß und klimatischer Wasserbilanz ermittelt werden. Danach verdunsten nach einem Niederschlagsereignis von einer verdichteten, aber unbewachsenen Abfalloberfläche ohne Abdeckung oder mit einer Abdeckung aus sandigem Boden ca. 20 mm (= l/m²), wenn die klimatischen Bedingungen diese Verdunstung ermöglichen (potentielle Evapotranspiration PET = 20 mm). Eine klimatisch mögliche höhere Verdunstung wirkt sich innerhalb der Trockenwetterperiode nicht meßbar auf die tatsächliche Verdunstung aus, da die dazu notwendige kapillare Nachlieferung aus dem Abfall fehlt (Mulcheffekt). Von unbewachsenen Abdichtungen aus verdichtetem Löß kann bis zu 25 mm je Niederschlagsereignis verdunsten.

Durch eine bewachsene einfache Abdeckung (z.B. 50 cm Boden als Zwischenabdeckung) sickert im Winterhalbjahr etwa das gleiche Wasservolumen wie durch eine unbewachsene. Im

Sommerhalbjahr ist die Verdunstung auf die pflanzenverfügbare Speicherkapazität der durchwurzeltten Deckschicht begrenzt. Da nur trockenwetterresistente Pflanzen auf derartigen Standorten überleben und austretende Deponiegase das Wachstum tieferreichender Wurzeln hemmt, bleibt die Verdunstung auch im Sommer erheblich hinter der potentiellen Evapotranspiration zurück.

Aus den Meßergebnissen, die an allseitig kontrollierbaren Deponieausschnitten erzielt wurden, ist zu schließen, daß die gegenwärtig an Betriebsdeponien gemessenen Abflußraten (ca. 20%) erheblich geringer sind als der Niederschlagseintrag in die offene Betriebsfläche. Sie ist auch geringer als der Niederschlagseintrag unter einer einfachen, begrünten ("rekultivierten") Abdeckung. Die Differenz ist auf den Wasserhaushalt im Deponiekörper zurückzuführen.

2.2 Kapazität des Wasserrückhaltes

Als **Wasserrückhalt** wird in der folgenden Betrachtung die Summe aus Speicherung (Bindungskräfte größer als Schwerkrafteinfluß), verzögerter Abfluß (hoher Durchflußwiderstand in Feinporen) und Einstau (Aufstau in groben Poren durch mechanische Sperren oder Gasblasen) bezeichnet.

Die kapillare Speicherkapazität der organischen Substanz ist nach Öffnung der wassergefüllten Zellen der Abfälle und nach Abbau des größten Teils der leicht abbaubaren Stoffe (Stärke, Eiweiß) etwa gleich der Trockenmasse der organischen Substanz einschließlich der Kartonaugen des Verpackungsverbundes, da die Papierfasern und verwandte Pflanzenfasern im gegenwärtigen organischen Anteil der Abfälle dominieren (Einzelheiten z.B. in Spillmann 1989). Das Porenwasser wird nur in bindigen Mineralablagerungen oder Klärschlamm gegen die Schwerkraft gehalten. Der langsame Abfluß wird jedoch nicht nur durch enge Poren, sondern vor allem durch die waagrechte Dachziegelkonstruktion der abgelagerten Kunststoffe, durch Linsen aus Klärschlamm und bindigen Böden sowie durch Gasblasen an Engstellen verursacht. Der Abfluß kann sich deshalb über mehrere Jahre hinziehen und ist in der experimentellen Untersuchung an den Deponieausschnitten nicht unmittelbar meßbar.

In den zitierten Untersuchungen des DFG-Schwerpunktprogramms wurden die zum Ausbau vorgesehenen Deponieabschnitte Ende des Sommerhalbjahres (Ende der Trockenperiode) gegen den Niederschlag des Winterhalbjahres durch eine Überdachung gesperrt und erst ein halbes Jahr später ausgebaut. Der verzögerte Abfluß aus groben Poren, der innerhalb eines hydrologischen Jahres (1. Nov. bis 31. Okt.) abfließt, wurde dadurch von der Messung der Feuchte ausgeschlossen. Folgende Wassergehalte wurden beim Ausbau gemessen:

| | | |
|--|-------------|------------|
| Hausmüll zersetzt | 40% bis 50% | Mittel 46% |
| Müll-Klärschlamm-Gemisch, wenig zersetzt | 40% bis 50% | Mittel 45% |
| Hausmüll mit Klärschlammereinlagerung in Linsen (örtlich Stau) | | |
| Hausmüllanteil, zersetzt | 50% bis 57% | Mittel 54% |
| Klärschlammmlinsen, wenig zersetzt | 65% bis 74% | Mittel 69% |
| Müll-Klärschlamm-Gemisch, weitgehend abgebaut | | |
| erdfeucht (Hauptmasse) | 35% bis 45% | Mittel 40% |
| ausgetrocknete Zonen ("staubtrocken") | 20% bis 25% | Mittel 22% |
| nasse Randzonen (Kondensationsbereiche) | 45% bis 50% | Mittel 47% |

Der biochemische Abbau verringerte die Abfalltrockensubstanz um 20% TS bis 25% TS.

Ergänzende Konsolidierungsuntersuchungen (Collins u. Ramke, 1986) ergaben für einen weitgehend abgebauten Hausmüll einen Endwassergehalt von ca. 30%.

Aus den Messungen der Feuchten und der Massenverluste lassen sich in erster Näherung die Änderungen des Sickerwasserrückhalts im Hausmüll abschätzen.

Anlieferung:

ges. Anfangskapazität 45% = 0,82 t/t Anfangs-TS
 Anfangswassergehalt ca. 27% = 0,36 t/t Anfangs-TS
 freie Anfangskapazität 0,46 t/t Anfangs-TS

Abbau und Konsolidierung:

- 1 t End-TS = 0,75 t Anfangs-TS
- Endkapazität 30% = 0,43 t/t End-TS = 0,32 t/t Anfangs-TS

Wasserneubildung:

In Deponien ohne intensive aktive Entgasung wird Methan in den oberen Schichten mikrobiell oxidiert. Läßt der Gasdruck nach, dringt Luftsauerstoff ein, der zu einem direkten aeroben Abbau führt. In beiden Fällen werden ca. 0,5 t Wasser je 1 t abgebauter Trockensubstanz gebildet. Durch mikrobiellen Abbau wurden in den oben zitierten Deponieausschnitten ca. 0,12 t Wasser je 1 t Ausgangstrockensubstanz neu gebildet.

Insgesamt ergeben sich für Hausmüll in Deponien alten Typs etwa folgende Wassergehaltsänderungen:

| | |
|---|-----------------------------|
| Anlieferung | 0,36 t Wasser/ t Anfangs-TS |
| max. Wasseraufnahme | 0,46 t Wasser/ t Anfangs-TS |
| max. Wassergehalt | 0,82 t Wasser/ t Anfangs-TS |
| Endwassergehalt | 0,32 t Wasser/ t Anfangs-TS |
| freigesetztes Speichervolumen | 0,50 t Wasser/ t Anfangs-TS |
| max. Wasserneubildung | 0,12 t Wasser/ t Anfangs-TS |
| ges. Abfluß aus Speicher und Neubildung | 0,62 t Wasser/ t Anfangs-TS |

Der Vorgang der Mobilisierung des gespeicherten Wassers und der Wasserneubildung wurde in mehreren Parallelen nachgewiesen (Spillmann, Hrsg., 1986).

2.3 Schadstoffmobilisierung durch Abbau der Speicherkapazität

Die in der organischen Substanz gespeicherten Stoffe werden durch deren Abbau wieder freigesetzt. Da ein zügiger Abbau erst einsetzt, wenn eine ausreichende Durchfeuchtung des Abfalls erreicht ist, summieren sich Niederschlagseinträge, freigesetztes Porenwasser und Wasserneubildung zu einem Sickerwasserstrom, der nachweislich doppelt so groß sein kann wie der Niederschlagseintrag. Das Zusammenwirken von Abbau und hydraulischer Spülwirkung konnte vor allem Schwermetalle und Cyanide aus Industrieabfällen mobilisieren, die während

der Speicherphase über mehrere Jahre die Sickerwässer nicht signifikant belasteten (Einzelheiten siehe Spillmann, 1990). Die langzeitige Beobachtung ergab ferner, daß die Mobilisierung trotz eines erheblichen Schadstoffpotentials abnimmt, sobald die Abfälle abgebaut oder zu hinreichend stabilen Huminstoffen umgebaut sind und nicht mehr Sickerwasser abfließt, als der klimatischen Wasserbilanz entspricht. Dieser Zustand konnte nachweislich auch durch eine Abfallbehandlung vor der Ablagerung erzielt werden.

Für schwer wasserlösliche organische Verbindungen (hier: Lindan und Simazin) gilt diese Aussage nicht. Das Sickerwasser wurde annähernd gleichmäßig während der ganzen Beobachtungszeit in geringer Konzentration mit diesen Verbindungen belastet. Die Analysen der Abfälle nach Ende des Versuchs wiesen nach, daß ein Teil dieser Stoffe zunehmend in noch unbelastete Zonen verlagert worden war und dieser Vorgang die Basis noch nicht erreicht hatte. Beachtet man, daß diese Stoffe sich schwer in Wasser lösen, aber sehr gut an die im Abfall reichlich vorhandene Kunststoffe anlagern, so folgt daraus, daß auch ein verstärkter Sickerwasserstrom keine charakteristischen Belastungsspitzen erzeugt, sondern proportional höhere Frachten vom belasteten Abfall zum nächsten unbelasteten transportiert. Für die Langzeitprognose ist aus diesen Messungen zu schließen, daß Stoffe dieser Art nicht stabil vom Deponiekörper gehalten, sondern vom Sickerwasserstrom langfristig aus Deponien wieder ausgetragen werden.

2.4 Zeitlicher Verlauf der Mobilisierungs- und Konsolidierungsvorgänge

In den zitierten Untersuchungen konnte reproduzierbar die biochemische Stabilisierung des Abfalls innerhalb maximal zweier Jahre so weit vorangetrieben werden, daß die Produkte extrem hoch verdichtet bis zu 4m Höhe permanent aerob abgelagert werden konnten. Dieser Zustand wurde inzwischen auch von Rettenberger aufgrund von Untersuchungen im Auftrag der LfU als Endzustand alter Deponien nachgewiesen, daß mit einem schnellen, hochverdichteten Einbau eine lang andauernde saure Phase ohne meßbaren Abbau erzeugt werden kann, deren Hemmwirkung in einem nur 4m hohen Deponieausschnitt noch nach 15 Jahren nachweisbar war. Dieses Ergebnis wird ebenfalls durch die Praxis bestätigt: die nur ca. 12m mächtige Hausmüllablagerung im Donaupark der Stadt Wien, eingelagert zwischen zwei durchlässigen Bauschuttlagen, enthielt nach 40 Jahren Lagerzeit nicht nur gut lesbare Bücher. Die Temperaturen stiegen im Hausmüll wie in einem frisch abgelagerten Abfall auf 60°C bis 85°C, sobald Luft in die Ablagerung eingeblasen wurde (Spillmann, 1992). Aus diesen Beobachtungen folgt, daß der zeitliche Ablauf der hier beschriebenen Mobilisierungs- und Stabilisierungsvorgänge entscheidend von den Ablagerungsbedingungen abhängt und nur aufgrund örtlicher Untersuchungen Angaben über den zeitlichen Verlauf gemacht werden können.

3. Abschätzung der Wirkung von Deponieabdeckungen auf die Sickerwasseremissionen.

3.1 Kurz- und mittelfristige Wirkungen

Aus dem Zusammenhang zwischen Niederschlagseintrag, Speicherung, Stoffverlagerung und Remobilisierung ist zu folgern, daß der Abfluß eines gegenwärtig wenig belasteten Sickerwassers nicht die Gewähr bietet, künftig sicher vor hohen Belastungsschüben zu sein. Ist aufgrund der Vorgeschichte der Deponie damit zu rechnen, daß toxisch wirkende Industrieabfälle

abgelagert wurden, kann der mögliche Belastungsschub aus einer grundwasserfreien Deponie infolge der Summation von Niederschlagseintrag und freigesetzten Speicherinhalts sowie die schrittweise Verlagerung schwer löslicher Schadstoffe bis zur Belastung der Umwelt durch eine sperrend wirkende Abdeckung verhindert oder zumindest verringert werden. Wann und wie sich die Abdeckung auswirkt, hängt von der Ausführung der Deckschicht und dem Zustand des Deponiekörpers ab.

Die weit verbreitete Abdeckung mit Boden und anschließender Begrünung mindert nur in den Sommermonaten den Niederschlagseintrag. Erst 3 m mächtige Deckschichten aus lehmigem Sand bis sandigem Lehm, tief durchwurzelt von einem Eichen- und Kiefern-mischwald, können unter unterschiedlichen deutschen Wetterbedingungen die Niederschläge des Winters speichern und im folgenden Sommer verdunsten (s. z.B. Lehnhardt u. Brechtel, 1979). Übliche Begrünungen alter Deponien sind deshalb nicht geeignet, eine Mobilisierung oder schrittweise Verlagerung von Schadstoffen zu verhindern. Forsthydrologisch auf maximale Verdunstung bemessene Abdeckungen erreichen erst langfristig die vorgesehene Wirkung, wenn durch eine gezielte Entgasung die tiefe Durchwurzlung der Deckschicht auch ermöglicht wird. Ein kurzfristig wirksamer Schutz kann nur mit sperrend wirkenden Deckschichten erzielt werden.

Die z.Z. noch ungelösten technischen Fragen zum Bau sperrend wirkender Deckschichten sind bekannt:

- mineralische Sperren neigen zu irreversiblen Schrumpf- und Biegerissen.
- PEHD-Sperrbahnen sind auf Böschungen nur beschränkt einsetzbar und empfindlich gegen Schervorgänge, die Dauerstandfestigkeit gegen Schubbeanspruchung wurde bisher noch nicht untersucht.
- die Kombination mineralischer Sperren mit einer PEHD-Sperrbahn kann die mechanischen Schwächen der verwendeten Stoffe nicht ausgleichen.
- Kapillarsperren sind nur in ausreichendem Gefälle wirksam und deshalb empfindlich gegen Sackungstrichter und nur auf hinreichend geneigtem Gelände anwendbar.

Unter der Voraussetzung, daß eine einwandfrei sperrende Deckschicht hergestellt wird, besteht deren kurzfristige Wirkung darin, daß der weitere Niederschlagseintrag gesperrt wird. Die Summation von Niederschlag und Speicherabfluß kann deshalb kurzfristig ausgeschlossen werden.

Sind bereits Schadstoffe mobilisiert worden, reicht die Sperrwirkung der Deckschicht nicht aus, weitere Emissionen zu verhindern, weil Sickerwässer aus verzögertem Abfluß und freigesetztem Speicherinhalt weiterhin abfließen. Aus allen überdachten Deponieausschnitten der vorstehend zitierten Versuche flossen bis zum Ausbau des Materials 6 Monate nach Beginn der Sperrwirkung stetig Sickerwässer ab. Da der zur Zeit des Ausbaus gemessene Wassergehalt noch ca. 45% (ca.0,8 t Wasser/ t TS) betrug, nach der Konsolidierung aber nur ca. 30% (= ca.0,4 t Wasser/ t TS) und nach der Austrocknung sogar nur 20% bis 25% (= ca.0,3 t Wasser/ t TS) gemessen wurden, sind ohne Anrechnung weiterer Abbauvorgänge noch mindestens 0,4 t Wasser je 1 t Abfall-TS als Sickerwasser zu erwarten. Da die Feuchte von ca. 45% in einem nur 4 m hohen Deponieausschnitt noch nach 6 Monaten Überdachung gemessen wurde, wird sich der Vorgang bei ähnlicher Lagerung der Abfälle mindestens über mehrere Jahre hinziehen. Die Sperre gegen den Niederschlagseintrag ist deshalb zur Vermeidung von Umweltbelas-

stungen aus Deponien notwendig aber nicht hinreichend, wenn bereits belastete Sickerwässer in erheblichem Umfang abfließen.

3.2 Langfristige Wirkungen

Der biochemische Abbau der organischen Abfälle setzt nicht nur eine ausreichende Feuchte, sondern auch eine ausreichende Sickerwasserbewegung voraus, in der die Abbauprodukte in der Abbaukette der Organismen transportiert werden. Eine sperrende Abdeckung unterbindet die Wasserbewegung und trocknet langfristig den Abfall aus. Da die Messungen an alten Betriebsdeponien wie auch die Kenntnis über die Veränderung kultivierter Torflager eindeutig nachweisen, daß derartige Konservierungen reversibel sind, bildet die sperrende Deckschicht nur einen zeitlich begrenzten Schutz gegen die Mobilisierung von Schadstoffen während der Nutzungsdauer dieses technischen Bauwerks. Sie ist zur Sicherung der Ablagerung bis zu einer stofflichen Stabilisierung der Abfälle notwendig und geeignet, erfüllt aber nicht die Forderung, gegenwärtige Belastungen nicht an künftige Generationen weiterzugeben.

Wird die sperrende Abdeckung durch Maßnahmen zur biochemischen Stabilisierung der Abfälle ergänzt, lassen sich die durch Konservierung verursachten zeitlichen Verlagerungen der Belastungen vermeiden. Außerdem ist mit dieser ergänzenden Maßnahme bereits jetzt feststellbar, welche Ablagerungen erst nach einer thermischen Behandlung die angestrebte Langzeitbeständigkeit erreichen können, und es wird ein Material hergestellt, das zur thermischen Behandlung aus der Deponie wesentlich einfacher entnommen werden kann als ein konserviertes reaktionfähiges Material.

4. Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der technische Entwicklungsbedarf zum Bau zuverlässig sperrender Oberflächenabdichtungen wurde bereits genannt. Die Schwerpunkte sind:

- Herstellung schub- und zugtoleranter Sperren
- Ermittlung der Dauerstandszeiten für schubbelastete PEHD-Bahnen

Der Forschungsbedarf zur Beurteilung alter Deponien einschließlich zutreffender Prognosen zur künftigen Sickerwasseremission ist erheblich umfangreicher als der zur technischen Ausführung der Abdeckungen. Nach Ansicht des Verfassers sind vorrangig folgende Meßverfahren und Beurteilungskriterien zu entwickeln.

- Verfahren zur Ermittlung des Emissionspotentials einer Altablagerung (Problem: industrielle Belastungen liegen oft als "Linsen" vor).
- Einstufung der geochemischen Stabilität der Ablagerung nach den Kriterien der Bodenkunde und Biochemie (Problem: die Inhomogenität der Ablagerung ist so groß, daß repräsentive Proben zur Anwendung der z.Zt. anerkannten Laborverfahren nicht gewonnen werden können).
- Ermittlung der biochemischen Stabilisierungsvorgänge und Emissionen nach Einbau einer sperrenden Deckschicht in Abhängigkeit vom zuvor erreichten Stabilisierungsgrad und der Speichersättigung.
- Beurteilung der langfristigen Bindungsstabilität von umweltbelastenden Industrieprodukten an Minerale und Huminstoffe.

Diese Aufstellung ist sicher nicht erschöpfend, enthält aber nach Ansicht des Verfassers die vordringlichen Aufgaben, die zur Beurteilung der langfristigen Emissionen abgedeckter Altdeponien noch zu lösen sind. Die vorhandenen Kenntnisse reichen aber nach Ansicht des Verfassers aus, sperrende Abdeckungen auszuführen und durch einen technisch beschleunigten Abbau der Abfälle bis zur Erzeugung unlöslicher Huminstoffe das Risiko unerwarteter Mobilisierungen erheblich zu verringern.

Aus den aufgeführten Forschungsthemen werden am Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft des FB Landeskultur und Umweltschutz der Universität Rostock z.Zt. Fragen des Zugverhaltens mineralischer Dichtungsmassen untersucht. Es ist vorgesehen, die Untersuchungen auf die Dauerstandsfestigkeit thermoplastischer Sperrbahnen auszuweiten.

Nach Ergänzung der Laborausstattung im Fachgebiet Bodenkunde werden in Zusammenarbeit mit den Experten der Huminstoffchemie Untersuchungen mit dem Ziel aufgenommen, Prüfverfahren zur Bestimmung der geochemischen Stabilität abgebauter Abfälle an großen Proben (ca. 5 t-Container) zu entwickeln. Ferner werden die Arbeiten zur Senkung des technischen Aufwandes bei der Abfallstabilisierung in situ fortgesetzt.

Literatur

- CHAMMAH, A., COLLINS, H.-J., RAMKE, H.-G., SPILLMANN, P. (1987): Einfluß von Recycling-Maßnahmen auf den Wasser- und Stoffhaushalt von Hausmülldeponien. Müll und Abfall, 19 (9), 353-358.
- COLLINS, H.-J. und RAMKE, H.-G. (1986): Einfluß der Entwässerung (Setzung) auf die Nutzungsdauer von Deponien gemischter Abfälle. Bericht an den Min. f. Wissensch. u. Kunst d. Landes Niedersachsen, Technische Informationsbibliothek (TIB); Hannover.
- COLLINS, H.-J. und SPILLMANN, P. (1990): Lagerungsdichte und Sickerwasseranfall einer Modelldeponie von selektiertem Hausmüll. Müll und Abfall, 22 (6), 365-373.
- 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. BMFT, Forsch.-Ber. T82-180, Fachinformationszentrum Karlsruhe, ISSN 0340-7608.
- LEHNHARDT, F., BRECHTEL, H.M. (1979): Steuerung des Wasserhaushalts von Mülldeponien durch Pflanzendecken.- Wasserhaushalt von Deponien und Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen; Dokumentation eines Arbeitsgespräches; UBA, Okt. 1979.
- SPILLMANN, P. (Hrsg.) (1986): Wasser- u. Stoffhaushalt von Abfalldeponien und deren Wirkung auf Gewässer.- (Forsch.-Ber./Deutsche Forschungsgemeinschaft), VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim, ISBN 3-537-27121-X.
- SPILLMANN, P. (1990): Mobilisierung von Schadstoffen in Altlasten durch Abbauvorgänge.- 3. Intern. KfK/TNO Kongreß über Altlastensanierung, Karlsruhe; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.
- SPILLMANN, P. (1992): Vermeidung unerwünschter Gasemissionen während der Räumung alter Abfallablagerungen oder Industriebelastungen durch gezielte Be- und Entgasung in situ.- erste Anwendung auf die Deponie Donaupark.- Stadt Wien, Magistratsabteilung 45.

Setzungen von Deponieoberflächenabdichtungssystemen - Ermittlung von Kenndaten

Dipl.-Ing. K. Münnich, Technische Universität Braunschweig

1. Vorbemerkung:

Nach dem Verfüllen eines Deponieabschnitts muß gemäß der TASI ein Oberflächenabdichtungssystem aufgebracht werden. Neben den Anforderungen bezüglich des Aufbaus sowie einzelner physikalischer und chemischer Parameter der einzelnen Elemente wird auch ein Mindestgefälle von $\geq 5\%$ nach Abklingen der Setzungen gefordert.

Die Abdichtungssysteme müssen daher mit einer Überhöhung aufgebracht werden. Das Maß der Überhöhung wird geschätzt, wobei i.a. davon ausgegangen wird, daß insgesamt Setzungen und Sackungen im Bereich von 20-30% der Ausgangshöhe eintreten werden. Örtlich kann es jedoch zu weitaus größeren Setzungen kommen.

Aufgrund dieser erheblichen Setzungen und dem damit eventuell verbundenen Versagen der Oberflächenabdichtung wird z.T. schon empfohlen nicht sofort eine Abdichtung gemäß TASI aufzubringen (FLOSS/HEYER, 1992). Es wird ein zweistufiges Vorgehen empfohlen, d.h. zu Beginn ein flexibel verformbares System bis die Hauptsetzungen abgeklungen sind und danach erst ein endgültiges System.

Das Setzungsverhalten von Siedlungsabfällen weist im Gegensatz zum Boden einige Unterschiede auf, dazu gehören z.B.:

- einzelne Komponenten können zusammengedrückt werden (ähnlich dem Kornbruch)
- Zerstörung von tragenden Strukturen infolge biologischen Abbaus
- zeitliche Veränderung der mechanischen Festigkeit von Abfallbestandteilen durch Alterung
- Inhomogenität der Abfälle, die unterschiedliche Verformungen bewirken (Entstehen von inneren Spreizspannungen)
- Temporärer und lokaler Einstau von Wasser durch Gasentwicklung
- Dauereinstau von Wasser durch Versagen der Dränung

Diese Prozesse können in der Praxis nicht voneinander getrennt werden. So kann der biologische Abbau von Substanzen zu einem Massenschwund führen, so daß benachbartes Material nachsacken kann. Gleichzeitig können bei den Abbauprozessen Sickerwässer und Gase entstehen, welche die Festigkeitseigenschaften von Materialien, die biologisch abgebaut werden, negativ beeinflussen (Auftrieb, Schmierung, Strömung etc).

Es können daher nach Abschluß des Einbringens des Abfalls vier Mechanismen unterschieden werden, die die Setzungen hervorrufen (SOWERS, 1972: in DAYAL et al, 1994):

- mechanische Konsolidation (auch infolge der Auflast des Oberflächenabdichtungssystems)
- biochemische Veränderung und Abbau

- Versagen von Hohlkörpern
- Verlagerung von Feinmaterial in größere Hohlräume

Zusätzlich ist u.E. noch eine plötzliche Entspannung von eingestautem Wasser oder Gas zu nennen.

Über den Zeitraum, in dem die Setzungen und vor allem die betragsmäßig größten Primärsetzungen eintreten werden, kann noch keine Aussage gemacht werden.

Im Gegensatz zu diesen Verdichtungssetzungen stehen Formänderungssetzungen, die ohne daß sich das Volumen des Abfalls insgesamt ändert ablaufen. Diese meist sprunghaften Setzungen entstehen, wenn es zu Bewegungen im Böschungsbereich von Deponien kommt. Kleinere Teile der Böschung beginnen zu gleiten, da die Scherfestigkeit des Abfalls überschritten wird. Durch diese Bewegung im Abfall können die Faserkohäsion und damit die rückhaltenden Kräfte vergrößert werden, so daß die Standsicherheit dann noch gewährleistet bleibt (KÖLSCH, 1994). Solche Setzungen können auch im größeren Abstand zur Böschung auftreten, wenn massereiche Gleitkörper fast ausschließlich durch Reibungskräfte zurückgehalten werden. Das Tragverhalten und damit das Verformungsverhalten von Abfällen unterscheidet sich deutlich von Ansätzen, die in der Bodenmechanik angewandt werden. Besonders wichtig ist dabei der Faseranteil des Abfalls. Diese Fasern (Holz, Kunststoffe, Papier etc.) sind in der Lage, hohe Zugkräfte aufzunehmen. Sie unterliegen nach der Ablagerung biochemischen Prozessen, die zu einer Herabsetzung der aufnehmbaren Zugkräfte und damit zu verstärkten Setzungen an der Oberfläche führen können.

Die Messung von Setzungen der Oberfläche und deren zeitlicher Verlauf von bereits verfüllten Deponien ist problemlos mit den Mitteln der Vermessungskunde möglich. Die Bestimmung des Setzungsmaßes einzelner Abfallschichten ist hingegen aufwendiger, sie ist jedoch durch die Vermessung von horizontalen Gasdrainagerohren möglich. Einen Überblick über die verschiedenen Verfahren geben u.a. COLLINS (1987), GERTLOFF (1990).

Diese nachträgliche Überprüfung der Setzung ist für die Planung und den Bau der Oberflächenabdichtung nur wenig hilfreich. Es müssen bereits für den Planer Kenndaten zur Verfügung gestellt werden, mit denen er in Abhängigkeit von z.B. Abfallart, Einbauart der Abfälle, die Höhe der zu erwartenden Setzungen besser abschätzen kann.

Von den zahlreichen Untersuchungen, die unter den verschiedenen Aspekten der o.g. Problematik durchgeführt wurden, sind am Leichtweiß-Institut einige Versuche und Messungen durchgeführt worden, über die im folgenden kurz berichtet wird.

2. Messung des Zeitsetzungsverhaltens in Großödometern

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden am Leichtweiß-Institut Großödometer entwickelt und eingesetzt. Das Meßprinzip entspricht dem der in der Bodenmechanik durchführbaren Kompressionsversuche (Druckversuche mit verhinderter Seitendehnung). Um die Inhomogenität des Abfalls zu berücksichtigen, wurden Geräte mit einem Innendurchmesser von 60 bzw. 120 cm eingesetzt. Das Verhältnis von Probenhöhe zu Probendurchmesser konnte vom sonst üblichen Verhältnis 1:5 auf ein Verhältnis 1:1,5 angehoben werden, da die Wandreibung durch eine spezielle Ausbildung der Berandung stark vermindert werden konnte. In

der Abb. 1 ist ein solches Druck-Setzungsgerät schematisch dargestellt. Die erforderlichen Belastungen wurden über Spannstäbe und Druckplatten auf den Abfall aufgebracht (Details in COLLINS/RAMKE, 1986). Eine unmittelbare Messung der Druckspannung war damals nicht möglich. Diese Konstruktion wird z.Zt. geändert. Der Druck wird zukünftig mittels Druckkissen auf zwei Stahlplatten übertragen, zwischen denen zur kontinuierlichen Erfassung des Druckes Druckaufnehmer angeordnet werden.

Zusätzlich wird infolge des Zusammendrückens des Abfalls abfließendes Sickerwasser volumetrisch erfaßt.

Das Problem beim Zusammendrücken des Abfalls besteht darin, daß die Wandreibung sich stark bemerkbar macht. Der Behälter wurde daher mit einer gegeneinander verschieblichen Teflondoppelfolie ausgekleidet und der Hohlraum zwischen den Folien mit einem geeigneten Gleitmittel gefüllt. Es konnte gezeigt werden, daß die innenliegende Folie nach dem Aufbringen einer vertikalen Last senkrecht zur Belastungsrichtung zerknittert wurde. Die Reibung zwischen dem Abfall und der inneren Folie war so groß, daß die Folie mit der Setzung zusammengedrückt wurde. Die Falten wurden nach innen geworfen, wobei die Steifigkeit der Folie im Vergleich zum Abfall vernachlässigbar ist. Infolge der Auffaltung nach innen, konnte die innere Folie wie geplant reibungsmindernd auf die äußere Folie gleiten. (Der Stahlmantel schwimmt). Bei geringen Auflasten bis 100 KN/m² beträgt der Anteil der Wandreibung noch 7 % der Gesamtlast, während bei höheren Lastenstufen der Anteil auf 2,5 % der Auflast reduziert wird.

Bisher wurden Versuche an biologisch vorbehandelten Abfällen durchgeführt. Die Ergebnisse konnten die Größe der Konsolidationsvorgänge an den Setzungsvorgängen -selbst bei vorbehandelten Abfällen- aufzeigen sowie deren Ähnlichkeit zu den Vorgängen bei bindigen Böden.

3. Setzungsmessungen in Deponien

Bei der Messung der Verformungen in der Deponie gibt es grundsätzlich die Möglichkeit der Messung in vertikalen Schächten/Gasbrunnen sowie die Messung in horizontalen Rohren.

In vertikalen Rohren kommt meistens eine Inklinometermessung in Frage (Details s. z.B. OLTMANN/WYRWA, 1992).

Die horizontale Vermessung kann in der Gasdrainage, also relativ nahe der Oberfläche der Deponie, erfolgen. Mit diesen Meßwerten erhält man eine Aussage über die Gesamtsetzung des Abfalls, eine Zuordnung zu einzelnen Abfallschichten ist nicht möglich. Um eine detaillierte Aussage über die Setzung zu erhalten, können spezielle Setzungsmeßrohre im Deponiekörper verlegt werden (KÖLSCH/COLLINS, 1992). Diese Rohre können eventuell an eine Entgasungsanlage angeschlossen werden. Diese Rohre werden dann in regelmäßigen Zeitabständen vermessen. Aus den Messungen kann sowohl die absolute Größe der Messung als auch der Setzungsverlauf bzw. die Setzungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Zudem können diese Rohre auch genutzt werden, um z.B. Temperaturmessungen durchzuführen, um Hinweise auf die Umsetzungsaktivität im Deponiekörper zu erhalten.

4. Ermittlung mechanischer Eigenschaften in Zugversuchen.

Im Rahmen des DFG-Verbundvorhabens Geotechnik der Abfallstoffe wurde vom Leichtweiß-Institut ein neuartiger Großversuchsstand konzipiert und gebaut mit dem Festigkeitseigenschaften von Abfall ermittelt werden können. Diese Versuchsanlage (s. Abb.2) besteht aus einem rechteckigen Stahlbehälter, in den ein Probenvolumen von ca.4 m³ Abfall eingebaut werden kann. Der Behälter ist als mobiler Container konstruiert, so daß die Abfallprobe auf der Deponie mit verschiedenen Einbaudichten eingebaut werden kann und per LKW dann ins Institut transportiert werden kann. Dort wird der Container auf Rollenbahnen abgesetzt. Es kann z.Zt. eine maximale Auflast von 90 t mit Druckkissen aufgebracht werden, die Normalspannung liegt dann bei 30 t/m². Für die Zugversuche wird der hintere Teil des Kastens verankert, der Kasten in der Mitte vertikal getrennt und die vordere Hälfte gezogen. Die Zugkraft von maximal 60 t wird durch einen Hydraulikzylinder in den Kasten eingeleitet. Der Hydraulikzylinder kann weg- bzw. kraftgesteuert betrieben werden. Die Kraftmessung erfolgt mittels Druckaufnehmer, die Meßwerterfassung erfolgt kontinuierlich mittels Rechner.

Die in den Versuchsstand einzubauenden Abfälle müssen vorher bezüglich der Eigenschaften, die die Festigkeit beeinflussen, untersucht werden. Dies sind u.a. die Korngröße, Faseranteil und -abmessungen, Wassergehalt, Einbaudichte, Grad der Zersetzung der organischen Substanz und Alterungszustand der Kunststoffe. Wobei hierin noch Forschungsbedarf bezüglich der Definition einzelner Zustände besteht.

5. Ausblick

Trotz der vielen bereits durchgeführten Untersuchungen, bleiben noch viele Fragen offen, um das Setzungsverhalten der Abfälle charakterisieren zu können.

Besonders wichtig erscheint uns dabei die Klärung folgender Fragen:

- Einfluß des Ausgangsmaterials
- Ermittlung der zeitlichen Veränderung der Materialeigenschaften
- Einfluß von Wassergehalt und Einbaudichte

6. Literatur

- COLLINS, H.-J. (1987): Verformungsmessungen an und in Deponien. In: Möglichkeiten der Überwachung und Kontrolle von Deponien und Altablagerungen, Fachtagung. Veröffentlichung des Zentrums für Abfallforschung, Heft 2, TU Braunschweig.
- COLLINS, H.-J., RAMKE, H.G. (1986): Einfluß der Entwässerung (Setzung) auf die Nutzungsdauer von Deponien gemischter Abfälle. Forschungsbericht Niedersächsischer MWK. Aktenzeichen 2091-BV 4e26/81.
- DAYAL, U., GARDNER, J.M., CHIADO, E.D. (1994): Design considerations of a new liner system over an existing landfill. In: Landfilling of waste: barriers. Christensen, T.H., Cossu, R., Stegmann, R. (Ed.). E & FN SPON London.
- FLOSS, R., HEYER, D. (1992): Perspektiven für Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. In: Die Deponie des 21. Jahrhunderts. 16. Mülltechnisches Seminar. Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft. TU München, Heft 113.
- GERTLOFF, K.-H. (1990): Setzungsmessungen an Deponien - Methoden und Möglichkeiten. Müll und Abfall, Heft 4.
- KÖLSCH, F., COLLINS, H.-J. (1992): Kontinuierliche Höhenvermessung von nicht begehbaren Rohren. Untersuchungen auf Deponien und in Abwasserleitungen. Bauingenieur 67, S. 303-305.
- KÖLSCH, F. (1994): Ursachen von Sackungen und Setzungen im Deponiekörper und deren Auswirkungen auf Deponieoberflächen. In: Geotechnische Probleme im Deponie- und Dichtwandbau. Fachseminar. Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 43.
- OLTMANN, W., WYRWA, P. (1992): Inklinometermessungen bei Deponien. Ein Erfahrungsbericht. In: Standsicherheiten im Deponiebau. Fachseminar. Mitt. Inst. Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 37.

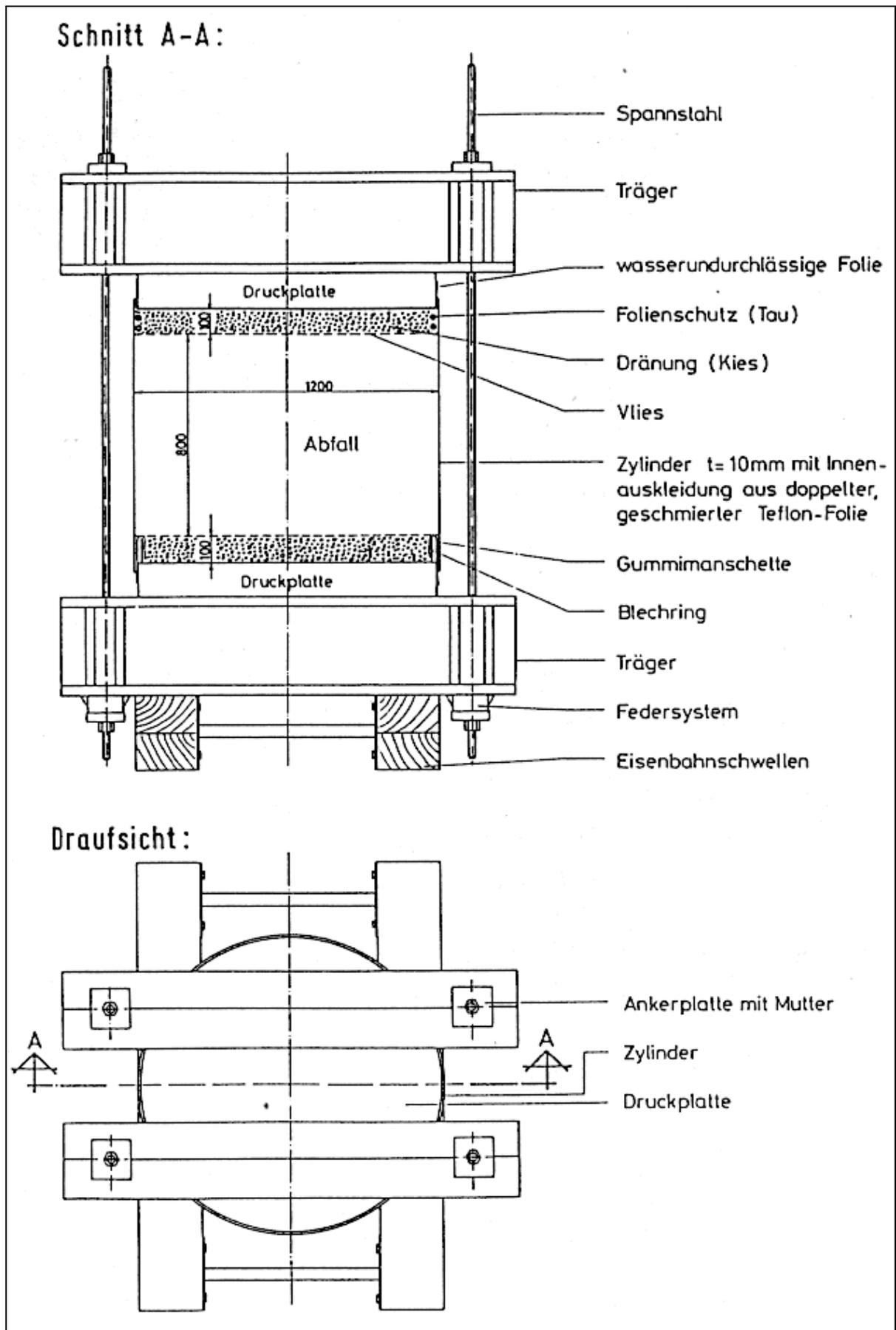


Abb. 1: Schematische Darstellung des Druck-Setzungsgerätes

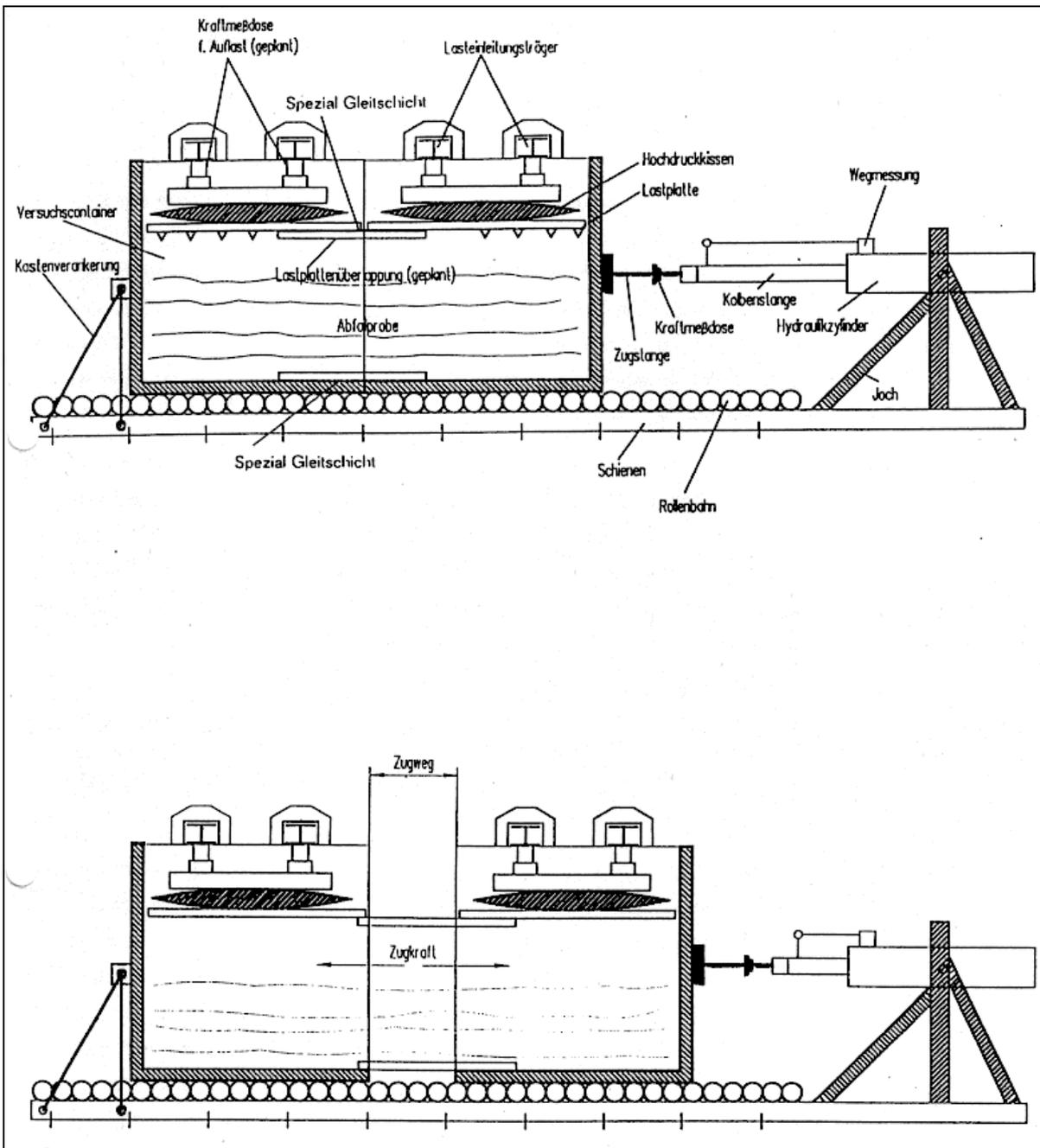


Abb. 2: Schematische Darstellung des Zuggerätes

Untersuchungen zum quantitativen und qualitativen Wasserhaushalt von Landschaftskörpern mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen anhand von Lysimeterversuchen

Dipl.-Ing. agr. A. Maile; Universität-GH Essen Fachgebiet Abfallwirtschaft

Abstract

In dicht besiedelten, von Industrie und Bergbau geprägten Ballungsräumen kommt der Umnutzung von ehemaligen Industrie- und Zechengeländen eine zentrale Bedeutung zu. Große Bereiche dieser Flächen sind aber, infolge jahrzehntelanger Industrie- und Bergbautätigkeit, zum Teil erheblich mit Schadstoffen (v.a. PAK und Schwermetalle) kontaminiert. Die Abtragung von gering bis mittel kontaminiertem Bodenmaterial und die Ablagerung in Form von Erddeponien auf dem Sanierungsgelände selbst (sogenannte Landschaftskörper) ist ein sinnvoller Weg, um belastete Flächen einer neuen Nutzung zuzuführen.

Durch geeignete Sicherungsmaßnahmen ist dafür zu sorgen, daß von dem abgelagerten Material in Zukunft keine Gefährdung für Boden und Grundwasser ausgehen wird. Besonders über den Wasserpfad besteht die Möglichkeit des Schadstoffaustrags. Die Frage nach geeigneten Abdichtungssystemen, die den Zutritt von Wasser minimieren sowie bautechnisch möglichst einfach und kostengünstig zu realisieren sind, ist von zentraler Bedeutung. Überzogene Anforderungen an Abdichtungssysteme für Landschaftskörper erhöhen nicht nur die Kosten sondern sind, aufgrund des einhergehenden Energie und Ressourcenverbrauchs auch ökologisch unsinnig. Um das Risiko, das von derartigen Landschaftskörpern auf die Umwelt ausgeht, einschätzen zu können, sind die Bilanzierung des Wasserhaushaltes bei unterschiedlichen Abdichtungssystemen und die Beurteilung der Qualität der einzelnen Wasserströme von grundsätzlicher Bedeutung.

Anhand von Versuchen mit Großlysimetern mit einem Durchmesser von 2 m und einer Höhe von ca. 3 m sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Oberflächenabdichtungen bzw. -abdeckungen auf den quantitativen Wasserhaushalt untersucht werden. Ein Schwerpunkt der Versuche liegt in der Ermittlung von Wasserbilanzen und Untersuchungen der Funktionsfähigkeit der einzelnen Abdichtungssysteme. Weiterhin werden Untersuchungen zur Schadstoffverlagerung bei den verschiedenen Varianten und die Beziehung zum jeweiligen Wasserhaushalt durchgeführt. Die Ermittlung der quantitativen Wasserbilanz erfolgt durch Messung der einzelnen Wasserströme, auf die sich das Niederschlagswasser verteilt. Der Wasserinput durch Niederschläge verteilt sich auf die einzelnen Parameter der Wasserbilanz nach folgender Gleichung:

$$N = ET + A_o + A_b + \Delta B + \Delta D + \Delta SK + SW$$

N: Niederschlag, ET: Evapotranspiration, A_o: Oberflächenwasserabfluß, A_b: Drainageabfluß, bzw. Bodenwasserabfluß, ΔB: Änderung des Wassergehaltes in der Bodendeckschicht, ΔD: Änderung des Wassergehaltes in der Dichtungsschicht, ΔSK: Änderung des Wassergehaltes im Schüttkörper, SW: Sickerwasserabfluß an der Basis.

Die einzelnen Parameter der Wasserhaushaltsgleichung werden anhand der geplanten Lysimeteruntersuchungen bestimmt. Durch chemische Analysen anfallenden Sickerwassers bzw. von freiem Bodenwasser wird die Änderung der Wasserqualität untersucht, sofern Wasser die Dicht- bzw. Deckschichten durchdringt.

Die Gesamthöhe aller Lysimeter beträgt ca. 3 m, um einen gleichmäßigen Wasserinput durch Niederschläge sicherzustellen, die Füllhöhe unterscheidet sich entsprechend den Angaben in Tabelle 1. Meteorologische Daten werden mit einer Wetterstation und die Evapotranspiration mit Hilfe eines wägbaren Lysimeters erfaßt, die oberflächengleich mit den untersuchten Varianten installiert sind.

Tabelle 1 zeigt die Varianten unterschiedlicher Oberflächenabdichtungen bzw. -abdeckungen die untersucht werden. Die Varianten 1+2 sind nach den Vorgaben der TA Siedlungsabfall ausgeführt. Variante 1+3 entsprechen gängigen Bauausführungen für Oberflächenabdichtungen wie sie bei Landschaftskörpern anzutreffen sind (Kombinations-Oberflächenabdichtung in Castrop-Rauxel (Erin); Bentonitmatte und Drainagegitter in Herten-Scherlebeck (Schlägel & Eisen)). Bei Variante 4 ist oberhalb des belasteten Materials eine 80 cm mächtige mineralische Dichtungsschicht aus lehmigen Bodenmaterial, das im Gegensatz zu Ton, in großen Mengen zur Verfügung steht, eingebaut und mit einer Drainagematte abgedeckt. Die Varianten 1-4 sind alle mit einer 1 m mächtigen Bodendeckschicht (BDS) aus humosem, sandig-lehmigem Bodenmaterial abgedeckt. Variante 5 ist nur mit einer 20 cm mächtigen Bodendeckschicht ausgeführt, so daß Sickerwasser (SW) nach relativ kurzer Zeit anfällt und gezielte Untersuchungen zum Eluatverhalten von Schadstoffen durchgeführt werden können.

Tab. 1: Lysimetervarianten mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen (-abdeckungen)

| Variante | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------|--------------|--------------------|---------------|---------------------|-----------------|
| Bezeichnung | Komb. Dicht. | min. Dicht. (TASI) | Bentonitmatte | min. Dicht. Lehm/DG | Bodenabdeckung. |
| Bodendeckschicht | 100 cm | 100 cm | 100 cm | 100 cm | 20 cm |
| Geotextil (Filter) | + | + | + | + | - |
| Dränage | 30 cm | 30 cm | Geogitter | Geogitter | - |
| HDPE KDB | + | - | - | - | - |
| Bentonitmatte | - | - | + | - | - |
| min. Dichtung | 50 cm | 50 cm | - | 80 cm | - |
| kont. Schüttmaterial | 100 cm | 100 cm | 100 cm | 100 cm | 100 cm |
| Geotextil (Filter) | + | + | + | + | + |
| Dränage | 1 | 20 cm | 20 cm | 20 cm | 20 cm |
| Füllhöhe | 300 cm | 300 cm | 220 | 300 cm | 140 cm |
| Gesamthöhe | 310 cm | 310 cm | 310 cm | 310 cm | 310 cm |

Themenkreis II - Technologie der Oberflächenabdichtung

Die mineralische Barriere

Prof.Dr.Dr. K. Czurda, Universität Karlsruhe

Ein Oberflächenabdeckungssystem hat vor allem zwei Funktionen gerecht zu werden: das Niederschlagswasser vom Abfall fern zu halten und das entstehende Deponiegas kontrolliert abzuleiten. Die mineralische Barriere ist Teil dieses Systems. Ihr kommt die abdichtende Funktion zu: Verhinderung des Wasseraustritts nach unten und des Gasdurchtritts nach oben. Sie ist nach dem heutigen Stand der Technik und Wissenschaft zwar optimierbar - aber auch in Kombination mit anderen Dichtungselementen unverzichtbar. Eine Kombination Kapillarsperre/ mineralische Barriere oder Asphalt/mineralische Barriere und andere ist bei entsprechendem Gleichwertigkeitsnachweis denkbar, der mineralische Anteil kann jedoch nicht ersetzt werden.

Ausschlaggebender Bestandteil mineralischer Abdichtungen sind immer noch Tonminerale. Es handelt sich hierbei um Schichtsilikate kolloidaler Größenanordnung $<2 \mu\text{m}$. Sie besitzen große spezifische Oberflächen, können H_2O -Moleküle und Kationen reversibel an- und einlagern, können quellen und schrumpfen, sind jedoch aus diesen Gründen nicht strukturstabil. Ein großer Teil der Tonminerale ist aus tetraedrischen und oktaedrischen Lagen in Form von Schichtsilikaten aufgebaut. Zweischicht-, Dreischicht- und Vierschichteinheiten kennzeichnen die Untergruppen.

Der isomorphe Ersatz in Tetraedern und Oktaedern bedingt negativen Ladungsüberschuß, der z.T. durch K^+ - Ionen oder andere Ionen in austauschbarer Form (Ca, Mg, Na u.a.) kompensiert ist. Häufig sind die Kristalle von Fehlstellen durchsetzt und variieren in der chemischen Zusammensetzung, in der Schichtladung und im Basisabstand. Sie erreichen daher einen unterschiedlichen Kristallintensitätsgrad. Die geringe Teilchengröße und die Kristallinität ist neben der Schichtladung Ursache für die hohe Reaktionsfähigkeit der Tonminerale.

Die Gefügeeigenschaften insbesondere auch im Mikrobereich sind ausschlaggebend für Parameter wie Scherfestigkeit, Setzungsempfindlichkeit, Permeabilität, Porosität, Kohäsion, Kapillarität, Frostempfindlichkeit und sind damit auch äußerst relevant für die Dichtungseigenschaften einer mineralischen Barriere. Neben dem Gefüge, d.h. der Anordnung der Einzelteile zueinander, spielt die Struktur, also Kornform, Korngröße und interpartikuläre Kräfte, eine Parameter bestimmende Rolle.

Wasserhaushalt in der mineralischen Barriere

Der mineralische Anteil einer Oberflächenabdichtung setzt sich aus unterschiedlichen Korngrößen zusammen. Er muß, um seine o.a. Funktionen zu erfüllen, proctorverdichtet werden. Der Erfolg der Verdichtung hängt von der Verdichtungsarbeit, der Kornverteilung und dem Wassergehalt ab.

Die Permeabilität einer verdichteten mineralischen Barriere hängt weitgehend auch vom Verlauf der Körnungslinie ab. Die Wasserdurchlässigkeit ist umso geringer, je flacher die Kurve

verläuft und je mehr sie im Schluff-Tonbereich zu liegen kommt. Bei nichtbindigen und gemischten Böden ist die Verdichtungsfähigkeit bei flach liegenden Körnungslinien wesentlich besser als bei steilen.

Die nach Proctorbedingungen eingebaute mineralische Barriere enthält stets Wasser, das im allgemeinen unter der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) im Porenraum konserviert wird, bei Erwärmung durch die Reaktionsprozesse im Siedlungsabfall und durch Niederschlagswasserzuflüsse bei Beschädigung der KDB im ersten Fall quantitativ vermindert und im letzten Fall quantitativ angereichert wird.

Wasser beeinflusst die Eigenschaften eines Mineralgemisches nachhaltig. Der Wassergehalt der mineralischen Oberflächenbarrieren wirkt sich - besonders bei bindigen Böden auf die inneren Widerstände, auf die Tragfähigkeit, auf die Zusammendrückbarkeit, auf die Permeabilität etc. sehr weitgehend aus.

Die festen Teilchen des Bodens werden von **Adsorptionswasser** über die auf kurze Entfernung wirkenden Van-der-Waal's-Kräfte und über Wasserstoffbrücken-Bindungen umhüllt. Wesentlich effektiver und über größere Entfernungen wirkt das elektrostatische Feld der Gegenionen und der geladenen festen Oberfläche. Die Bindung zwischen den adsorbierten Wassermolekülen erfolgt über Wasserstoffbrücken. Die an die Mineraloberfläche gebundene erste Molekularschicht weist eine hohe Bindungskraft von bis zu ca. 600 MPa auf (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1989). Die darüber liegenden Schichten sind dann wesentlich weniger stark gebunden. Die hohe Bindungsenergie macht sich in Tonböden dann deutlich bemerkbar, wenn sie nach Ofentrocknung oder beim Austrocknen über dem reagierenden Hausmüll wieder befeuchtet werden. Es tritt dann nämlich eine Temperaturerhöhung auf, die durch die kinetische Energie der Wassermoleküle, die bei der Adsorption frei wird, begründet ist.

Die Bildung von **Kapillarwasser** beruht auf dem Prinzip der Kapillarkondensation, d.h. die Tendenz der Verkleinerung der Grenzflächen zwischen Wasser und Luft. Dadurch wird ein energieärmerer Zustand erreicht. Bereits bei der Adsorption einiger Wassermolekülschichten bilden sich zwischen den festen Partikeln stark gekrümmte Menisken. Diese gekrümmten Luft-Wasser-Grenzflächen verursachen Porenwasserspannungen, welche ihrerseits effektive Spannungen zwischen den Mineralpartikeln hervorrufen. Zugspannungen sind für eine temporäre Erhöhung der Kohäsion eines bindigen Erdstoffs verantwortlich.

So wie das Bestreben die Oberfläche Wasser/Luft zu verkleinern zur Kapillarkondensation führt, bewirkt dieser Mechanismus auch den Aufstieg von Menisken in Kapillaren. Am wirkungsvollsten geschieht dies in Poren mit relativ großer Oberfläche bei kleinem Volumen. Demnach steigt das Wasser in kleinen unregelmäßigen Poren und Kanälen höher als in ideal kreisförmigen und großen.

Schrumpfung:

Das Ausmaß von Quellung und Schrumpfung wird durch den Typ und die Qualität von Tonmineralen in einem Mineralgemisch bestimmt. Aus der Kristallstruktur und den Zwischengitterbindungen abgeleitet geht hervor, daß 3-Schicht-Mineralen wie Montmorillonit und Vermiculit wesentlich besser expandieren und schrumpfen als z.B. Kaolinit und Illit. Wegen den weitreichenden Auswirkungen des Quellverhaltens in Belastungssituationen auf die Permea-

bilität und das Frost-Tau-Verhalten etc., wurden verschiedene Methoden zur Erfassung dieses Phänomens entwickelt. Die brauchbaren Methoden beruhen auf der Bestimmung der Tonmineralzusammensetzung, der Schrumpf- und Plastizitätsindizes, der Aktivität und des Anteils $< 2 \mu\text{m}$.

Austrocknung:

Auf den Testfeldern der Deponie Karlsruhe Ost, bzw. Georgswerder wurden von GOTTHEIL und BRAUNS (1993) und MELCHIOR et al (1993) Anzeichen einer Austrocknungsmöglichkeit der mineralischen Lage unter der KDB festgestellt. Eine Austrocknung ist bei Beschädigung der KDB durch folgenden Prozeß denkbar: Die Wasserteile aus der mineralischen Lage steigen kapillar durch das KDB-Leck in den Rekultivierungshorizont auf und können von dort unter entsprechenden klimatischen Bedingungen verdunsten. Die Austrocknung äußert sich als Schrumpfungsprozeß in einem Zugrißmuster, wenn die kohärente Matrix der Kontraktion nicht folgen kann.

Frost-Tau-Zyklen:

Tonbarrieren erweisen sich immer dann als besonders frostgefährdet, wenn Wasser entweder kapillar zur Frostfront aufsteigen kann oder durch Niederschlag während Tauphasen in den Ton eindringt. In Tonen wird das Wasser beim Gefrieren in Form von Eislin sen an der Gefrierfront gebunden. Von erheblicher Bedeutung ist auch die Oberflächenausbildung der Tonkristalle. Durch die Kristallisationskraft des Eises wird dem ungefrorenen Boden Wasser entzogen. Dadurch bildet sich an der Unterseite des gefrorenen Bereiches ein Matrixpotential als wichtige Antriebskraft für die Wasserbewegung zur Gefrierfront. Das Ausmaß der Wasserbewegung korreliert mit der Wasserleitfähigkeit des Bodens. Die Voraussetzung für einen Wassertransport zur Eislinse ist das Vorhandensein von in Form von dünnen Wasserfilmen vorliegenden, ungefrorenem Bodenwasser. Die bereits gebildeten Eiskristalle können weiterwachsen, es kommt zur Eislin senbildung. Damit verbunden ist eine Volumenzunahme im gefrorenen Bereich. Kommt es bei Wasserentnahme dagegen zu einer Konsolidation oder Schrumpfung des Bodens, so kann die Volumenzunahme im gefrorenen Bereich durch eine Volumenabnahme im ungefrorenen Bereich ausgeglichen werden. Dies hängt von dem Verhältnis von ungefrorenem zu gefrorenem Boden, von der Konsolidations- bzw. Schrumpffähigkeit sowie vom Anfangswassergehalt der Proben ab.

Vor allem Tone mit Gehalten an expandierenden Phasen reagieren durch Rückquellung beim Tauvorgang abdichtend, d.h. erhöhte Durchlässigkeiten in der ausgetrockneten Zone oder im ehemals gefrorenen Bereich durch Aggregatbildung werden wieder rückgängig gemacht. Nichtquellende Phasen, Kaolinite z.B., regeln ihre Mineralpartikel parallel zur Gefrierfront ein, und nach dem Auftauen geht das neu gebildete Parallelgefüge mit schichtparallelen Hohlräumen nicht wieder in seinen dichteren Ausgangszustand zurück. Der Boden bleibt durchlässiger.

Aus Gründen der Frostsicherheit in mineralischen Oberflächenbarrieren ist auf plättchenförmige, nichtquellende Komponenten, wie z.B. Kaolinit zu verzichten, falls nicht ausreichender Frostschutz durch Abdeckung gewährleistet ist.

Bentonit:

Bentonite werden seit vielen Jahren für Abdichtungszwecke eingesetzt. Bentonit ist ein tonmineralhaltiges Gestein, dessen Hauptbestandteil das Tonmineral Montmorillonit ist. Dieses ist der wichtigste Vertreter in der Gruppe der Dreischichttonminerale.

Die Verwendung von Bentoniten oder anderen Tonen mit hohem Anteil an expandierenden Phasen ist wegen der Austrocknungsproblematik und der stark veränderlichen Zustandsform nicht zu empfehlen. Beim Einsatz von Na-Bentoniten für Oberflächenabdichtungen sollte eine Zumischung von strukturbeibehaltenden Tonmineralen wie z.B. Illit oder Kaolinit erfolgen. Bezüglich der Frostsicherheit erweisen sich Bentonite jedoch wegen des Selbstheilungseffektes beim Tauen besser geeignet als andere Schichtsilikate. Mineralgemische mit geringen Tonmineralanteilen, evtl. Flugaschen, die die geforderte geringe Durchlässigkeit von $\leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s bei Sonderabfällen bzw. $\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s bei Siedlungsabfällen durch Verdichtung erreichen, sind als Alternativen anzusehen.

Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Altablagerungen

Dipl.- Ing. S. Urban-Kiss, Ingenieurgesellschaft RUK, Stuttgart

1. Begriffe und Wirkungsweise

Die Oberflächensicherung kann als Oberbegriff verwendet werden. Bei der Oberflächensicherung wird die Oberfläche der Altlast mit einer Oberflächenabdichtung oder einer Oberflächenabdeckung versehen. Die Oberflächenabdichtung beinhaltet ein definiertes und beständiges Dichtungselement und wirkt wie folgt.

- a) da das Eintreten von Niederschlagswasser in die Altlast minimiert wird, wird die Sickerwasserneubildungsrate und damit der Sickerwasseraustritt aus der Altlast vermindert
- b) die Emission von Deponiegas und leichtflüchtigen Stoffen wird minimiert
- c) die Geruchsemission wird minimiert
- d) der Luftzutritt in die Altlast bei Betreiben einer Bodenluftabsaugung oder einer aktiven Entgasung wird minimiert
- e) das Pflanzenwachstum kann ermöglicht oder unterstützt werden, da ein Schadstofftransport in der Wasser- oder Gasphase an die Geländeoberkante sowie eine Schadstoffaufnahme durch Pflanzenwurzeln unterbunden wird

Zusätzlich übernimmt die Oberflächenabdichtung folgende Aufgaben:

- f) die Möglichkeit eines direkten Kontaktes mit den Schadstoffen der Altlast wird unterbunden
- g) die Staub- und Abfallverwehung sowie die Wassererosion an der Altlast werden unterbunden
- h) die Zugänglichkeit zur Altlast für Vögel und Nagetiere wird unterbunden, so daß keine Verschleppung von altlasteigenen Stoffen in die Umgebung erfolgt
- i) die Gefahr von Bränden in der Altlast wird infolge des eingeschränkten Luftzutritts herabgesetzt
- j) die optische Wirkung der Altlast wird verbessert.

Sofern lediglich die Aufgaben gemäß Buchstaben f)-j) zu erfüllen sind, kann auch eine Oberflächenabdeckung eingesetzt werden. Die Aufgaben nach Buchstaben a) bis e) können von dieser nur in einem eingeschränkten Ausmaß übernommen werden, da die Oberflächenabdeckung keine definierte Dichtungsfunktion aufweist.

2. Wahl des Abdichtungssystems / der Abdeckung

Im Zusammenhang mit der Sicherung von Altablagerungen kann der Einsatz unterschiedlicher Systeme der Oberflächenabdichtung bzw. -abdeckung erforderlich sein. Die Erfordernis sowie die Auswahl und Gestaltung des Abdichtungs-/Abdeckungssystems, ergeben sich im Rahmen der Sanierungsplanung. Die Verwendung eines festgelegten Abdichtungssystems (z.B. nach TASI) erscheint daher nicht zweckmäßig. Die Auswahl und Gestaltung des Abdichtungs-/Abdeckungssystems ist im wesentlichen von folgenden Kriterien abhängig:

- Gefährdungspotential der Altablagerung und daraus resultierende Anforderungen an die Wasser- und Gasdichtigkeit, an die Langzeitbeständigkeit und an die Kontrollierbarkeit und Reparierbarkeit.
- Festigkeit und Setzungsverhalten des Untergrundes
- Morphologie und Geometrie der Altlast sowie Belange der Standsicherheit (aus Gründen der Gleitsicherheit ist bei der Realisierung von Oberflächenabdichtungen insbesondere wegen der baubedingten Belastungen das maximal mögliche Gefälle begrenzt, andererseits ist zur Sicherstellung eines Wasserabflusses ein Mindestgefälle erforderlich).
- vorhandene und vorgesehene Flächennutzung (Folgenutzung) und Möglichkeiten einer Nachsorge des Sicherungssystems
- Materialverfügbarkeit
- Realisierungsdauer
- Wirtschaftlichkeit

3. Funktion

3.1 Wasserbarriere

Untersuchungswerte bezüglich der Wasserdichtigkeit wurden im Rahmen von F+E-Projekten für eine Reihe von Abdichtungssystemen an ausgewählten Deponiestandorten gewonnen. Bei der Angabe der Barrierewirkung sind i.d.R. die klimatischen Randbedingungen des Standortes (z.B. Niederschlagshöhe, Verdunstungsleistung) zu berücksichtigen. Für eine überschlägige Einschätzung, die den Vergleich mit Erfahrungswerten aus der Deponietechnik ermöglicht, kann auch eine Angabe der Durchsickerung als Vomhundertsatz der Niederschlagshöhe erfolgen.

Die Durchsickerung der Kombinationsdichtung und der erweiterten Kapillardichtung lagen an der Deponie Georgswerder beispielsweise bei maximal ca. 1-2 % des ND die mineralische Abdichtung wies eine Durchsickerung von bis zu ca. 16 % des ND auf (s. Melchior: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdeckungssysteme für Deponien und Altlasten).

Gemäß der zur Verfügung gestellten Studie zur "Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen zur Sicherung von Altablagerungen mit überwiegendem Hausmüllanteil" der Universität Stuttgart ergaben sich durch Modellrechnungen der Durchsickerung an mit Erdmaterial abgedeckten Deponien mit dem HELP-Modell für die Deponien

| | |
|----------------------|----------------|
| Federlesmahd (HELP) | 25-37% des ND |
| Hintere Halde (HELP) | 17-20% des ND. |

Verglichen mit in der Deponietechnik gewonnenen Erfahrungswerten über den Sickerwasseranfall offener Deponien, ist die Reduktion der Sickerwassermenge mittels solcher Abdeckungen begrenzt.

3.2 Gasbarriere

Gasbarrierewirkung durch mineralische Materialien mit großer Verdichtung und/oder beständigem hohem Wassergehalt sowie durch Kunststoffdichtungsbahnen [1].

3.3 Beständigkeit

Verschiedene Material- und Felduntersuchungen liegen vor [2]. Testfelder mit installierten Systemen sind grundsätzlich für weitere Untersuchungen verfügbar, die F+E-Projekte sind jedoch teilweise bereits abgelaufen.

3.4 Kontrollierbarkeit

Verschiedene Methoden zur Leckortung wurden erprobt [3]. Die Zuverlässigkeit und die Standzeit der Leckortungseinrichtung sind bislang nicht hinreichend gesichert.

4. Untersuchungsbedarf

Ein **Forschungsbedarf** wird von Seiten des Autors insbesondere im Zusammenhang mit der Oberflächensicherung von Altablagerungen gesehen. Dieser Forschungsbedarf bezieht sich sowohl auf die Fragestellungen der Technologie der Oberflächensicherungssysteme, als auch auf die Fragen der Wechselbeziehungen zwischen Deponiekörper und Oberflächensicherung. Nachfolgend sind stichwortartig verschiedene Ansätze genannt.

4.1 Funktion der Oberflächensicherung z.B.

- Rechenmodelle Wasserhaushalt (HELP, CREAMS) mit Berücksichtigung z.B. der Klimaabhängigkeiten und des Reliefs
- Kennwerte der verschiedenen Systeme als Grundlage für die Systemwahl im Rahmen der Sanierungsplanung
- Beständigkeit und Langzeitwirkung verschiedener Systeme
- Berücksichtigung von Maßnahmen der Oberflächensicherung von Altablagerungen in der Wasserhaushaltsbilanz im Rahmen der Grundwasserbewirtschaftung.

4.2 Belastungsansätze/ Rahmenbedingungen für Oberflächensicherung z.B.

- Deponiegasproduktion, Dauer und Intensität der mikrobiellen Abbauprozesse
- Basisdaten zur Entwicklung des Wassergehalts im Deponiekörper in Abhängigkeit von z.B. Abfallarten, Verfüllgeschwindigkeit, Verdichtung, Betriebsabdeckung.

4.3 Planungsdetails z.B.

- Funktionsveränderung von einer Oberflächenabdichtung zur Zwischenabdichtung
- Systeme zur Kontrollierbarkeit der Oberflächenabdichtung

Literatur

- [1] URBAN-KISS, S. (1994): Wirksamkeit ausgeführter Oberflächenabdichtungssysteme - Beispiel Deponie Gerolsheim. BMFT-Statusseminar "Sicherung von Altlasten", Hamburg, 05. und 06. 09. 1994.
- [2] RETTENBERGER, G., URBAN-KISS, S. (1990): Oberflächenabdichtungssysteme mit Kunststoffen - Versuche an der Sonderabfalldeponie Gerolsheim. 6. Fachtagung 15. und 16. Februar 1990 "Die sichere Deponie, Kunststoff-Dichtungssysteme - ein wichtiger Beitrag zum Umweltschutz". Congress-Centrum Würzburg.
- [3] RETTENBERGER, G., SCHMID, C., URBAN-KISS, S. (1989): Lecküberwachung an einer Oberflächenabdichtung. Abfallwirtschaftsjournal 1, Nr. 10.

Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien und Altlasten

Dipl.-Ing. G. Burkhard u. Dipl.-Geol. Th. Egloffstein; c/o ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda & Partner mbH

1. Einleitung

Durch die hohen Ansprüche an die ökologische Verträglichkeit von Abfallentsorgungsanlagen, durch den Versuch, deren Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen, aber auch durch konkrete Vorgaben in der TA Abfall /6/ wurde in jüngster Zeit die Entwicklung von kontrollierbaren Abdichtungssystemen für Deponien und Altlasten stark angeregt.

Nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) § 22 ist der Betreiber von Deponien bei Verunreinigung eines Gewässers zum Schadensersatz verpflichtet. Diese Schadensersatzpflicht wurde in der Vergangenheit häufig über eine Gewässerschadenshaftpflichtversicherung abgesichert. In den letzten Jahren ist jedoch aufgrund zahlreicher bekannt gewordener Schadensfälle mit z.T. horrenden Sanierungskosten die Versicherungswirtschaft kaum noch bereit, dieses Risiko zu übernehmen /19/.

Seit dem 01.01.1991 unterliegen Deponien, wie auch andere Anlagen zur Abfallentsorgung, dem Gesetz über die Umwelthaftung (UmweltHG) /5/. Dies bedeutet, daß für Umweltauswirkungen von Deponien, durch die ein Schaden an Personen oder Sachen entstanden ist, der Betreiber der Deponie bis zu einer Haftungshöchstgrenze von 320 Mio DM (Personenschaden + Sachschaden jeweils 160 Mio DM) Schadensersatz leisten muß. Diese Summe ist für derzeit übliche Deponien nicht versicherbar, so daß der Betreiber das Risiko selbst trägt /18,19/.

2. Gründe für die Kontrollierbarkeit von Deponieabdichtungssystemen

In Deutschland besteht derzeit nur bei Deponien für besonders überwachungsbedürftige Abfälle nach TA Abfall die gesetzliche Forderung nach einer kontrollierbaren Oberflächenabdichtung und nach kontrollierbar ausgeführten, horizontalen Rohrdurchführungen durch die Basisabdichtung. Da seit Inkrafttreten der TA Abfall nur wenige Anlagen abschließend genehmigt wurden, gibt es derzeit auch noch keine ausgeführten Referenzobjekte.

Die Neuanlage von Deponien stößt in Deutschland seit vielen Jahren auf große Schwierigkeiten. Als Beispiel sei das Bundesland Baden-Württemberg genannt, in dem nach Kenntnis der Autoren in den letzten 10 Jahren keine Neuanlage einer Siedlungsabfalldeponie mehr genehmigt wurde. Aufgrund der mangelnden Akzeptanz durch den Bürger sind neue Abfalldeponien derzeit kaum noch genehmigungsfähig. Durch kontrollierbare Abdichtungssysteme könnte die Akzeptanz und damit die Genehmigungsfähigkeit deutlich verbessert werden.

Wie in der Einleitung bereits angesprochen, verpflichtet das neue Umwelthaftungsgesetz den Betreiber von Deponien unabhängig vom Verschuldensprinzip (Gefährdungshaftung = Haftung auch bei „legalem“ Betrieb) für die von seiner Anlage (Deponie) verursachten Umweltbeeinträchtigungen zum Schadensersatz. Erstmals in der deutschen Rechtsprechung wird durch die Umkehr der Beweislast im Umwelthaftungsgesetz der Betreiber verpflichtet, bei

einer begründeten Ursachenvermutung nachzuweisen, daß seine Anlage nicht der Verursacher eines eingetretenen Umweltschadens ist /22/. Dieser Nachweis ist z.B. für Grundwasserschadensfälle durch ein kontrollierbares Abdichtungssystem möglich.

Kontrollierbare Abdichtungen müssen, um Schäden auf das äußerste Minimum zu begrenzen, in der Lage sein, Funktionsstörungen in den Abdecksystemen zu melden, bevor ein Umweltschaden eingetreten ist. Bei einer Leckagemeldung muß die Funktionsstörung mit vertretbarem Aufwand zu beheben sein. Ist sichergestellt, daß mögliche Schadensfälle frühzeitig erkannt und repariert werden, dürfte der Versicherbarkeit durch eine Umwelt-Haftpflichtversicherung nichts mehr im Wege stehen /18/.

Nach erfolgter Reparatur muß die Kontrollierbarkeit wieder gewährleistet sein. Das heißt, daß z.B. ein einfaches Verpressen einer Kontrolldrainage nicht in Frage kommt, da hierbei die Kontrollierbarkeit verloren geht.

In den USA wird die Versicherbarkeit von Deponien sowie die Höhe der Versicherungsprämien bereits heute schon entscheidend von der Qualität des Abdichtungssystems beeinflusst. Dies hat zur Folge, daß zahlreiche Deponien (insbesondere Sonderabfalldeponien) Mehrfachabdichtungssysteme und kontrollierbare Abdichtungssysteme besitzen.

Ein positiver Nebenaspekt für die Qualitätssicherung beim Bau des Abdichtungssystems ist die bessere Inanspruchnahme der Gewährleistung der bauausführenden Firma. Durch die Kontrollierbarkeit des Abdichtungssystems können Mängel in der Bauausführung entweder bei der Abnahme in Form einer Funktionsprüfung festgestellt werden bzw. treten innerhalb der Gewährleistungsfrist (bei Deponien 5 Jahre) auf und sind auf Kosten des Auftragnehmers zu beheben.

In Tabelle 1 sind die Gründe, die für kontrollierbare Abdichtungssysteme sprechen, kurz aufgelistet.

Tab. 2: Gründe für kontrollierbare, reparierbare Deponieabdichtungssysteme

- Ständige Überwachung der Abdichtung auf Unversehrtheit
- Ortsgenaue Lokalisierung einer Leckage
- Reparierbarkeit bevor ein Umweltschaden eintritt
- Erhöhte Akzeptanz und damit erhöhte Genehmigungsfähigkeit
- Vorteile bei Ursachenvermutungen gemäß UmweltHG (Auskunftspflicht des Anlageninhabers)
- Risikoverminderung bei der Anlagenhaftung gemäß UmweltHG
- Versicherbarkeit der Anlage
- Verbesserung der Gewährleistung bei der Bauausführung

3. Anforderungen an kontrollierbare Abdichtungen

Bei Abfalldeponien gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten für die Platzierung eines kontrollierbaren Abdichtungssystems. Die **Anforderungen** sind für jedes System unterschiedlich.

- Kontrollierbare Basisabdichtung
- Kontrollierbare Oberflächenabdichtung
- Kontrollierbare vertikale Abdichtung (Dichtwände)

Eine kontrollierbare Basisabdichtung soll als „primäres Abdichtungssystem“ den Austritt von Schadstoffen aus dem Abfallkörper (in der Regel in gelöster Form als Sickerwasser) ins Grundwasser verhindern. Sauberes Wasser hingegen darf das Abdichtungssystem passieren (z.B. nach Sorption der Schadstoffe in einer Sorptionsschicht).

Die Aufgabe einer Oberflächenabdichtung ist es hauptsächlich, den Eintritt von Niederschlagswasser und damit die Entstehung von Sickerwasser zu verhindern. Eine zweite Aufgabe bei Reaktordeponien ist die Verhinderung bzw. Minimierung des Austritts von Deponiegas, das bei Reaktordeponien hinsichtlich des Stoffflusses die stärkste Emissionsquelle darstellt.

Dichtwände haben meist die Aufgabe, den oberstromigen Zutritt von Grundwasser sowie den abstromigen Austritt von Sickerwasser zu verhindern. Sie werden in der Regel nur nachträglich zur Sanierung von Altdeponien und Altstandorten eingesetzt, nachdem ein Umweltschaden bereits eingetreten ist. Häufig sind hierbei zusätzliche hydraulische Maßnahmen notwendig, um einen hydraulischen Gradienten in das Deponieinnere zu erzeugen (Wasserhaltung). Für kontrollierbare Dichtkammersysteme gibt es bereits ausgeführte Beispiele /2/. Bei der Neuanlage von Deponien wird man durch die konstruktive Auslegung der Basisabdichtung im Normalfall auf Dichtwandssysteme verzichten.

In der TA Abfall /6/ wird der kontrollierbaren Oberflächenabdichtung vor einer kontrollierbaren Basisabdichtung den Vorzug gegeben. Hintergrund dürfte das häufig angeführte Argument sein, daß nur eine Oberflächenabdichtung für die Reparatur zugänglich sei, während bei der Basisabdichtung aufgrund der Überschüttung mit Abfall eine Reparatur praktisch ausgeschlossen sei.

Dieser Ansicht widersprechen inzwischen zahlreiche bereits ausgeführte Sanierungsmaßnahmen an der Basis des Müllkörpers, zumeist an defekten Drainagerohren oder Schachtbauwerken, bei denen bereits bis mehrere Zehnermeter Tiefe im Müllkörper gegraben wurde /8, 32, 34/. Grundvoraussetzung für die Reparatur einer kontrollierbaren Basisabdichtung ist deshalb die ortsgenaue Lokalisierung des Schadens, um mit einer gezielten Sanierungsmaßnahme (Schacht, Spundung) den Schaden reparieren zu können. Die Anzeige einer Leckage irgendwo innerhalb eines bestimmten Deponieabschnittes oder eines Segmentes kann deshalb allenfalls bei einer Oberflächenabdichtung ausreichend sein, bei einer Basisabdichtung wäre die Sanierung mit der Umlagerung von riesigen Mengen Abfall verbunden und damit praktisch nicht durchführbar.

Generell lassen sich folgende Anforderungen an kontrollierbare Abdichtungssysteme stellen (Tabelle 2).

Tab. 3: Anforderungen an ein kontrollierbares Abdichtungssystem /18/

- Hohe Zuverlässigkeit
- Langzeitbeständigkeit
- Hohe Sensivität (Nachweisempfindlichkeit)
- Flächenhafte Überwachung des Abdichtungssystems
- Gute Ortsgenauigkeit einer Leckage
- Optimale Integration in das Abdichtungssystem
- Reparierbarkeit, bevor Umweltschaden eintritt
- Funktionskontrolle muß möglich sein
- Möglichkeit des abschnittsweisen Einbaus
- Möglichst kontinuierliche, automatische Arbeitsweise
- Möglichst Trennung der Dichtungs- und der Kontrollfunktion
- Wirtschaftlichkeit

4. Grundsätzliche Möglichkeiten der Leckkontrolle

Grundsätzlich gibt es folgende Möglichkeiten zur **Leckkontrolle** von Deponieabdichtungssystemen:

- Grundwasserüberwachung durch Grundwassermeßstellen
- Begehbare Kontrollstollen, Tunnel-, Rohrsysteme
- Kontrollräume und Dränagesysteme
- Kontrollmöglichkeit mittels Sensoren

Zur Überwachung und zur Beweissicherung gehören heute Grundwasserkontrollpegel im näheren Umfeld der Deponie zur vorgeschriebenen Standardeinrichtung. Durch diese Einrichtungen ist eine Kontrolle der Wirksamkeit der Abdichtungsmaßnahme zum Grundwasserschutz in der Regel gegeben. Eine Leckage im Abdichtungssystem wird dabei jedoch erst nach der bereits eingetretenen Kontamination detektiert. Zudem können kleinere Leckagen je nach hydrogeologischen Standortverhältnissen und den punktförmig angeordneten Grundwassermeßstellen erst sehr spät oder gar nicht erkannt werden. Eine Leckageortung ist mittels üblichen Kontrollpegeln nicht möglich.

Für begehbare Kontrollstellen und Dränsysteme gibt es bereits einige ausgeführte Beispiele, die unter Punkt 5 aufgeführt sind. Für die Kontrolle von Abdichtungssystemen durch Sensoren gibt es bisher kaum Referenzen. So sollen z.B. Kontrollsonden (Chemosensoren) unterhalb der Basisabdichtung der Deponie Arbesthal (Niederösterreich) eingebaut worden sein /38/. Für die Deponie Erbenschwang (Lkr. Weilheim-Schongau) wurde zwischen zwei Dichtungsschichten eine Kontrolldrainschicht mit innenliegendem Breitbandsensorkabel angeordnet /13/. Die Leckkontrolle mittels Sensoren ist im Deponiebau ein relativ neuer, zukunftsorientierter Anwendungsbereich. Diesbezüglich laufen bereits verschiedene Forschungsvorhaben (BMFT-Verbundvorhaben „Deponieabdichtungssysteme“ /24/ bzw. „Methoden zur Erkundung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten“ /4/ sowie das bayerische FORREST-Verbundforschungsprogramm /38/).

4.1 Kontrollmöglichkeit mittels Sensoren

Die auf dem Markt anzutreffenden bzw. noch in der Entwicklung befindlichen Sensoren zur Leckagedetektion lassen sich aufgrund ihrer Funktionsweise in folgende Gruppen einteilen:

- Elektrische Sensoren (Halbleitersensoren, Veränderungen der Leitfähigkeit)
- Kapazitive Sensoren
- Temperatursensoren
- Diffusionsschlauch
- Chemosensoren (Spez. Sensoren für best. Atome, Moleküle, Ionen)
- TDR-Sonden (Wassergehaltsänderungen)
- Saugkerzen zur Erfassung des Kapillarwassers
- Tensiometer (Erfassung von Saugspannungen)
- Faseroptische Sensoren (PAK's und andere Schadstoffe)
- Lasersonden (PAK's, HKW und Schwermetalle)

Wie groß das Angebot von Leckageortungssystemen auf dem Markt bereits ist, soll die unter Punkt 4.2 zusammengestellte Marktübersicht verdeutlichen (Stand März 1994, ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

4.2 Marktübersicht

Nachfolgend sind **Leckageortungssysteme** aufgeführt, die nicht nur für den Bereich Depo-nietechnik, sondern auch für die Überwachung von Behältern, Rohrleitungen etc. entwickelt wurden /18/.

1. AFRISO EURO-INDEX
Leckanzeigergeräte
2. BILFINGER & BERGER
CONTREP-Abdichtungssystem
3. CONTROLOTRON CORPORATION
990LD Pipeline Leak Detection System
4. EICHELBERG
Sicherheitsdoppelrohre
5. FRANK DEPONIETECHNIK
Kontrollierbare Dreischichtenbahn mit elektr. leitfähiger Zwischenschicht, kontrollierbare Rohrdurchdringung
6. GFA Gesellschaft für Flächen-Abdichtung GmbH
Doppel-Abdichtungssystem
7. HAGENUK
LeaCom
8. JOLA
Leckagedetektoren
9. Ke Rohrsysteme und Umwelttechnik
Flexwell Sicherheitsrohr
10. Mütec GmbH
LIST (Linear Sensing of Temperature)

- 11.OMNIPLAST
Kontrollierbare Mehrschichtenabdichtung
- 12.Pressure Point Concept. Ed Farmer Asscosiates, Inc.
Leckagedetektions- und Ortungssystem für Pipelines
- 13.Proterra Umwelttechnik
Terracontrol
- 14.QUINTING
System FRESCO
- 15.RAYCEM
Trace Tek
- 16.SARNA Kunststoff AG
Kontrollierbare Mehrschichtenabdichtung, System Sarna
- 17.SCHOMBURG
Kontrollsysteme für den Gewässerschutz
- 18.SGB
Unterdruck-Leckanzeige
- 19.SIEMENS-KWU
LEOS - Leckage Erkennungs- und Ortungssystem/“KRAU“
- 20.SIMONA
Doppelrohrsysteme
- 21.W.L. GORE & ASSOCIATES GmbH
LEAKLEARN
- 22.Wrede & Niedecken
ConseC Leckmelde- und Ortungssystem
- 23.ZÜBLIN
„System ZÜBLIN“
- 24.PROGEO (Vertrieb: Naue Fasertechnik)
Geologger
- 25.STEUBER INDUSTRIEWERKE GmbH
Bekaplast - DoppelWandSystem

Von den vorgenannten Systemen wurden bisher erst die Systeme Contrep (Deponie Flotzgrün), LEOS (Testfeld Fa. Siemens, Testfeld SAD Schwabach in Planung), GORE leaklearn (Deponie Erbenschwang), SARNA (Deponien in Südtirol und Deponie Karsau) und Geologger in Deponien bzw. Testfeldern eingesetzt. Speziell für Deponien entwickelt sind nur die Systeme:

BILFINGER & BERGER/BASF
Contrep - Abdichtungssystem

FRANK DEPONIETECHNIK
Kontrollierbare Dreischichtenbahn mit elektr. leitfähiger Zwischenschicht, kontrollierbare Rohrdurchdringung

GFA GESELLSCHAFT FÜR FLÄCHEN-ABDICHTUNG GmbH
Doppel-Abdichtungssystem

SARNA KUNSTSTOFF AG

Kontrollierbare Mehrschichtenabdichtung, System Sarna

SIEMENS - KWU

LEOS - Leckage Erkennungs- und Ortungssystem/“KRAU“

ZÜBLIN

„System Züblin“

PROGEO (Vertrieb: Naue Fasertechnik)

Geologger

Diese Systeme sollen daher nachfolgend noch etwas detaillierter beschrieben werden.

4.3 Kontrollierbare Deponieabdichtungssysteme verschiedener Firmen

In den Jahren 1992/93 wurde eine Marktübersicht über speziell für Deponien angebotene Verfahren angefertigt /8/. Untenstehend sind die ermittelten Verfahren für die Bereiche Deponien und Altlasten (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) aufgeführt. Die Liste wurde 1993/94 erweitert.

Kontrollierbare (und teilweise reparierbare) Abdichtungen in diesem Bereich werden folgende angeboten:

Kontrollierbare Mehrschichtenabdichtung, System Sarna

| | |
|-------------------|---|
| Kurzbeschreibung: | Zweischichtiges Abdichtungssystem mit zwischenliegender Drainageschicht. Kontrollierbar durch Permanentvakuum in der Drainageschicht. Auch Kontrolle auf Wasser. Für Basis- und Oberflächenabdichtung. |
| System: | Um einen für die Leckagekontrolle notwendigen Drainageraum zwischen den beiden PE-HD-Dichtungsbahnen herzustellen, wird ein PE-HD-Gitternetz zwischengelegt. Die Drainageschicht ist an einen Kontrollraum angeschlossen und kann von diesem aus mittels Permanentvakuum dauernd überprüft werden. Um den Bereich eines eingetretenen Lecks eingrenzen zu können, wird die Abdichtung in einzelne Kammern aufgeteilt. Reparierbar ist die Abdichtung, indem man den Drainageraum, der vom Leck betroffenen Kammer, mit einem gelierfähigen Harz verpreßt. Die Kammer ist dann nicht mehr kontrollierbar. |
| Referenzen: | Deponie Tisnauer Auen, Meran. Deponie Ischia-Frizzi-Au, Bozen. Deponie Karsau, Rheinfelden. |

Basisabdichtungen für Deponien, System Bilfinger und Berger / BASF

- Kurzbeschreibung:** Deponieabdichtung besteht aus zwei Kunststoffdichtungsbahnen, mit 40 cm Abstand verlegt, der Zwischenraum ist mit Drainagekies gefüllt. Kontrollierbar durch Vakuum und durch Sickerwasseraustritt im Kontrollschacht. Nur für Basisabdichtung.
- System:** Die von Bilfinger und Berger / BASF entwickelte Deponieabdichtung besteht aus zwei Kunststoffabdichtungsbahnen, die in einem Abstand von 40 cm verlegt werden, der Zwischenraum wird mit Drainagekies gefüllt. In diesem Dichtungspaket sind außerdem Injektions-, Entlüftungs- und Kontrollrohre verlegt. Die Deponieabdichtung wird in untereinander getrennte, 50 x 50 m² große Felder unterteilt. In einem regelmäßigen Raster sind Kontrollschächte über die Deponiefläche verteilt. Injektions-, Entlüftungs- und Kontrollrohre von jeweils 4 Feldern sind an einen Schacht angeschlossen.
- Um Undichtigkeiten, die durch Herstellungsfehler oder Beschädigung während der Bauzeit entstanden sein können, auszuschließen, wird vor Inbetriebnahme der Deponie jedes einzelne Drainagefeld mit Vakuum geprüft. Lecks, die während oder nach dem Deponiebetrieb auftreten, kann man am Sickerwasser, das aus dem Drainagefeld in den Kontrollschacht fließt, erkennen. Wird in einem Feld ein Leck gefunden, so kann dies durch injizieren des entsprechenden Leckagefeldes über das Injektionsrohr abgedichtet werden. Eine Leckagekontrolle des injizierten Feldes ist nicht mehr möglich.
- Referenzen** BASF Industriemülldeponie Flotzgrün.

Kontrollierbare Dreischichtenbahn aus PE-HD von Frank Deponie Technik GmbH

- Kurzbeschreibung:** 3-schichtige Basisabdichtung aus PE-HD mit elektrisch leitfähiger Zwischenschicht. Für Basis- und Oberflächenabdichtungen.
- System:** Die kontrollierbare Basisabdichtung aus PE-HD besteht aus drei Schichten, wobei die beiden äußeren PE-HD-Schichten die elektrisch leitfähige Zwischenschicht einschließen. Über Widerstandsmessungen werden Beschädigungen der oberen und der unteren Schicht angezeigt. Mittels dieser Messungen kann der Ort einer Leckage mit einer Genauigkeit von 10-15 % eingemessen werden. Es können glatte und strukturierte Dichtungsbahnen sowie eine Betonschutzplatte ab 2,5 mm Stärke geliefert werden. Außerdem bietet Frank Deponie Technik ein PE-HD-Schloßprofil an, mit dem Dichtungsbahnen in einer Schlitzwand flüssigkeitsdicht verbunden werden können.
- Referenzen:** keine

Basisabdichtung für Deponien, „System Züblin“

- Kurzbeschreibung:** Deponieabdichtung, durch integrierte Drainageschicht kontrollier- und reparierbar. Für Basisabdichtungen entworfen.
- System:** Die Basisabdichtung besteht im wesentlichen aus einer mindestens 60 cm dicken Tonschicht. In dieser Tonschicht ist flächig ein 5-schichtiges Dichtungspaket, bestehend aus 3 PE-HD-Sperrschichten und zwischenliegend 2 Drainagegitterschichten eingebaut. Die Drainagegitter müssen so stabil ausgeführt sein, daß sie auch unter voller Deponielast eine einwandfreie Drainage gewährleisten. Unter der Deponieabdichtung befinden sich in regelmäßigen Abständen Kontrollstollen, zu denen die mit Gefälle verlegte Abdichtung ihre Drainschicht entwässern. Wird nun die obere PE-HD-Schicht von Deponieflüssigkeiten durchdrungen, so kann man dies am in den Kontrollschacht eintretenden Sickerwasser erkennen. Die Abdichtung des betroffenen Bereichs erfolgt dann durch Injektion der oberen Drainageschicht. Die Kontrollfunktion der nun dafür unbrauchbar gewordenen oberen Drainageschicht wird von der unteren Drainageschicht übernommen.
- Referenzen:** keine

Kontrollierbares Abdichtungssystem der Firma GFA, System LEOS, Siemens KWU

- Kurzbeschreibung:** Leckageerkennungs- und -ortungssystem für Oberflächenabdichtungen von Deponien, durch das von oben eintretendes Wasser festgestellt und von unten einströmende Gase detektiert und geortet werden können.
- System:** Das kontrollierbare Doppeldichtungssystem von Siemens / IGB / Voest Umwelttechnik, besteht aus zwei PE-HD-Bahnen mit dazwischen angeordnetem Kontrollraum. Der Kontrollraum, der zur besseren Ortung von Leckagen in Sektoren eingeteilt ist, setzt sich aus einer Drainageschicht und dem mäanderförmig verlegten LEOS-Schlauch zusammen. Jeweils am Tiefpunkt eines Sektors ist eine Detektoreinrichtung für eindringendes Oberflächenwasser installiert. Der luftgefüllte LEOS-Schlauch ist wasser- und luftundurchlässig. Durchlässig ist er jedoch für verschiedene, in einer Deponie auftretende Schadgase bzw. diffusiv eintretende Stoffe. Tritt nun ein Leck in der unteren PE-HD- Bahn auf, so diffundiert ein Teil des austretenden Gases in das Schlauchinnere und ergibt dort ein getreues Abbild der Schadstoffkonzentration an dieser Stelle des Deponiekörpers. In regelmäßigen Zeitabständen wird die im Schlauch enthaltene Luft einer Detektoreinheit, die für verschiedene Schadstoffe gecheckt werden kann, vorbeigepumpt. Bei Überschreitung der eingestellten Grenzwerte wird Alarm ausgelöst. Der Zeitpunkt des Alarms und die Höhe des Detektorsignals geben Aufschluß über den Ort und die Größe des Lecks.

Referenzen: Testfeld SAD-Schwabach in Planung (Ausführung voraussichtlich ab Juni 1994), Testfeld auf dem Gelände der Siemens AG, Erlangen.
LEOS wird seit 1978 in der Pipelineüberwachung eingesetzt (ausreichende Referenzen).

Kontrollierbares Dichtungssystem „KRAU“, Siemens KWU

Kurzbeschreibung: Ähnlich wie System LEOS, jedoch speziell auf Deponien angepaßt. Für Basis- und Oberflächen- sowie vertikale Abdichtungssysteme.
System: Ähnlich LEOS. Speziell auf Deponien angepaßt.
Referenzen: keine

Kontrollierbares Abdichtungssystem GEOLOGGER oder Fa. PROGEO

Kurzbeschreibung: Vollständige Überwachung der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) in Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen mittels Kontrolle des Isolationswiderstandes der KDB.
System: Ober- und unterhalb der KDB werden in bestimmten Abständen Elektroden (Kohlefaser-Stränge) eingebracht, die an eine Busleitung angeschlossen werden. Gemessen wird quasi der Widerstand der KDB, der sich bei einer Leckage in der KDB verringert. Leckortung über „Kreuzmessungen“.
Referenzen: keine

5. Bereits ausgeführte Beispiele von Deponien mit kontrollierbaren Abdichtungssystemen

Die Kontrolle der Funktionsfähigkeit von Abdichtungssystemen bei Deponien und Altlastenabkapselungen wird derzeit nur an wenigen Standorten durchgeführt. Beispielhaft seien die bekanntesten bzw. in der Literatur zitierten Anlagen mit kontrollierbaren Abdichtungssystemen aufgeführt. (Nicht aufgeführt sind reine Testfelder):

- Deponie Wirmsthal, Lkr. Bad Kissingen
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschacht zwischen zwei mineralischen Abdichtungen) /13, 42/
- Deponie Erbenschwang
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschacht zw. 2 mineralischen Abdichtungen sowie Sensorkabel) /13, 42/
- Deponie Karsau, Rheinfeldern
Kontrollierbare Oberflächenabdichtung
(Drainschicht zwischen zwei PE-Dichtungsbahnen)
- Deponie Walddorf, Lkr. Calw
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen Asphaltichtung und mineralischer Abdichtung) /ICP/

- Deponie Flotzgrün, BASF
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainkissen zwischen zwei Dichtungsbahnen, Contrep-System) /29/
- Deponie Kriftel, Fa. Hoechst AG, Hessen
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen Asphaltbeton und mineralischer Abdichtung) /36/
- Kreismülldeponie Heuchelheim-Klingen, Lkr. SüW, Rhl.-Pf.
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Kontrolldrainage unter der Basisabdichtung) /ICP/
- Sonderabfalldeponie Rodeshagen
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Kontrolldrainage unter der Basisabdichtung) /16/
- Deponie Haderbühl, US-Streitkräfte Grafenwöhr
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen mineralischer Abdichtung und Bentonitmatte/KDB) /15/
- Sonderabfalldeponie Kettleman Hills, Kalifornien
Kontrollierbare Basisabdichtung
(doppelte Kombinationsdichtung mit Kontrolldrainage und insgesamt drei Kunststoffdichtungsbahnen) /21/
- Deponie Marathon County, Wisconsin
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Kontrolllysimeter im Gefälletiefpunkt unter der Basisabdichtung) /38/
- Deponie Arbesthal, Niederösterreich
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Chemosensoren unterhalb der Basisabdichtung u. im Grundwasserabstrombereich)
/38/
- Deponie Sidec bei Diekirch, Luxemburg
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Kontrolldrainage aus PE-HD-Gitter zwischen zwei Kunststoffdichtungsbahnen) /38/
- Deponie Tisnauer Auen, Bezirk Meran
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen zwei Kunststoffdichtungsbahnen) /38/
- Deponie Ospitaletto, Brescia
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen KDB und mineralischer Dichtung) /38/
- Deponie Ischia-Frizzi-Au, Bezirk Bozen
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen zwei Kunststoffdichtungsbahnen) /38/
- Deponie Fa. Wimpy, Chadderton, Manchester
Kontrollierbare Basisabdichtung
(Drainschicht zwischen zwei Kombinationsdichtungen) /38/
- Deponie Rautenweg, Stadt Wien
Kontrollierbare vertikale Abdichtung
(Dichtwand - Kammersystem) /2/

Nur bei zwei der o.g. Deponien wurden Sensoren verwendet (Deponie Erbenschwang: Gore Leaklearn und Deponie Arbesthal: Chemosensoren), wobei jedoch die Ortung nur ungenau erfolgen kann (Deponie Erbenschwang) bzw. erst erfolgen kann, wenn der Umweltschaden eingetreten ist (Deponie Arbesthal). Nur eine Deponie ist an der Oberfläche kontrollierbar ausgeführt (Deponie Karsau). Insgesamt sind die bereits ausgeführten Abdichtungen zwar alle mehr oder weniger gut geeignet eine Leckage anzuzeigen, eine Leckortung kann jedoch nur grob aufgrund der Bildung einzelner Drainkammern etc. vorgenommen werden. Eine echte Reparierbarkeit der Basisabdichtungssysteme besteht somit nicht. (Eine Reparatur soll die **volle** Funktionsfähigkeit einer Dichtung wieder herstellen, bei einfachem Verpressen von Kontrolldrainagen ist dies nicht der Fall.)

6. Spezielle Problempunkte bei kontrollierbaren Oberflächenabdichtungssystemen

Bei Oberflächenabdichtungssystemen ist zunächst zu unterscheiden, ob es sich um bestehende Deponien handelt bei denen wichtige Randbedingungen (Platzverhältnisse, Böschungsneigungen etc.) bereits weitgehend vorgegeben sind, oder ob es sich um Neuplanungen handelt, bei denen die Randbedingungen (Geometrie etc.) noch auf die gewählte Oberflächenabdichtung abgestimmt werden kann. Bei der Auswahl eines kontrollierbaren Oberflächenabdichtungssystems sind nicht nur die in Kapitel 3 genannten Kriterien von Bedeutung sondern auch folgende Aspekte zu beachten.

Tab. 4: Kriterien zur Bewertung kontrollierbarer Oberflächenabdichtungen

- Platzbedarf im Randbereich
- Bauhöhe des Systems
- Standsicherheit des Systems (Gleitsicherheit)
- Einbindung in das Gesamtkonzept
- Möglichkeiten der Rekultivierung (Wurzelsperre)
- Angriff aggressiver Medien (Sickerwasser, Kondensat, Gase etc.) von unten
- Kontrolle primär auf Dichtigkeit gegenüber Wasser

Der Platzbedarf am Rande einer Deponie ist vor allem bei bereits bestehenden Deponien von Bedeutung, wo oft zu geringe Platzreserven für aufwendige Abdichtungssysteme vorgesehen werden. Bei Böschungsneigungen von 1:3 (= 18,4°), die für Abdichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen eine gewisse Grenzneigung darstellen, wird für die Regelabdichtung gemäß TA Abfall (Systemhöhe $\geq 2,3$ m) ohne Aufsteilung eine Fläche bis ca. 7,5 m vom eigentlichen Deponierand eingenommen. Siehe hierzu Abbildung 1.

Die Bauhöhe des Systems ist ebenfalls von Bedeutung, da in der Regel Endhöhen für Deponien (einschließlich Oberflächenabdichtungssystem) im Planfeststellungsbescheid festgeschrieben sind, so daß ein sehr mächtiges Abdichtungssystem unnötig Volumen kostet. Als Beispiel soll hier die geplante Oberflächenabdichtung der Deponie des Zweckverbandes Bielefeld-Herford dienen (Abb.2), die mehr als 3,5 m stark ist.

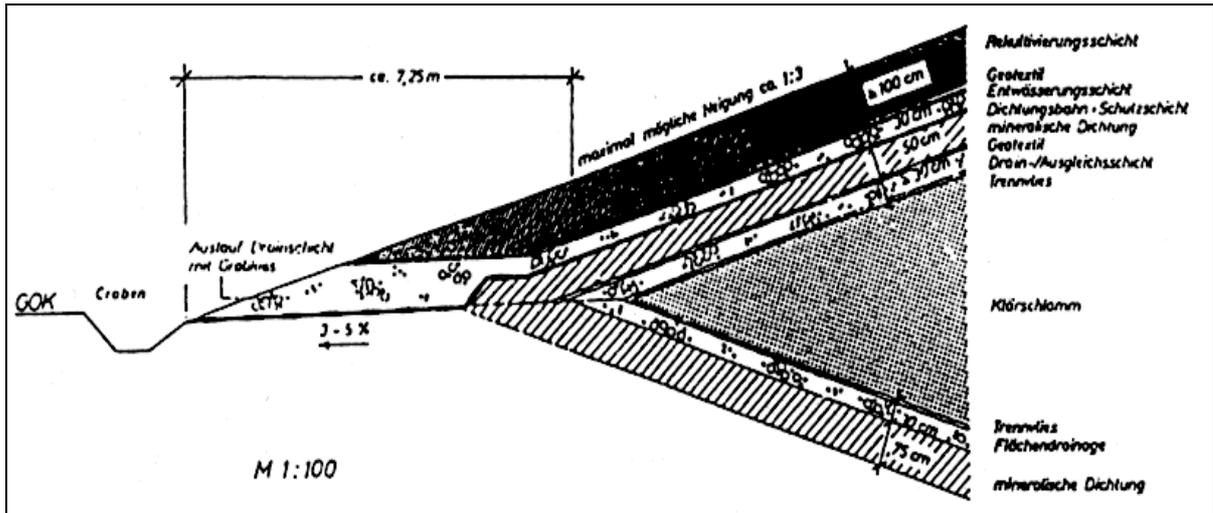


Abb. 3: Platzbedarf der Regelabdichtung am Rande einer Deponie /10/

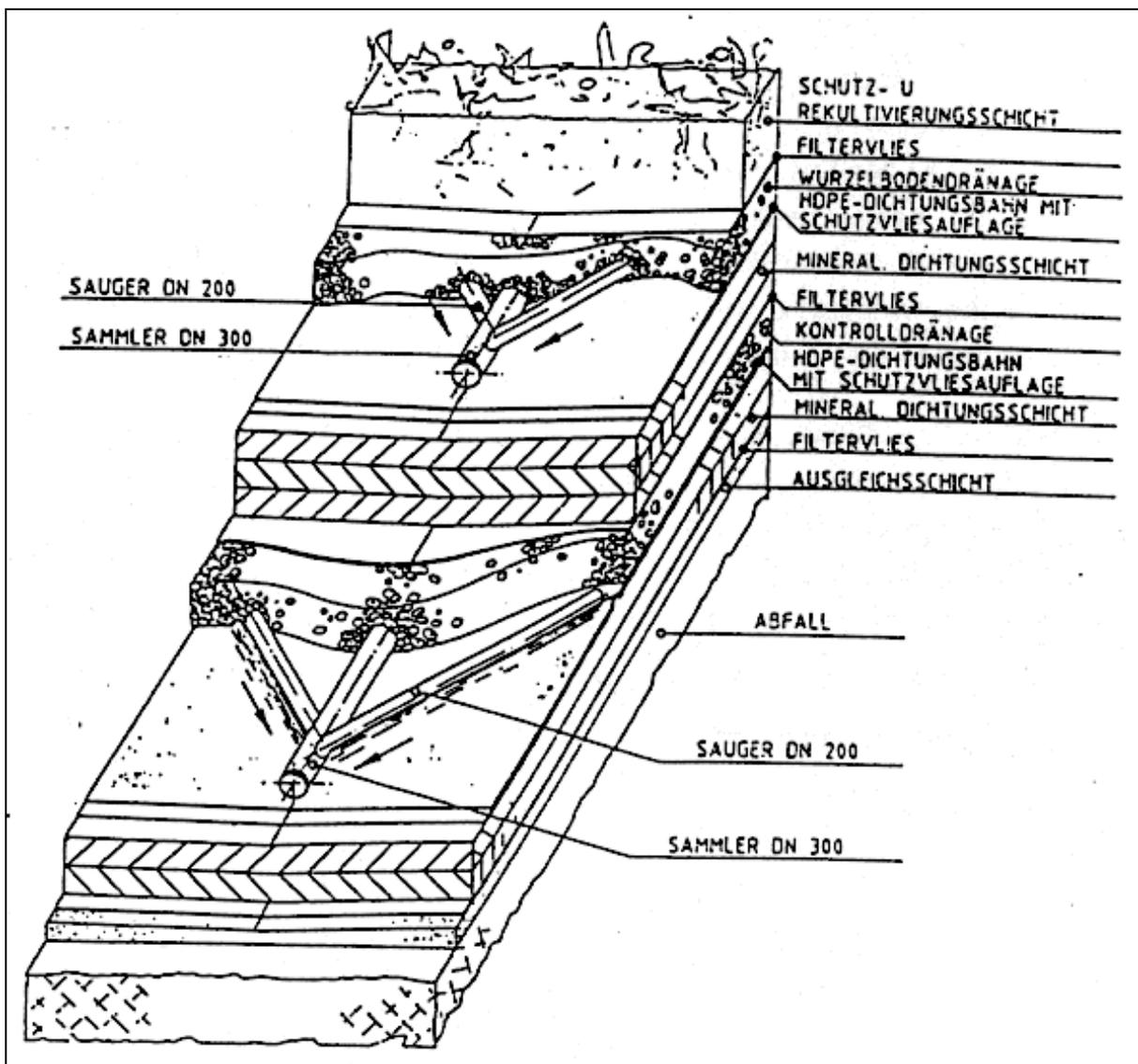


Abb. 4: Geplantes Oberflächenabdichtungssystem der Verbunddeponie Bielefeld-Herford /33/

Die Standsicherheit des Oberflächenabdichtungssystems ist ebenfalls nur für das Deponievolumen von großer Bedeutung, da steile Deponieflanken eine gute Nutzung der Deponiefläche bedeuten (allerdings spielen hier auch andere Kriterien, z.B. Eingliederung in die Landschaft etc., eine Rolle). Falls die Neigung nicht zu wählen ist (bei bereits vorhandenen genehmigten Deponien) ist das System entsprechend zu wählen. Das vielleicht einfachste kontrollierbare Oberflächenabdichtungssystem mit zwei Kunststoffdichtungsbahnen (KDB's) und zwischenliegender Dränschicht (z.B. Systeme SARNA oder GFA, siehe Kapitel 4) ist aufgrund der zahlreichen relativ glatten Fugen und der schlechten Kräfteübertragung von KDB zu KDB voraussichtlich nur bei relativ flachen Neigungen anzuwenden bzw. erfordert einen hohen zusätzlichen Aufwand, um die Standsicherheit zu gewährleisten.

Sollten bereits kontrollierbare Abdichtungssysteme auf einer Anlage vertreten sein (Basisabdichtung, Sickerwasserspeicherbecken etc.), ist darauf zu achten, daß das Oberflächenabdichtungssystem zu dem dort verwendeten System paßt, um unnötige Kosten zu sparen.

7. Kosten der Abdichtungssysteme

Da bisher nur wenige kontrollierbare Abdichtungssysteme gebaut und die neu entwickelten Systeme (Geologger, Dreischichtenbahn der Fa. Frank Deponietechnik, LEOS-„KRAU“) bisher noch nicht in großtechnischem Maßstab verwirklicht wurden, sind die **Kosten** für solche Systeme derzeit noch schwer zu fassen. Für Oberflächenabdichtungen ist anzustreben, daß die Kosten unter denen für zwischichtige Systeme (SARNA, GFA) liegen. Für das System „KRAU“ wurde von ICP 1992 eine realistische und auf der konservativen Seite liegende Kostenrechnung durchgeführt. Diese soll als Beispiel für die Kosten eines kontrollierbaren Abdichtungssystems nachfolgend durchgeführt werden.

Um eine exakte Kostenrechnung für das System „KRAU“ durchführen zu können, wurde eine Modelldeponie geplant. Bei der Festlegung der Lage des LEOS-Sensorschlauches wurde darauf geachtet, daß keine zu großen Schlauchlängen entstehen, daß zwischen den Sensorschläuchen der Abstand nicht größer als 5 m wurde, und daß in den Problemzonen (Rohrauflager, Durchtrittspunkte) eine direkte Überwachung gegeben ist /8/.

Die Modelldeponie hat eine relative Grundfläche von 8,58 ha und wurde in fünf Abschnitte unterteilt. Obwohl es sich um eine relativ kleine Deponie handelt, sind die Abmessungen insgesamt so gewählt, daß realistische Grundlagen für die Kostenberechnung entstehen.

Abhängig von den zu detektierenden Stoffen und deren Transportverhalten in der Dichtung ist die „Maschenweite“, also der Abstand zwischen den LEOS-Sensorschläuchen, zu wählen. Für die Modelldeponie wurde zunächst ein als ausreichend anzusehender Abstand von 5 m gewählt (Fall „a“, siehe hierzu Abb.3).

Um die Ortungsgenauigkeit zu steigern, kann eine Maschenweite von 3 m sinnvoll werden. Die zu verlegenden Schlauchlängen wurden in einem Fall „b“ auf dieselbe Weise ermittelt. Denkbar ist auch, nur die Problemzone einer Deponie zu überwachen. Hierbei könnten die Schlauchlängen und somit die Kosten wesentlich reduziert werden.

Die Flächen der Deponieabschnitte I und II sowie die hierfür benötigten Schlauchlängen gibt die folgende tabellarische Übersicht wieder.

| Abschnitt Nr. | Fläche [m ²] | Schlauchlänge [m] | spez. Fläche [m/m ²] | spez. Länge m/m ²] |
|---------------|--------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Fall „a“ | | | | |
| Abschnitt I | 11.745 | 1.875 | 6,3 | 0,16 |
| Abschnitt II | 15.708 | 3.015 | 5,2 | 0,19 |
| Fall „b“ | | | | |
| Abschnitt I | 11.745 | 2.800 | 4,2 | 0,23 |
| Abschnitt II | 15.708 | 4.210 | 3,7 | 0,27 |

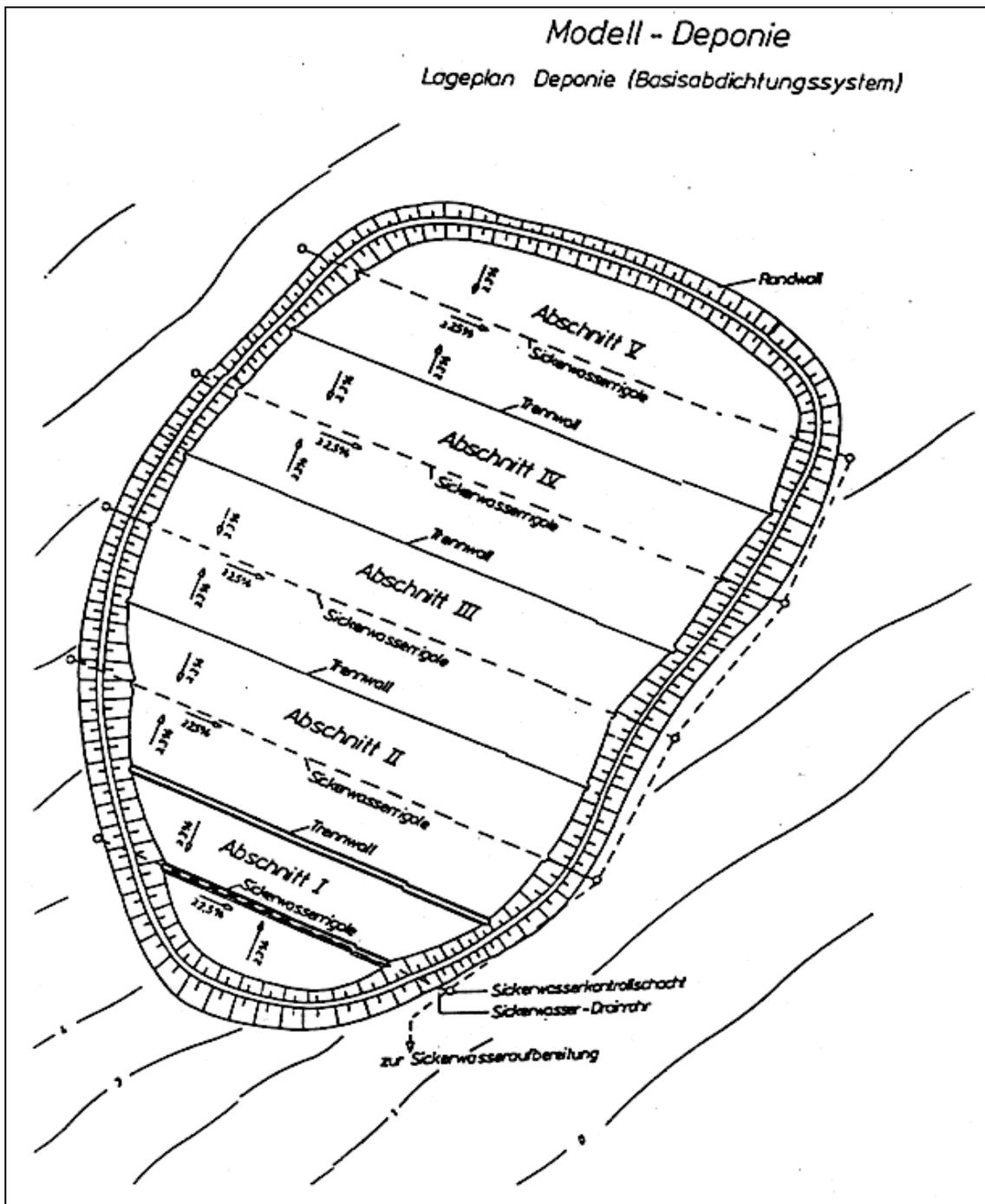


Abb. 5: Modelldeponie mit „KRAU“-Abdichtungssystem

Übertragen auf die Gesamtdeponie ergeben sich somit folgende Daten:

| | Fall „a“ Abstand 5m | Fall „b“ Abstand 5m |
|--------------------|-----------------------|---------------------|
| Deponiefläche | 85.800 m ² | 85.800 |
| Ges. Schlauchlänge | 17.160 m | 24.024 |
| Anschlußstellen | 10 Stück | 10 Stück |

Somit können die Kosten für den Sensorschlauch, dessen Verlegung die Anschlußstellen und sonstige Einrichtungen ermittelt und auf die relativ kleine und somit relativ kostenintensive Fläche der Modelldeponie übertragen werden. Für die Oberflächenabdeckung lassen sich diese Kosten entsprechend übernehmen.

Die Kosten für eine kontrollierbare Basisabdichtung System „KRAU“ liegen bei ca. 35.- DM/m² für Fall „a“ und 45.- DM/m² für Fall „b“. Ist eine Meßwarte bereits vorhanden, entfallen die Kosten für diese. Die Kosten sind netto (ohne Umsatzsteuer) gerechnet. Sie verstehen sich als Zusatzkosten zur Basisabdichtung. Die Kosten für eine Oberflächenabdichtung System „KRAU“ sind in der gleichen Größenordnung anzunehmen.

Auf die detaillierte Kostenaufstellung (Kosten absolut) wurde im Rahmen dieses Vortrages verzichtet. Sie kann dem Bericht „Kontrollierbare und reparierbare Abdichtungen im Umweltbereich“ /8/ entnommen werden.

8. Zusammenfassung

Kontrollierbare und reparierbare Abdichtungen für Deponien werden in Zukunft häufiger eingesetzt werden als bisher. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben nach TA Abfall /6/ müssen Sonderabfalldeponien mit kontrollierbaren Oberflächenabdichtungssystemen ausgerüstet werden. Das neue Umwelthaftungsgesetz und die sich daraus ergebenden Konsequenzen (Umwelt-Haftpflichtversicherung, Versicherbarkeit) sowie eine höhere Akzeptanz und damit erhöhte Genehmigungsfähigkeit von Deponien mit kontrollierbarer Abdichtung werden dazu führen, daß auch Siedlungsabfalldeponien mit kontrollierbaren Abdichtungssystemen ausgestattet werden. Sinnvoll sind solche Systeme jedoch nur, wenn sie eine Leckage vor Eintritt eines Umweltschadens melden und genug Zeit zur Reparatur des Schadens verbleibt.

Bei der Auswahl eines kontrollierbaren Abdichtungssystems ist vorab festzulegen, welche Anforderungen im speziellen Einzelfall gestellt werden (z.B. Genauigkeit der Lokalisierung etc.). Die in Frage kommenden auf dem Markt befindlichen Systeme sind hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zu untersuchen (z.B. bei Oberflächenabdichtungssystemen: Standsicherheit). Nachdem diese Vorauswahl getroffen wurde, muß für die tauglichen Systeme eine Kostenbetrachtung angestellt werden. Als Alternative hierzu ist ein freier Wettbewerb unterschiedlicher Systeme anzusehen (Ausschreibung eines Ideenwettbewerbs). Allerdings ist hier sehr sorgfältig zu bewerten, ob die zugesagten Eigenschaften der angebotenen Systeme auch in der Praxis einzuhalten sind.

Die folgende Auflistung gibt eine Literaturübersicht über das Thema. Im Vortrag wurden nicht alle Quellen verwendet.

- /1/ Bachtanian, S. & Trefzger, A. (1993): Entwicklung der Industriemülldeponie Karsau zu einer Deponie mit hohen Sicherheitsstandards. In: Zeitgemäße Deponietechnik VI, Vertieferseminar der Universität Stuttgart, 09./10.03.1993.
- /2/ Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft: Deponie Rautenweg, Wien. Firmenprospekt.
- /3/ Bindlingmaier, W., Müsken, J., Lindner, G. & Scheuing, K. (1991): Untersuchungen einer Deponieoberflächenabdichtung aus zweilagiger HDPE-Folie. Projekt Wasser-Abfall-Boden. Förderkennzeichen PD 88069
- /4/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1991): Berichte der Forschungsteilnehmer des Verbundvorhabens „Methoden zur Erkennung und Beschreibung des Untergrundes von Deponien und Altlasten“. 1. Statusseminar Nov. 1991, 507 S., Hannover.
- /5/ Bundesgesetzblatt (1990): Gesetz über die Umwelthaftung vom 10.12.1990 UmweltHG, Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1990, Teil I, S. 2634-2643.
- /6/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1991): Gesamtfassung der Zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil I vom 12.03.1991, GMBI 1991, Nr. 8.
- /7/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), Kabinettsbeschluss vom 21.04.1993.
- /8/ Burkhardt, G. & Egloffstein, Th. (1993): Entwicklung von kontrollierbaren und reparierbaren Abdichtungen im Umweltbereich, „Krau“ - Teil Deponietechnik (unveröffentlicht).
- /9/ Burkhardt, G. & Theurer, H. (1990): Sanierung des Drainagesystems der Hausmülldeponie Sinsheim, Rhein-Neckar-Kreis. In: Müll und Abfall 1/90, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1990.
- /10/ Burkhardt, G. (1994): Gleichwertigkeit von Abdichtungssystemen - Gleichwertigkeit? -, Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK), Band 30, Eigenverlag AGK
- /11/ Camann, K., Dette, R., Nagel, W. & Sander, J. (1991): Grundwasser mit Chemosensoren überwachen. UMWELT Bd. 21 (1991) Nr. 6-Juni.
- /12/ Dany, H. (1989): Sanierung von Deponieschächten an der Deponie Mechernich. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Band 35: Zeitgemäße Deponietechnik III. Erich Schmidt Verlag.
- /13/ Defregger, F. (1993): Die Bedeutung der Deponie im bayrischen Abfallwirtschaftskonzept. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern Heft 67: Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien. 9. Nürnberger Deponieseminar 1993.
- /14/ Daniel, D. E. & Koerner, R. M. (1991): Landfill Liners from Top to Bottom. Civil Engineering December 1991.
- /15/ Dünne, O. (1992): US-Deponie Grafenwöhr. Süddeutsches Kunststoffzentrum. 8. Fachtagung „Die sichere Deponie“: Wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen. Würzburg.
- /16/ Dykerhoff & Widmann AG: Sonderabfalldeponie Rondeshagen. Firmenprospekt.
- /17/ Ernst, H. (1988): Vermeidung von Sickerwasser durch großflächige Überdachung. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Deponie, Ablagerung von Abfällen 3. EF-Verlag, Berlin.

- /18/ Egloffstein, Th. und Burkhardt, G.: Kontrollierbare Abdichtungen für Deponien, VDI- Seminar Nr. BW: 43-14-01, München, 15./16.06.93
- /19/ Egloffstein, Th. und Burkhardt, G.: Funktionssicherheit, Versagensrisiko und Versicherbarkeit von Deponien, Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe (AGK), Band 30, Eigenverlag, 1994.
- /20/ Ganse, J. (1993): Komplexe Risikoabschätzung für Deponien. Ablagerung von Siedlungsabfällen. Seminar 08, UTECH Berlin 1993.
- /21/ Gartung, E. (1992): Anwendungsgrenzen der Kombinationsdichtung im Deponiebau. 8. Nürnberger Deponieseminar. Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien. LGA Nürnberg.
- /22/ Gasser, V. (1993): Umwelthaftungsrecht und Konsequenzen für den Deponiebetrieb. Ablagerungen von Siedlungsabfällen. Seminar 08, UTECH Berlin 1993.
- /23/ Gordon, M. E., Huebner, P. M. & Mitchel, G. R. (1990): Regulation, Construction and Performance of Clay-lined Landfills in Wisconsin. In: Annual Civil Engineering Convention and Explotion. American Society of Civil Engineers, San Francisco.
- /24/ Hahn, H. & Rödel, A. (1993): Entwicklung eines Verfahrens für die Dichtigkeitsüberwachung und Leckortung an Deponieabdichtungen. BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme. 2. Arbeitstagung 17. - 19. März 1993. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin.
- /25/ Heil, H. & Günther, K. (1991): Leckdetektion an Deponieoberflächenabdeckungen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 47. Fortschritte der Deponietechnik 1991. Erich Schmidt Verlag.
- /26/ Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (Hrsg.): Hochsicherheitsdeponie-Konzepte, Entwicklung und Planung eines Modellvorhabens für eine Hochsicherheitsdeponie als Sonderabfallager. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 38, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1992.
- /27/ Issel, W. J. (1987): Überwachungssystem für schleichende Leckagen. 3R international. 25 Jg., Heft 4, April 1986.
- /28/ Jax, P., Marko, R. (1993): Leckerkennung auf Deponien und Industrieflächen. wlb Wasser, Luft und Boden. Zeitschrift für die Umwelttechnik, Heft 6, Juni 1993.
- /29/ Kochendorfer, G. & Pirzer, W. (1990): Die BASF- Deponie Flozgrün. Sonderdruck aus Müll-Handbuch. 2. Lieferung 1990. Erich Schmidt Berlin.
- /30/ Koerner, R.M. (1992): Status of Landfill Design in USA and Current Research at GRI. Naue-Fasertechnik Workshop Lübbecke, Germany 7 May 1992.
- /31/ Lante, D. W. (1992): Leckkontrolle und Leckortung bei Oberflächenabdichtungssystemen. In: Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Abdichtungen von Deponien und Altlasten. EF-Verlag, Berlin.
- /32/ Löwe, D. (1992): Erfahrungen mit der Sanierung von Drainagen. Bautechnische Lösungen zur Behandlung und Sicherung von Abfalldeponien und Altlasten. Seminar der Technischen Akademie Wuppertal, 16./17.09.1992.
- /33/ Müller, L., Heemeier, R. und Lahl, U. (1990): Neue Deponiekonzepte: Das Beispiel Verbunddeponie Bielefeld-Herford, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 38, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld.

- /34/ Ney, P. (1992): Ausführung einer Schachtsanierung. Bautechnische Lösungen zur Behandlung und Sicherung von Abfalldeponien und Altlasten. Seminar der techn. Akademie Wuppertal, 16./17.09.1992.
- /35/ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung und Niedersächsisches Landesamt für Wasser und Abfall (1991): Deponieüberwachungsplan Wasser - Beweissicherung an Deponien in Niedersachsen. Entwurf 2.1, Februar 1991.
- /36/ Rettenberger, G., Schmidt, C. & Urban-Kiss, S. (1989): Lecküberwachung an einer Oberflächenabdichtung, AbfallwirtschaftsJournal 1, Nr. 10/1989, Ef-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin.
- /37/ SARNA Kunststoff AG: Kontrollierbare Abdichtungssysteme für Deponien. Abdeckung der Industriemülldeponie Karsau. Sonderdruck.
- /38/ Schlagintweit, F. (1992): Beiträge zur Abdichtung von Deponien. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (Hrsg.), Heft 120.
- /39/ Schmidt, C. (1989): Möglichkeiten zur Leckfeststellung und -ortung am Beispiel der Sondermülldeponie Gerolsheim. Diplomarbeit, eingereicht am Geographischen Institut der Universität Stuttgart, erarbeitet am Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart.
- /40/ Siemens AG Bereich Energieerzeugung KWU (1990): Deponie-Langzeitüberwachung mit LEOS. Firmenprospekt.
- /41/ Stammler, M., Bol, J. & Hurtig, H. W. (1986): Studie zur vergleichenden Bewertung von Überwachungssystemen für Deponien. BMFT Forschungsbericht T 86-134.
- /42/ Stief, K. (1992): Übersicht über Deponiebasis- und Oberflächenabdichtungssysteme. Tagung: Geotechnische Probleme beim Bau und Betrieb von Abfalldeponien. Landesgewerbeanstalt Bayern, Nürnberg.
- /43/ TÜV Bayern Geschäftsstelle Nürnberg (1989): Gutachten zur Erteilung einer wasserrechtlichen Zulassung, unveröffentlicht.
- /44/ USEPA (1989): Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure. Seminar Publication. USEPA, Technology Transfer, Center for Environmental Research Information, Office of Research and Development, Cincinnati, OH 45268, EPA/625/4-89/022.

Themenkreis III - Ziele von Rekultivierungsmaßnahmen

Umweltverträglichkeit von Oberflächenabdichtungen

Umweltauswirkungen von Oberflächenabdichtungen

Dipl.-Geogr. D. Steinbach u. Dipl.-Geogr. A. Schultheis, Universität Stuttgart

1. Einleitung und Problemstellung

Emissionen aus Deponien werden über stark unterschiedliche Zeiträume (z.T. mehrere Jahrhunderte) in erster Linie über entstehendes Deponiegas und anfallendes Sickerwasser ausgebracht. Zur Verminderung von Schadstoffeinträgen in die Biosphäre wurde daher das Multi-barrierenkonzept [5] entwickelt, zu dessen Bestandteilen Abdichtungsmaßnahmen sowohl für die Deponiebasis als auch für die Oberfläche gehören. Oberflächenabdichtungen gewährleisten dabei eine Verringerung der Infiltration von Niederschlagswasser sowie die Erfassung und Kontrolle des entstehenden Deponiegases.

Da Oberflächenabdichtungen direkt auf den Abfallkörper aufgebracht werden, muß bei Altablagerungen eine eventuell bereits bestehende Rekultivierungsmaßnahme beseitigt werden. Die in der Folge aufzubringende Rekultivierungsschicht kann, um Schäden an den Dichtungselementen zu vermeiden, nur eine flachwurzelnende Vegetationsgesellschaft tragen. Hieraus resultieren demnach länger andauernde Pflegemaßnahmen bezüglich der Vegetationsdecke sowie Nachsorgemaßnahmen für das bei einer Gasdrainage anfallende und zu behandelnde Deponiegas.

Je nach der bestehenden Situation der zu sichernden Altablagerung bedeutet die Ausführung dieser technischen Maßnahme einen mehr oder weniger schweren Eingriff in den vorhandenen Landschaftshaushalt. Dabei ist von Interesse inwieweit eine Altablagerung durch ihr Relief, den standortkundlichen Voraussetzungen sowie ihrer Vegetationsdecke bereits in die umgebende Landschaft eingebunden ist.

- Aus den letztgenannten Punkten resultieren zwei unterschiedlich orientierte Problemstellungen: Die erste Problemstellung umfaßt einen eher **standortkundlich-ökologischen** Aspekt, der die Altablagerung als Bestandteil der Umgebung sowie ihre Eingliederung in den bestehenden Landschaftshaushalt untersucht. Im Vordergrund steht dabei die Abwägung zwischen dem Nutzen einer Oberflächenabdichtung zur Sicherung der Schutzgüter Wasser, Luft, Boden und Organismen sowie den Auswirkungen der technischen Maßnahme auf den bestehenden Landschaftshaushalt.
- Die zweite Problemstellung untersucht, ob aufgrund von Speicher- und Verdunstungsleistungen der Boden- und Vegetationsbedeckung einer vorhandenen Rekultivierungsmaßnahme eine **Barriere Wirkung** gegenüber eindringendem Niederschlagswasser gegeben ist, wobei die Deckschicht zumindest teilweise als Oberflächenabdichtung wirken kann.

2. Vorgehensweise

Im Rahmen einer Studie wurden zwei Altablagerungen im Landkreis Esslingen mit überwiegender Hausmüllanteil, die eine Abdeckung mit einer ausgeprägten Vegetationsdecke aufweisen, untersucht und bezüglich der Auswirkung einer Sicherungsmaßnahme bewertet.

Die Beurteilung von Oberflächenabdichtungen erfolgt unter den oben formulierten standortkundlich-ökologischen Aspekten sowie unter dem Gesichtspunkt der Barrierewirkung, wobei folgende Parameter berücksichtigt werden.

a) Untersuchungen auf der Altablagerung unter geökologischem Aspekt

- *Deckschichten und ihre Voraussetzungen als Pflanzenstandort*
Hierbei ist insbesondere das Relief der Altablagerung und ihr Bezug zur Umgebung von Interesse.
- *Geomorphologische Aufnahmen bezüglich der Einpassung in die Umgebung.*
Bei den zur Abdeckung des Müllkörpers aufgebrachtten Deckschichten, handelt es sich in der Regel um Erdaushub, einem Material, dessen bodenphysikalische Eigenschaften wie Luft- und Wasserkapazität, Aggregatstabilität und Porung durch Ausbaggerung, Transport, Wiederaufbringung und Verdichtung gestört bzw. zerstört wurden. Diese Deckschichten besitzen demnach positive Eigenschaften bezüglich der Speicherkapazität und damit der Sickerwasserverringerung, sind jedoch als Pflanzenstandort oft weniger gut geeignet. Der Zeitraum seit Aufbringung des Materials war für eine Bodenbildung zu kurz, so daß sich nur in den obersten Zentimetern ein gering humoser Horizont ausbilden konnte. Für eine vergleichende Betrachtung der Deckschichten auf dem Deponiegelände und den Böden der Umgebung hinsichtlich ihrer Standortbedingung für Pflanzen, stellen insbesondere die Bodenarten eine gemeinsame Basis dar. Durch diese werden zum großen Teil Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen, sowie Pufferkapazitäten bestimmt. Bezüglich der Sickerwasserminimierung sind insbesondere Feldkapazität und K_f -Wert, die ebenfalls weitgehend durch die Bodenart bestimmt werden, von Bedeutung.
- *Vegetationsaufnahmen und deren ökologische Bewertung*
Die durchgeführten vegetationskundlichen Aufnahmen dienen einerseits dem Vergleich der einzelnen Deponieflächen untereinander, sowie andererseits einer vergleichenden Betrachtung des Pflanzenbestandes der Umgebung. Dabei wurden auch statistische Werte, wie Artenzahl, seltene Arten, Sukzessionsreihen [2] sowie Gründe für Pflanzenschädigungen berücksichtigt.
- *Schadwirkung an Pflanzen durch Deponiegas*
Zur Ermittlung der Austrittsschwerpunkte des Deponiegases wurden einzelne Deponieabschnitte mit einem Flammen-Ionisations-Detektor abgegangen. Ziel war es festzustellen, ob ein Zusammenhang zwischen Schadwirkungen an Pflanzen und Deponiegasaustrittsstellen besteht.

b) Anwendung der Untersuchungen auf den Aspekt der Verringerung des Eintrags von Niederschlägen

Relief, Deckschicht sowie Pflanzenbestand tragen durch Oberflächenabfluß, Wasserspeicherung sowie Verdunstung zu einem verminderten Eintrag des Niederschlagswassers in den Deponiekörper bei. Zur Quantifizierung des Abflusses aus der Deckschicht in den Deponiekörper wurde das "HELP"-Programmsystem herangezogen. Das **Programmsystem "HELP"** (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance), für die US-Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) 1984 in der Version 1.0 entwickelt (Version HELP 2.05 folgte 1989), bietet durch die Simulation des Wasserhaushalts von Deponien, Deckschichten und Oberflächenabdichtungen eine Möglichkeit zur Abschätzung des Gefährdungspotentials (Sickerwasser) von Altablagerungen.

Das Programm simuliert mit einem Datensatz an Berechnungsgrundlagen den Wasserhaushalt für die gesamte Deckschicht. Um dabei die unterschiedlichen Reliefsituationen und Bodenarten der Altablagerungen berücksichtigen zu können, wurden diese in verschiedene Teilflächen untergliedert, wodurch sich für jede einzelne dieser Flächen aufgrund eines repräsentativen Bodenprofils ein Ergebnis errechnet.

Die anhand eines Arbeitsprogrammes gewonnenen Daten bilden die Grundlage zur nachfolgenden Darstellung der ökologischen Situation an den Standorten. Als nächster Schritt erfolgt die Bewertung der vorhandenen Deckschicht hinsichtlich ihrer Barrierewirkung gegen eindringendes Niederschlagswasser. Nachfolgend werden in einem Szenario die Auswirkungen einer mineralischen Oberflächenabdichtung gemäß Deponieklasse I zum einen unter dem Aspekt der Barrierewirkung und zum anderen unter Betrachtung der Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt untersucht. In einem abschließenden Kapitel werden die Ist-Situation und das Szenario vergleichend bewertet.

3. Ist-Situation der Altablagerungen "Federlesmahd" und "Hintere Halde"

Bei beiden Standorten handelt es sich um überwiegend mit Hausmüll verfüllte Altablagerungen. Die "Federlesmahd" liegt in einem Waldgebiet und wurde an einen nordwestexponierten Hang angelehnt. Sie gliedert sich insbesondere in den Sommermonaten durch die Bepflanzung optisch in das Landschaftsbild ein, ist teilweise jedoch noch als anthropogene Aufschüttung zu erkennen. Die Steilheit des Reliefs, führte sowohl auf der Altablagerung als auch im umgebenden Wald zu Rutschungen. Der Untergrund der Deponie besteht größtenteils aus Knollenmergeln, die zum einen eine gute geologische Barriere bilden, zum anderen jedoch bei Wasserzutritt sehr anfällig für Rutschungen sind.

Bei der "Hinteren Halde" handelt es sich um ein verfülltes Tal das zur Kuppe überhöht wurde und damit optisch kaum an die Umgebung angepaßt ist. Die südwestexponierte Hänge zeigen aufgrund des steilen Reliefs deutliche Erosionsrinnen. Der Untergrund der Altablagerung wird von den tonigen Schichten des Schwarzen Jura β - δ gebildet

Aufgrund des lehmig-tonigen Deckschichtenmaterials tritt bei beiden Altablagerungen stellenweise Staunässe auf.

Die Deckschichten beider Altablagerungen weisen für alle Bohrpunkte Mächtigkeiten von mindestens 2 m auf. Die Bodenarten bestehen vorwiegend aus schluffigen und tonigen Lehmen und unterscheiden sich von denen der Böden der Umgebung nur geringfügig. Allerdings unterliegen die Böden der Umgebung bereits seit langem Bodenbildungsprozessen, die die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Böden bestimmen. Bezüglich Wasser- und Luftversorgung sind diese Böden günstiger zu beurteilen als die Deckschichten, da der Humusanteil der oberen Bodenhorizonte zu einer besseren Porenverteilung und guten Nährstoffversorgung beiträgt. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) dagegen liegt bei den Deckschichten der Altablagerungen wesentlich höher, wodurch eine gute Transpiration der Pflanzen ermöglicht wird, die wiederum den Abfluß aus der Deckschicht verringert. Die nFK ist somit für die Wasserversorgung der Pflanzen vorteilhafter als diejenige der Böden der Umgebung. Die chemischen Eigenschaften sind bei den Deckschichten durch den Carbonatgehalt und den im neutralen bis schwach basischen Bereich liegenden pH-Werten als günstiger zu betrachten. Auch die Nährstoffgehalte liegen bei den Deckschichten höher, da hier im Initialstadium der Bodenbildung im Gegensatz zu den Waldböden noch keine Auswaschung der enthaltenen Carbonate und daraufhin einsetzende Versauerung stattgefunden hat.

Durch die Tätigkeit der Bodentiere und Mikroorganismen findet bei den Deckschichten der Altablagerung allmählich eine Entwicklung vom sterilen Deckschichtensubstrat hin zu einem natürlicheren Pflanzenstandort statt, wobei die ähnlichen Bodenarten von Deckschicht und Umgebung auf längere Sicht auch entsprechende Voraussetzungen als Pflanzenstandort bieten.

Damit ist auch eine langsame Entwicklung in der Pflanzenbedeckung der ehemaligen Deponie von bislang überwiegend, z.T. gepflanzten, Rohbodenbesiedlern wie z.B. Erlen zu anspruchsvolleren Pflanzen der umgebenden Waldgesellschaft zu erwarten. Bislang sind die Altablagerungen im Vergleich zur Umgebung durch eine wesentlich größere Artenvielfalt gekennzeichnet, was insbesondere auf die sehr unterschiedlichen Licht- und Feuchtigkeitsverhältnisse zurückzuführen ist.

Die Fauna der Altablagerungen zeichnet sich durch eine große Anzahl Klein- und Kleinstlebewesen aus und bietet einer Vielzahl an Vögeln Lebens- und Nahrungsraum, da aufgrund von Unterholz, Hecken, Wiesen, Schilf und Wald unterschiedlichste Ansprüche erfüllt werden.

Die Vegetationsdecke ist bei beiden Altablagerungen insgesamt zu fast 100 % geschlossen, dennoch zeigen sich stellenweise Schäden an den Pflanzen oder es kommt insbesondere am Rand von Bermen kleinflächig zu völligem Vegetationsausfall. Im Bereich von Bermen- oder Hangkanten sowie Böschungen zeigen sich immer wieder hohe bis sehr hohe Gaskonzentrationen. Die Gasemissionen treten nicht flächenhaft sondern konzentriert, vor allem an Rißbildungen des Decksubstrates auf. Damit bleiben die Gasemissionen auf einen kleinen Raum beschränkt und führen nicht zu großflächigen Pflanzenschäden. Ein Teil der Vegetationsschäden ist nicht auf Gas, sondern vielmehr auf zu geringe Pflanzabstände, Trockenheit sowie Schädlingsbefall zurückzuführen.

Wichtigster Faktor der Sickerwasserbildung sind die Niederschläge. In welcher Höhe die Sickerwasserrate anfällt ist von unterschiedlichen Faktoren, wie zum Beispiel Feldkapazität der Deckschicht sowie aktive und passive Verdunstung, abhängig. Die Feldkapazitäten, die sich

aus der Mächtigkeit und der Bodenart errechnen, liegen für die Altablagerungen bei mindestens $650 \text{ l} / 2\text{m}^3$ und sind damit als hoch einzustufen. Aus diesem Grund kann von einer Speicherung eines größeren Teils der Niederschläge ausgegangen werden. Die Höhe der Speicherung ist stark abhängig von der Niederschlagshöhe aufeinanderfolgender Jahre. Bei einer hohen gespeicherten Niederschlagsmenge in einem Jahre und einem darauffolgenden gleichfalls regenreichen Jahr können die Feldkapazitäten überschritten und dadurch die Perkulationsrate in den Deponiekörper vergrößert werden. In der Regel kann jedoch der Wasserrückhalt durch die Deckschicht als eine für die Sickerwasserverringerung relevante Größe bewertet werden. Weiterhin tragen zur Verringerung des Sickerwasseranfalls die geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit der Bodenarten, insbesondere der tieferen Schichten, sowie der gute kapillare Aufstieg des eingedrungenen Wassers bei.

Für die Simulation der Deckschichten mit den erhobenen Boden- und Vegetationsdaten sowie Hangneigungen wurden die Klimadaten der Meßstation Hohenheim zugrunde gelegt. Um die verschiedenen Reliefsituationen der Altablagerungen zu berücksichtigen, wurden beide in jeweils vier Teilflächen untergliedert, wobei für jede dieser Teilflächen ein repräsentatives Bodenprofil, bestehend aus fünf Schichten, für die Berechnungen herangezogen wurde. Die Exposition wurde über unterschiedliche Einstrahlungswerte berücksichtigt.

Tab. 5: Wasserhaushalt der Ist-Situation "Federlesmahd"

| in [%] | Niederschlag | Oberflächenabfluß | Evapotranspiration | Perkolation |
|------------|--------------|-------------------|--------------------|-------------|
| Fläche I | 100 | 0,85 | 61,80 | 36,74 |
| Fläche II | 100 | 1,20 | 67,46 | 30,70 |
| Fläche III | 100 | 0,00 | 74,47 | 24,97 |
| Fläche IV | 100 | 0,00 | 70,38 | 29,21 |

Bei den Flächen I und II handelt es sich um Hangbereiche mit Neigungen von ca. 19° während die Flächen III und IV weitgehend ebene Flächen bilden. Außer der Grasfläche der Fläche III, sind alle Flächen mit ca. 6-7 m hohen Erlen und Linden bestockt, wobei auch deutlicher Unterwuchs vorhanden ist. Die höhere Wasserleitfähigkeit der beiden ersten Bodenschichten, ist für die verstärkte Perkolation von Fläche I verantwortlich. Die weiteren Unterschiede der einzelnen Flächen sind insbesondere auf die durch die Schatthanglage der Altablagerung bedingte verringerte Evapotranspiration zurückzuführen. Das Programm bietet als Eingabeparameter nur die Auswahl zwischen verschieden gutem Grasbewuchs, weshalb weder die Interzeptionsverdunstung noch die Transpirationsleistung der ca. 6-7 m hohen Erlenbestände (bei 2,5 m Höhe $350 \text{ l} / \text{Erle}$ [3]) in die Evapotranspirationsberechnung eingehen. Die Bodenevaporation wird somit im Verhältnis zur Transpiration überbewertet, was insbesondere bei Schatthanglagen zu sehr niedrigen Evapotranspirationswerten führt. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß die Perkulationswerte des Programms zu hoch liegen.

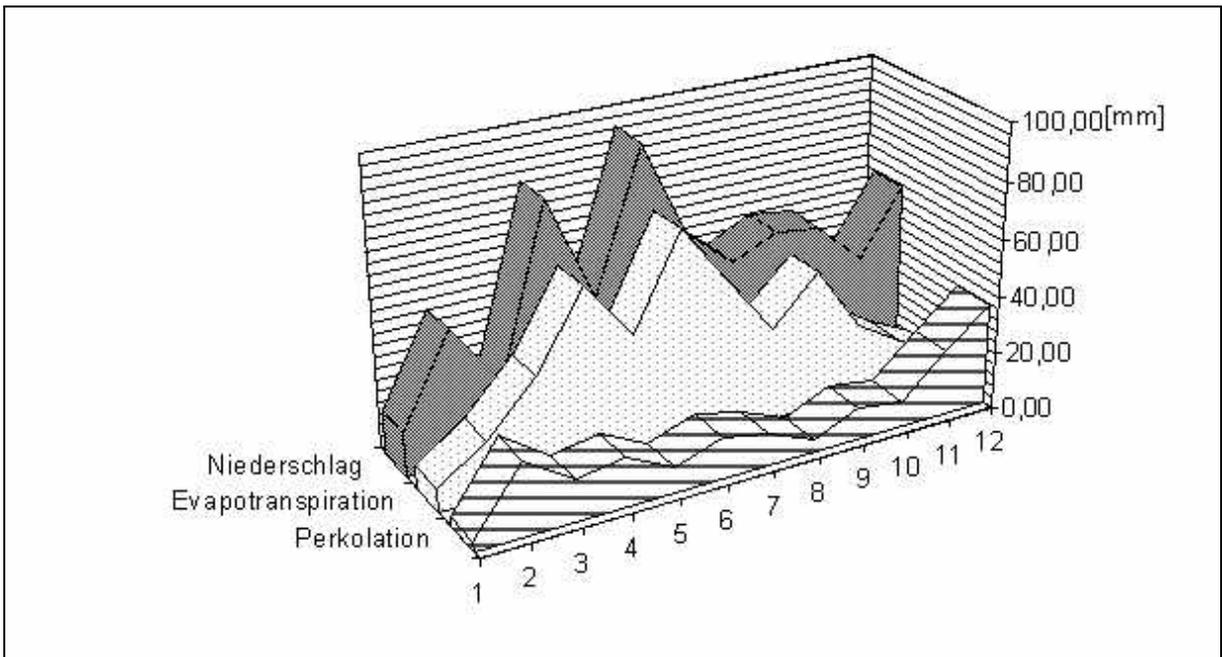


Abb. 6: Perkulationsrate in Abhängigkeit von Niederschlag und Evapotranspiration des Deponieabschnitts IV (Federlesmahd)

Die Simulation der Altablagerung "Hintere Halde" ergab, wie aus Tabelle 2 ersichtlich, deutlich günstigere Evapotranspirationswerte.

Tab. 6: Wasserhaushalt der Ist-Situation "Hintere Halde"

| in [%] | Nieder-schlag | Oberflächenab-fluß | Evapotranspira-tion | Perkolation |
|------------|---------------|--------------------|---------------------|-------------|
| Fläche I | 100 | 0,00 | 82,35 | 17,13 |
| Fläche II | 100 | 0,64 | 79,75 | 19,73 |
| Fläche III | 100 | 0,00 | 81,64 | 18,77 |
| Fläche IV | 100 | 0,62 | 81,25 | 18,35 |

Bei der Altablagerung "Hintere Halde" sind alle Flächen nach Südwesten exponiert, wobei die Flächen II und IV Hangneigungen von 12 bzw. 18° aufweisen. Weite Teile der Flächen sind mit dichtem Grasbewuchs bestanden. Die hohe Transpirationsrate ist auf die Verbindung von Exposition und Hangneigung, die hohe Einstrahlungs- und damit hohe Verdunstungswerte ergibt, zurückzuführen. Bei den Flächen I + III mit geringeren Hangneigungen sind die geringen Perkulationswerte, insbesondere auf Bodenarten mit niedrigen K_f -Werten, zurückzuführen.

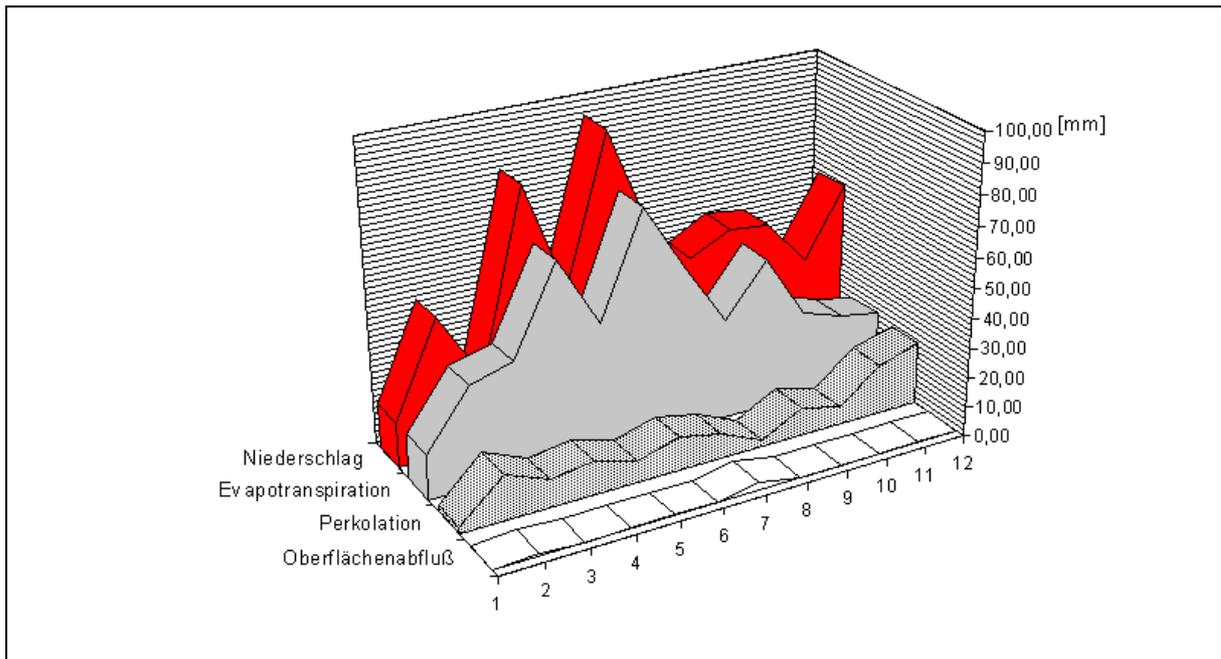


Abb. 7: Perkolationsrate in Abhängigkeit von Niederschlag und Evapotranspiration auf Deponeifläche II (Hintere Halde)

Die IST-Situationen beider Altablagerungen zeigen bezüglich der Standortfaktoren noch deutliche Unterschiede zur Umgebung, doch ist zu erkennen, daß sich langsam eine *Eingliederung in den Landschaftshaushalt* der Umgebung vollzieht. Auf beiden Altablagerungen hat sich bereits eine vielfältige Fauna und Flora eingestellt. Der *geologische Untergrund* ist bezüglich des Grundwasserschutzes ebenfalls als günstig einzustufen. Die Berechnungen mit dem "HELP"- Programmsystem ergeben für die "Federlesmahd" im Vergleich zur "Hinteren Halde" höhere Sickerwasserraten. Diese sind jedoch, aufgrund der hohen *Feldkapazität* der Deckschicht, dem erheblichen Wasserbedarf der Erlen und Linden und der damit verbundenen hohen *Transpirationsleistung* sowie der programmbedingt unberücksichtigten *Interzeptionsverdunstung*, deutlich niedriger anzusetzen.

4. Szenario mit Oberflächenabdichtung

Für das Szenario mit Oberflächenabdichtung wurde die Simulation mit einer Abdichtung der Deponieklasse I (nach TAsi) durchgeführt. Bei einer Simulation mit Kombinationsdichtung tritt als Ergebnis keine Perkolationsrate mehr auf, so daß eine Simulation nur mit mineralischer Dichtung als die interessantere Variante erschien. Weiterhin könnten bei den Altablagerungen aufgrund des Reliefs bautechnische Probleme auftreten (lange, steile Hänge) wodurch die Standsicherheit einer Kombinationsdichtung gefährdet sein könnte.

Das Rechenmodell bietet von normalen über verdichtete Bodenschichten bis zu Dichtungsschichten mit und ohne Kunststoffbahn sämtliche Möglichkeiten zur Eingabe. Bei der mineralischen Abdichtung konnten die Schichten nach TA Siedlungsabfall als Bodenschichten für die Berechnungen eingegeben werden.

4.1 Ergebnisse der "HELP"-Simulation

Tab. 7: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I

(nach TA-Siedlungsabfall)
Wasserhaushalt "Federlesmahd"

| in [%] | Nieder- schlag schlag | Oberflächenab- fluß | Evapotranspira- tion | Drainagewas- ser | Perkolation |
|------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|-------------|
| Fläche I | 100,00 | 0,75 | 62,05 | 36,17 | 0,38 |
| Fläche II | 100,00 | 0,74 | 62,04 | 36,20 | 0,37 |
| Fläche III | 100,00 | 0,00 | 74,31 | 24,67 | 0,46 |
| Fläche IV | 100,00 | 0,00 | 62,15 | 36,27 | 0,59 |

Die der Simulation einer Oberflächenabdichtung nach TA-Siedlungsabfall [4] der Deponieklasse I für die Ablagerung "Federlesmahd" zeigt in Tab. 3, daß die Perkolation von Niederschlagswasser in den Deponiekörper Werte zwischen $\approx 0,4$ und $\approx 0,6$ % des Niederschlags aufweist.

Die Evapotranspirationswerte liegen bei der Simulation mit Oberflächenabdichtung für die Flächen I und IV niedriger als bei der Simulation der Ist-Situation. Dies ist auf Unterschiede zwischen der Bodenart der für die Abdichtung angenommenen Rekultivierungsschicht und derjenigen der bestehenden Deckschicht zurückzuführen.

Auch der Oberflächenabfluß hat sich aufgrund der durchlässigen Bodenart der Rekultivierungsschicht verringert.

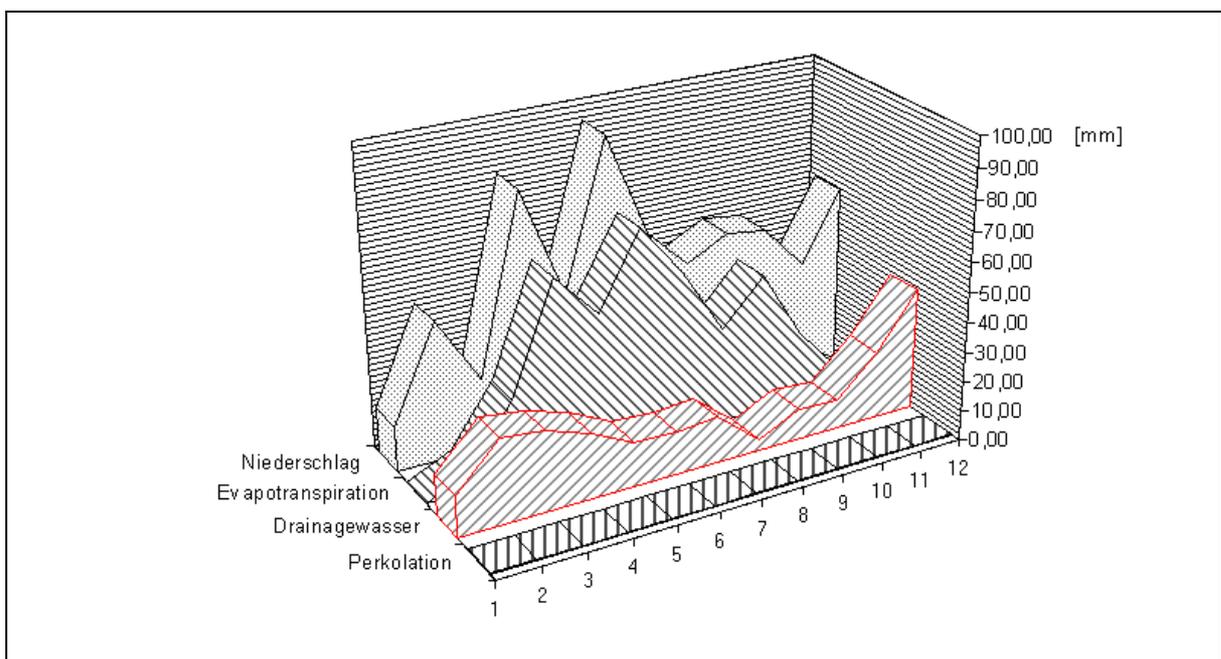


Abb. 8: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für die Deponiefläche IV (Federlesmahd)

Das Szenario einer Oberflächenabdichtung zeigt sich für die Altablagerung "Hintere Halde" wie folgt.

Tab. 8: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I

(nach TA-Siedlungsabfall)
Wasserhaushalt "Hintere Halde"

| in [%] | Niederschlag schlag | Oberflächenab- fluß | Evapotranspira- tion | Drainagewas- ser | Perkolation |
|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|-------------|
| Fläche I | 100,00 | 0,00 | 83,30 | 15,89 | 0,52 |
| Fläche II | 100,00 | 0,59 | 79,88 | 19,25 | 0,39 |
| Fläche III | 100,00 | 0,00 | 81,52 | 17,96 | 0,59 |
| Fläche IV | 100,00 | 0,55 | 81,54 | 17,97 | 0,34 |

Die Berechnungen der Perkulationsrate von Niederschlagswasser in den Deponiekörper zeigen bei der Simulation einer Oberflächenabdichtung nach Deponieklasse I für die Altablagerung "Hintere Halde" Werte zwischen $\approx 0,4$ und $\approx 0,6$ % des Niederschlags, die damit den Simulationswerten der "Federlesmahd" entsprechen. Die Evapotranspirationsrate der Simulation mit Oberflächenabdichtung entspricht weitgehend derjenigen der Ist-Situation, da jeweils der gleiche Bewuchs in die Berechnung einging und die angenommene Bodenart der Rekultivierungsschicht derjenigen der Deckschicht weitgehend gleicht.

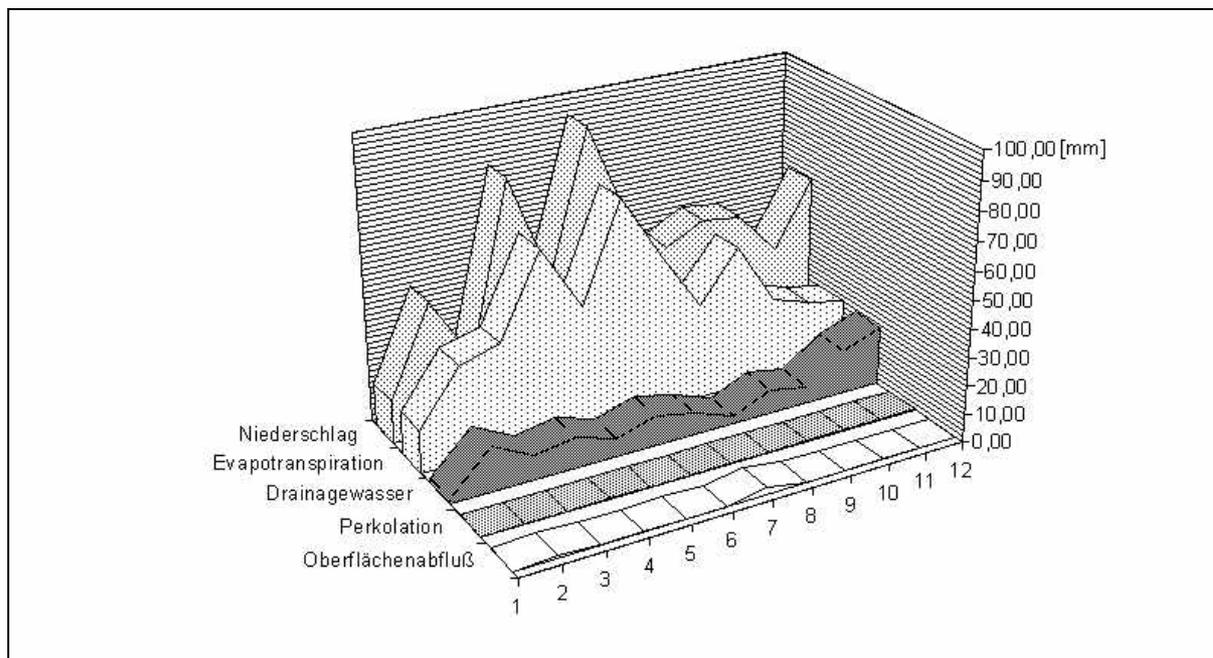


Abb. 9: Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für die Fläche II ("Hintere Halde")

Nach den Ergebnissen beider Simulationen kann die Oberflächenabdichtung demnach als wirkungsvolle Maßnahme gegen den Eintrag von Niederschlagswasser und somit zum Schutz der Böden, Grund- und Oberflächengewässer betrachtet werden. Allerdings bleiben Langzeitverhalten und eventuelle Schädigungen einer Oberflächenabdichtung unberücksichtigt.

4.2 Auswirkungen auf die Umgebung

Die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung ist nicht nur mit einer Reduzierung des Schadstoffeintrags in das Ökosystem der Deponieumgebung verbunden, sondern wirkt sich auch auf das Ökosystem der Altablagerung selbst aus. Dies zeigt sich für die "Federlesmahd" zum einen in der Entfernung des Baumbestandes, der sich über eine Fläche von ca. 12 ha erstreckt. Die Phytomasse von Baumbeständen kühl-feuchter Gebiete liegt bei 100-500 MgTS/ha [8], wobei für die noch jungen Baumbestände der Deponie, der untere Wert realistisch ist. Damit ergibt sich für die Deponie eine Pflanzenmasse von ca. 1200 MgTS die einer Kompostierung zugeführt werden muß. Desweiteren fällt mit der notwendigen Entfernung der mindestens 2m mächtigen Deckschicht, die nur zum Teil wieder als Rekultivierungsschicht eingesetzt werden kann, eine erhebliche Menge an Erdmaterial (ca. 127.000 m³) an. Bei der "Hinteren Halde" ist die einer Kompostierung zuzuführende Phytomasse geringer, während sich der zu entsorgende Bodenaushub in der gleichen Größenordnung bewegt.

Um eine Beschädigung der Drain- und Dichtungsschicht der Oberflächenabdichtung zu vermeiden, können für die Rekultivierung nur flach wurzelnde Pflanzen eingesät werden. Das bedeutet, daß eine sich natürlich einstellende, tief wurzelnde Strauchvegetation durch Pflegemaßnahmen verhindert werden muß. Da neben den gepflanzten Arten in der Regel sehr schnell Unkauter einwandern und diese in der Regel tief wurzeln, ist zu deren Beseitigung fast immer der Einsatz von Herbiziden erforderlich. Auch Bodentiere wie Erdwühler und Erdfresser, können Schäden an der Drain- oder Dichtungsschicht verursachen. Um die Tiere dem Deckschicht fernzuhalten, ist ein regelmäßige Einsatz von Pestiziden vermutlich unvermeidlich. Das Fehlen einer Bodenfauna ist mit einer verminderten Einarbeitung der Streu verbunden, so daß sich einerseits kaum eine Humusschicht ausbilden kann und andererseits eine dadurch bedingte mangelnde Gefügeentwicklung die Erosionprozesse begünstigt. Das nur oberflächlich ausgeprägte Wurzelgeflecht einer Grasvegetation kann der Erosion nur in begrenztem Umfang entgegenwirken. Insbesondere im Winterhalbjahr, bei nicht geschlossener Vegetationsdecke, sind Erosionsschäden zu befürchten. Der Materialabtrag bei Erosion kann zu verstärkter Austrocknung bis in tiefere Bereiche führen, und damit durch Reißbildung die Funktionstüchtigkeit der Dichtungsschicht beeinträchtigen.

Durch die Vorgabe, die Rekultivierung mit flach wurzelnden Pflanzen durchzuführen, wird die sich entwickelnde Pflanzendecke erhebliche Unterschiede zur Artenvielfalt des heutigen Pflanzenbestands der Altablagerungen aufweisen. Die geringere Anzahl an Arten wird auch auf die Fauna des Standortes zurückwirken, da nur noch wenige spezifische Fraßpflanzen für Insekten, die die Nahrungsgrundlage für viele Vögel darstellen, vorhanden sind. Mit der Verarmung von Flora und Fauna geht eine starke Herabsetzung des ökologischen Wertes dieser Fläche einher. Geringe Artenvielfalt der Pflanzen, ein naturferner Lebensraum sowie der Einsatz von Giften bietet weder den Kleinlebewesen noch dem Wild den ihren Bedürfnissen entsprechenden Lebensraum.

5. Abwägung zwischen der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung und der Ist-Situation

Anhand der Ist-Situation zeigt sich, daß eine Bewertung der Altablagerungen ausgesprochen schwierig ist, da drei Aspekte gegeneinander aufgewogen werden müssen.

1. die landschaftsökologische Situation
2. die Fähigkeiten der Sickerwasserverringerung durch Evapotranspiration und Speicherung
3. die Ergebnisse der Simulation der Oberflächenabdichtung

Die Abwägung über eine höhere Umweltverträglichkeit mit einer Oberflächenabdichtung oder unter Beibehaltung des Ist-Zustandes kann nur für jede Altablagerung individuell getroffen werden. Für die beiden untersuchten Altablagerungen stellen die geoökologischen Aufnahmen und die "Help"-Simulation die Diskussionsgrundlage dar. Desweiteren ist das Langzeitverhalten von Deponieoberflächenabdichtungen in eine Abwägung miteinzubeziehen. Da bezüglich des Langzeitverhaltens noch wenig praktische Erfahrungen vorliegen, kann nur auf Feld- und Laborversuche, Modellrechnungen oder kurzzeitige Erfahrungen zurückgegriffen werden.

Für beide Altablagerungen konnte bei den mit einfacheren Feldmethoden durchgeführten Untersuchungen aufgrund der Bodenart und Mächtigkeit und der damit verbundenen hohen Feldkapazität für die Deckschicht eine durchaus bestehende Barrierewirkung festgestellt werden. Um die genaue Mächtigkeit und Wasserdurchlässigkeit der Deckschicht zu ermitteln, bedarf es jedoch technisch aufwendigerer Feld- und Laborversuche als die im Rahmen dieser Studie durchgeführten. Desweiteren sollte in Feldversuchen die tatsächliche Transpirations- und Interzeptionsleistung für Baumbestände, die in der Computersimulation mit dem "Help"-Programmsystem aufgrund programmbedingter Vorgaben keinen Eingang findet, aber zu einem erheblichen Teil zur Minderung der in den Deponiekörper perkolierende Niederschläge beitragen kann, genauer ermittelt werden. Damit wird der Vegetation ein hoher Stellenwert beigemessen, da durch Intensivierung der Vegetationsdecke sowie Pflanzung entsprechender wasserzehrender Arten eine deutliche Verringerung des Eintrags von Niederschlägen in den Deponiekörper bewirkt werden kann.

Bei beiden Altablagerungen, die bereits Ansätze einer ökologischen Eingliederung in die Umgebung zeigen sowie eine reiche Flora und Fauna aufweisen, sollte vor der Aufbringung einer Oberflächenabdichtung nach Alternativen zur Sickerwasserminimierung gesucht werden. Bezüglich der Schadwirkungen an der Vegetation in Zusammenhang mit austretendem Deponiegas konnte nur vereinzelt eine Korrelation festgestellt werden. In der Umgebung der Altablagerungen zeigten sich weder Gasemissionen noch Pflanzenschäden, so daß aus diesen Gründen kein dringender Handlungsbedarf gesehen wird.

Eine lehmig-tonige Deckschicht sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Vegetationsbestandes können eine Oberflächenabdichtung nicht ersetzen, jedoch dazu beitragen, daß unter Beibehaltung der Ökosysteme der "Federlesmahd" und der "Hinteren Halde" ein geringerer Eintrag in andere Ökosysteme stattfindet, so daß dadurch insgesamt die unter mehreren Aspekten am ehesten umweltverträgliche Lösung erreicht wird.

6. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden die Beziehungen zwischen einer Altablagerung und ihrer Umgebung sowie die Wirkung einer nachträglich aufgetragenen Oberflächenabdichtung betrachtet.

Nach der Darstellung des bestehenden Landschaftshaushaltes erfolgte mittels einer ökologischen Bodenbewertung sowie einer Simulation des Wasserhaushalts der Deckschicht mit dem Programmsystem "HELP" eine Bewertung der vorhandenen Deckschicht hinsichtlich ihrer Barrierewirkung gegen eindringendes Niederschlagswasser.

In einem Szenario wurden die möglichen Auswirkungen einer mineralischen Oberflächenabdichtung gemäß Deponieklasse I dargestellt. Für die "Hintere Halde" konnte mittels der "HELP"-Simulation eine bestehende Barrierewirkung der Deckschicht bestätigt werden. Für die "Federlesmahd" liegen die Perkolationswerte höher, was zum Teil durch Mängel im Programm bedingt ist und damit von einer niedrigeren Perkolationsrate als der durch das Programm errechneten auszugehen ist. Die Entwicklung eines Szenarios für die Auswirkungen einer Oberflächenabdichtung zeigt die negativen Auswirkungen auf das bestehende Ökosystem, das infolge der beschränkenden Vorgaben für die Rekultivierung auch nicht ersetzt werden kann.

Der landschaftsökologische Aspekt kann kein alleiniges Entscheidungskriterium darstellen, da auch durch den Austrag umweltrelevanter Stoffe aus dem Deponiekörper direkt, aber meist weniger offensichtlich, in Ökosysteme eingegriffen wird. Bislang steht bei der Altlastenproblematik in der Regel der Schutz der menschlichen Gesundheit im Vordergrund. Hierbei spielen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen gegen direkte Schädigungen die größte Rolle. Die Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt oder den allgemeinen Eintrag der Schadstoffe in die Biosphäre können nur unzureichend bewertet werden, da eine Quantifizierung des Stoffaustrags kaum realisierbar ist.

Für die Entscheidung über die Notwendigkeit einer Oberflächenabdichtung an einer Altablagerung muß auch das bestehende emissionsmindernde Potential der Abdeckung in Form von Speicherkapazitäten und Evapotranspirationsvermögen Berücksichtigung finden. Bestätigen labortechnische Untersuchungen der Bodenarten der Deckschicht eine geringe Wasserleitfähigkeit und werden durch entsprechende Anpflanzungen Transpiration und Evaporation erhöht, so kann diese "natürliche" Barriere zumindest teilweise die Funktion einer Oberflächenabdichtung übernehmen. Dadurch kann zwar keineswegs der gleiche Wirkungsgrad einer gezielten Oberflächenabdichtung erreicht werden, aber es bleibt abzuwägen, ob bezüglich des jeweiligen Gefährdungspotentials für einen Standort diese Lösung nicht die am ehesten mit der Umwelt verträgliche Maßnahme darstellt.

Literaturverzeichnis

- [1] BRECHTEL, H.-M: Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Mülldeponien, Müll-Handbuch Kap. 4623, Berlin 1984
- [2] KONOLD, W. u. ZELTNER, G.-H.: Untersuchungen zur Vegetation abgedeckter Mülldeponien, Beihefte zu den Veröffentlichungen von Naturschutz und Landespflege in Baden Württemberg, Bd. 24, Karlsruhe 1981
- [3] LARCHER, W.: Ökologie der Pflanzen, Ulmer Verlag, Stuttgart 1984
- [4] MINISTERIUM für UMWELT, NATURSCHUTZ und REAKTORSICHERHEIT: TA Siedlungsabfall vom 29. Mai 1993
- [5] STIEF, K.: Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien; Müll und Abfall, S. 15-20, 1/1986

Studien zum Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten

Priv.Doz.Dr. G. Wessolek u. P. Döll; Technische Univ. Berlin, Institut für Ökologie, FG Bodenkunde, Salzufer 11-12, 10587 Berlin

1. Problemstellung

Um die Sickerwassermenge und den Schadstoffaustrag aus Deponien möglichst gering zu halten, sollte u.a. versucht werden, die rekultivierte Deckschicht so zu gestalten, daß eine hohe Evapotranspiration stattfinden kann. Der vorliegende Beitrag befaßt sich im ersten Teil mit den wichtigsten Einflußgrößen, die die Höhe der realen Evapotranspiration bzw. des Sickerwasseranfalls bestimmen. Dazu gehören das Klima, die physikalischen Bodeneigenschaften der Rekultivierungsschicht sowie das Relief (Exposition und Hangneigung). Im zweiten Teil wird die Frage erörtert, ob der Sickerwasseranfall darüber hinaus von der Wärmeentwicklung im Müllkörper beeinflusst wird. Dazu werden Geländebefunde zweier Hausmülldeponien theoretisch abgeleiteten Aussagen gegenübergestellt.

2. Material und Methoden

Für die Berechnung der Wasserhaushaltskomponenten (ohne wärmeinduzierte Bodenwasserflüsse) wurde ein anhand von Geländemessungen geeichtes zweidimensionales Wasserhaushaltsmodell eingesetzt (Wessolek et al. 1992). Es betrachtet die rekultivierte Deponiedeckschicht als eine homogene Auflage mit einheitlichen bodenhydraulischen Eigenschaften. Die Verdunstung wird nach einem modifizierten Ansatz von Rijtema (1968) für Grasvegetation berechnet. Der Einfluß des Reliefs auf die Einstrahlung wird durch einen Strahlungsansatz nach Sellers (1965) berücksichtigt. Versickerung an der Untergrenze des Wurzelraumes findet bei diesem Modell statt, wenn die Feldkapazität überschritten wird.

Um zu klären, ob und in welcher Menge der Sickerwasseranfall bei Deponien mit Wärmeentwicklung reduziert ist, wurden zusätzlich Fallstudien mit einem neu entwickelten numerischen Modell des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports in ungesättigten Böden durchgeführt, das im Rahmen eines BMFT-Vorhabens über Deponiedichtungsprobleme entwickelt wurde (Döll, 1995, Dissertation in Vorbereitung). Dieses Modell wurde für die Beurteilung der Austrocknungsgefährdung von Deponiebasisabdichtungen unter dem Einfluß von Temperaturgradienten konzipiert (Döll & Wessolek, 1995). Zusätzlich werden Geländebefunde der Hausmülldeponien Monte Scherbelino (Frankfurt) und der Deponie Aurach (Ansbach/Nürnberg) hinzugezogen.

3. Einfluß von Klima, Bodeneigenschaften und Relief auf die Versickerung

In Abb. 1 ist die langjährige, mittlere Versickerung unter Grasvegetation für unterschiedliche Klimastationen und Rekultivierungssubstrate dargestellt. Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKwe) ist ein Maß für die Bodenwassermenge, die einem Pflanzenbestand neben den Niederschlägen für die Verdunstung zur Verfügung steht.

Werte von < 80 mm treten i.d.R. bei Sandböden, 80-110 mm bei lehmigen Sanden, 110-150 mm bei schluffreichen Böden (Löß) auf. Es wird deutlich, daß große Unterschiede zwischen den einzelnen Klimagebieten bestehen. Am höchsten fallen die jährlichen Versickerungsraten im Raum München aus, gefolgt von Hamburg, Frankfurt und Berlin.

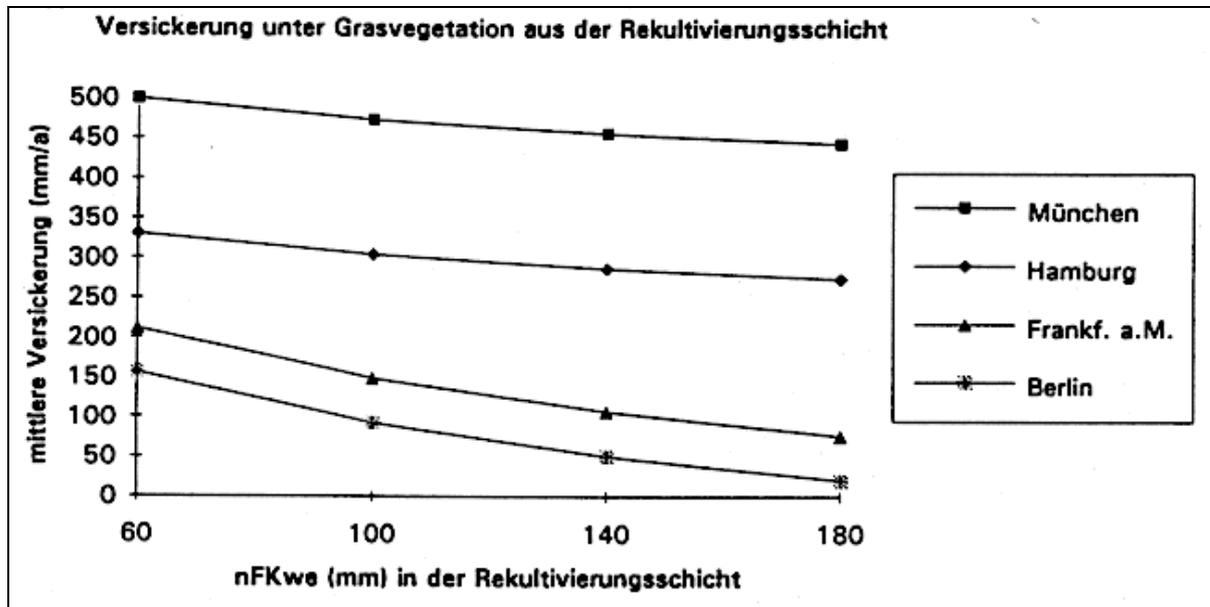


Abb. 10: Mittlere Versickerungsmengen (mm/a) aus Deponie-Rekultivierungsschichten für unterschiedliche Klimagebiete Deutschlands (langjährige Mittel)

Mit zunehmender nFKwe nimmt die Versickerung ab, weil proportional zur Speicherfähigkeit des Bodens entsprechende Anteile der Niederschläge aufgenommen werden können und der Verdunstung zur Verfügung stehen. Die Abnahme der Versickerung mit zunehmender nFKwe fällt in jedem Klimagebiet unterschiedlich aus. Sie ist in erster Linie von der klimatischen Wasserbilanz ($KWB = \text{Niederschlag} - \text{potentielle Verdunstung}$) im Sommerhalbjahr abhängig. Je höher das Wasserbilanzdefizit ist, umso stärker wird die Speicherfähigkeit der Deckschicht bei der Wasserversorgung der Pflanzen in Anspruch genommen. So ist in Klimaregionen mit negativer KWB (z.B. Raum Berlin-Brandenburg) mit einem Sickerwasseranfall von < 50 mm/a zu rechnen, wenn die Rekultivierungsschicht über eine nFKwe von > 160 mm verfügt. In Gebieten mit hohen Wasserbilanzüberschüssen (z.B. Raum München) kann die Sickerwassermenge weniger stark durch die Wahl des Deckschichtsubstrates vermindert werden.

Neben dem Deckschichtsubstrat übt das Relief einen erheblichen Einfluß auf den Wasserhaushalt aus. Der Einfluß des Reliefs auf die Grundwasserneubildung ist beispielhaft für den Standort Frankfurt für vier unterschiedliche Rekultivierungssubstrate in Abb. 2 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen die langjährigen Mittelwerte für Nord- und Südhänge mit unterschiedlicher Neigung im Verhältnis zur Ebene.

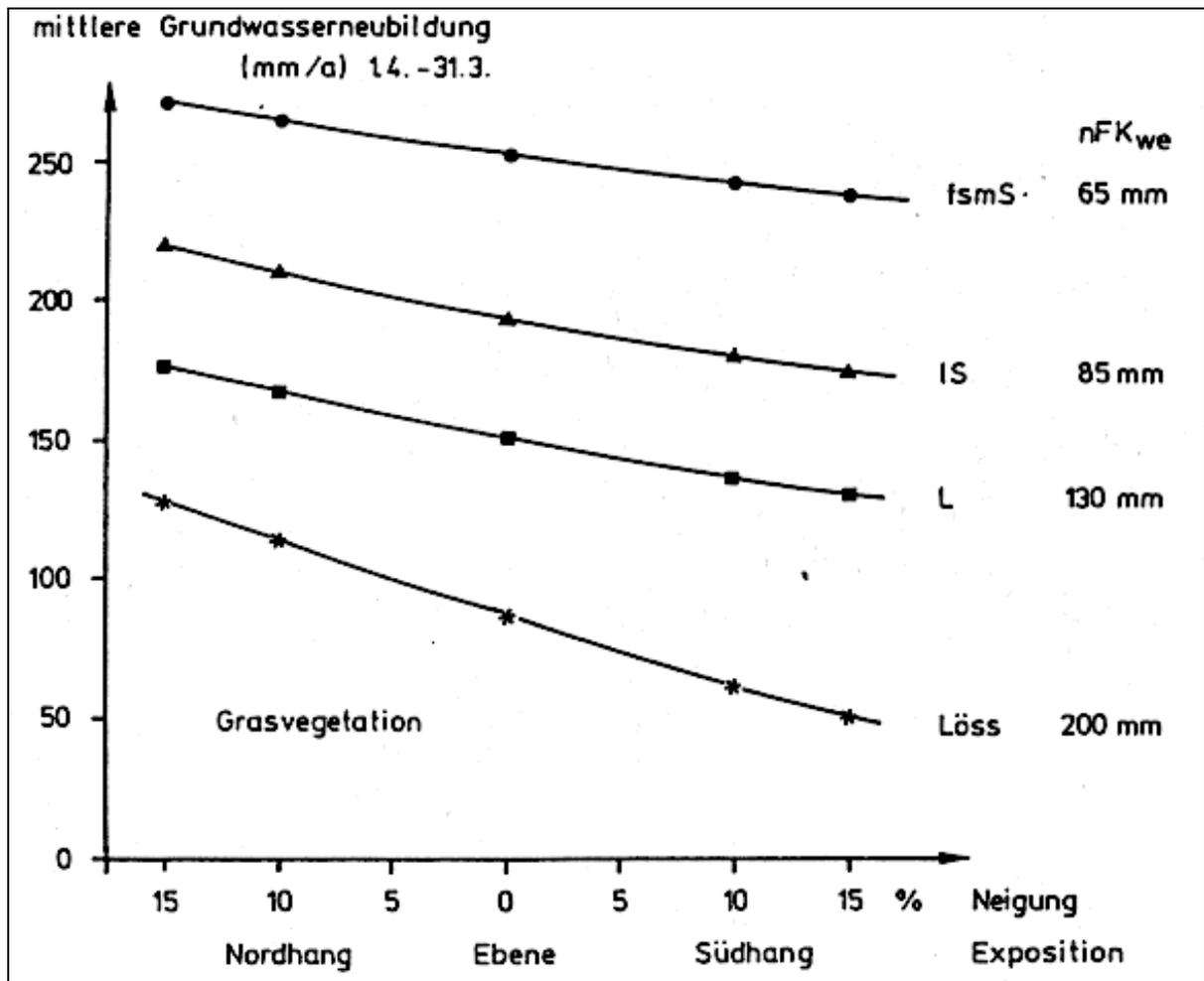


Abb. 11: Mittlere Grundwasserneubildung (mm/a) unter Grasvegetation im Raum Frankfurt für unterschiedliche Böden und Reliefbedingungen.

Je höher die nFKwe, desto stärker kommen die Reliefeinflüsse zum Tragen: bei Lössen fällt bei südexponierten Standorten die Versickerung um bis ca. 30 % geringer aus, bei Sanden hingegen lediglich um 5 %. Für Nordhänge gelten umgekehrte Bedingungen. Hauptursache für die Reliefwirkung sind die veränderten Einstrahlungsbedingungen gegenüber einem ebenen Standort. Für die Lageauswahl von Deponien sowie für die Oberflächengestaltung läßt sich aus diesen Ergebnissen der Schluß ziehen, daß südexponierte Standorte zu bevorzugen, langgestreckte Nordhänge möglichst zu vermeiden sind.

4. Einfluß der Temperatur

In Abb. 3 werden Ergebnisse einer viertägigen Temperaturmessung an zwei Stellen der Reaktivierungsschicht des Monte Scherbelino (Hausmülldeponie im Raum Frankfurt a.M., zum Meßzeitpunkt ohne Oberflächenabdichtung) dargestellt. Standort A ist nur gering, Standort B hingegen stark beeinflusst durch die Wärmeentwicklung im Müllkörper. Der Einfluß setzt sich am Standort B bis in den obersten Meter der Abdeckung fort; der mittlere Temperaturgradient zwischen 2 und 3 m Tiefe beträgt an dieser Stelle 5.5 °C/m.

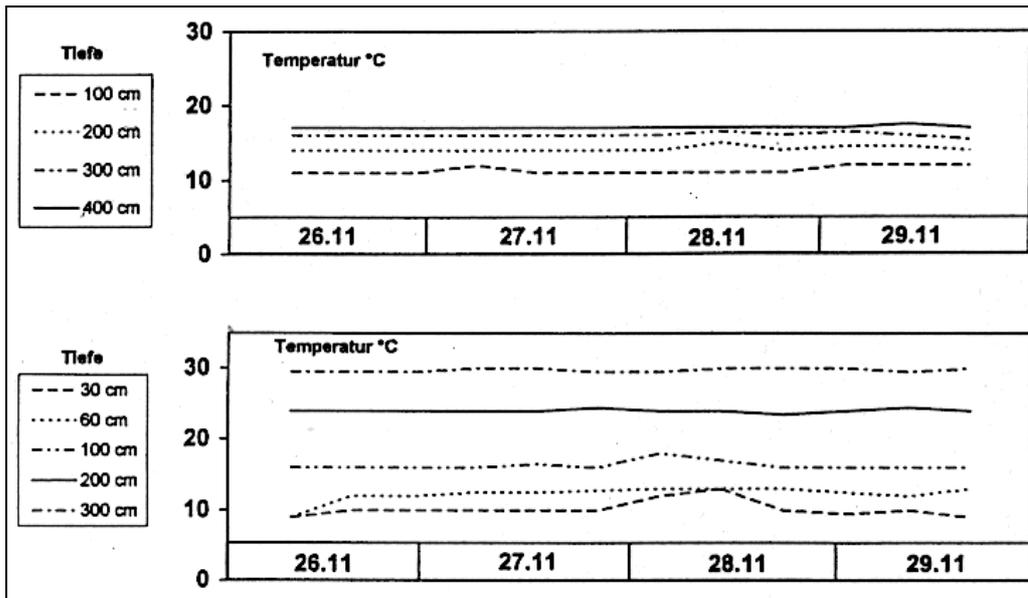


Abb. 12: Temperaturtiefenprofile von zwei Stellen der Deponie "Monte Scherbelino" (Frankfurt)

Standort A (oben) mit geringem und Standort B (unten) mit großem Temperatureinfluß aus dem Deponiekörper

Isotherme Modellberechnungen zur Versickerung für diese Standorte ergaben eine mittlere Sickerwassermenge von ca. 210 mm/a für lehmigen Sand und ca. 120 mm/a für lehmigen Schluff. Da Sickerwasser überwiegend im Winterhalbjahr anfällt, hätten zum Beprobungstermin (November) in der Rekultivierungsdeckschicht relativ hohe Wassergehalte auftreten müssen. Die zur Beprobung geöffneten Schürfe wiesen jedoch trockene Substrate auf. Ähnliche Unsicherheiten bei der Beurteilung der Sickerwassermengen traten auf der Hausmülldeponie Aurach (Landkreis Ansbach/Nürnberg) auf. Nach einem Berechnungsverfahren von Renger und Wessolek (1990) wäre dort mit einem Sickerwasseranfall von 157 +/- 20 mm/a zu rechnen. Da der gemessene Drainabfluß nur etwa halb so groß ist (persönl. Mitteilung von Herrn Kreß, Landratsamt Ansbach), kann auch bei dieser Deponie mit einer verstärkten Verdunstung bzw. verminderten Versickerung aufgrund der Deponietemperaturen gerechnet werden. Anscheinend führt die ausschließlich isotherme Modellierung des Wasserhaushaltes zu einer Überschätzung der Wassergehalte und ggf. der Sickerwassermenge.

Um zu einer ersten quantitativen Einschätzung der wärmeinduzierten Wasserflüsse zu kommen, wurden theoretische Überlegungen zum gekoppelten Feuchte- und Wärmetransport angestellt. Im wasserungesättigten Boden bewegt sich Wasser als

- flüssiges Wasser aufgrund der Gravitation
- flüssiges Wasser aufgrund von Matrixpotentialgradienten
- Wasserdampf aufgrund von Dampfdichtegradienten.

Das Matrixpotential und die Wasserdampfdichte sind abhängig von der Temperatur, die Wasserdampfdichte darüber hinaus vom Matrixpotential. Daher bewirken Temperaturgradienten einen zusätzlichen Transport von Wasser und Wasserdampf, und zwar von warmen zu kalten Bodenzonen. Abb. 4 und 5 zeigen die wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten in einem Sand mit 15 % Schluff und Ton und in einem schluffigen Lehm bei 20 °C. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeiten K_{liq} beruht auf gemessenen Werten, die anderen Trans-

portkoeffizienten sind nach Philip und de Vries (1957) mit Hilfe der gemessenen Wassergehalts-Matrixpotentialfunktionen berechnet. Multipliziert man die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit K_{liq} (bzw. den isothermen Dampfdiffusionskoeffizienten K_{vap}) mit dem Matrixpotentialgradienten, erhält man den Fluß von flüssigem Wasser (bzw. Wasserdampf) aufgrund eines Matrixpotentialgradienten. Multipliziert man den anisothermen Wasserleitfähigkeitskoeffizienten D_{Tliq} (bzw. den anisothermen Dampfdiffusionskoeffizienten D_{Tvap}) mit dem Temperaturgradienten, ergibt sich der Fluß von flüssigem Wasser (Wasserdampf) aufgrund eines Temperaturgradienten. Nur bei geringen Wassergehalten ist in Lehmen und Sanden der flüssige Transport aufgrund eines Matrixpotentialsgradienten nicht dominant. Unter diesen Bedingungen kann abhängig von den vorliegenden Temperaturgradienten die Wasserdampfdiffusion bedeutsam sein. Obige Wasserflüsse können allerdings nicht einfach addiert werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen.

Rekultivierungsschichten von Deponien mit Wärmeentwicklung unterscheiden sich von sonstigen Böden dadurch, daß im Jahresmittel ein nach oben gerichteter Temperaturgradient auftritt. Dieser Temperaturgradient führt zu einer Abfuhr von Wasserdampf nach oben. Durch den Anstieg des Matrixpotentials mit der Temperatur wird ein nach oben gerichteter Transport von flüssigem Wasser ausgelöst. Um die Bedeutung der temperaturabhängigen Flüsse abzuschätzen, wurden mit dem Modell des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports überschlägige Berechnungen des Wassergehalts einer Rekultivierungsschicht aus schluffigem Lehm (Abb. 5) durchgeführt. Dabei wurden die saisonalen Temperaturveränderungen berücksichtigt und ein Temperaturgradient von 2 °C/m (im Jahresmittel) vorgegeben. Es zeigt sich, daß die jährliche Nettoversickerung von ca. 120 mm aufgrund des temperaturabhängigen Transports von flüssigem Wasser nur um 2 % und aufgrund des temperaturabhängigen Transports von Wasserdampf um 0,3 % abnimmt. Unter den mitteleuropäischen Klimabedingungen scheint also der Temperatureinfluß auf den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten vernachlässigbar zu sein.

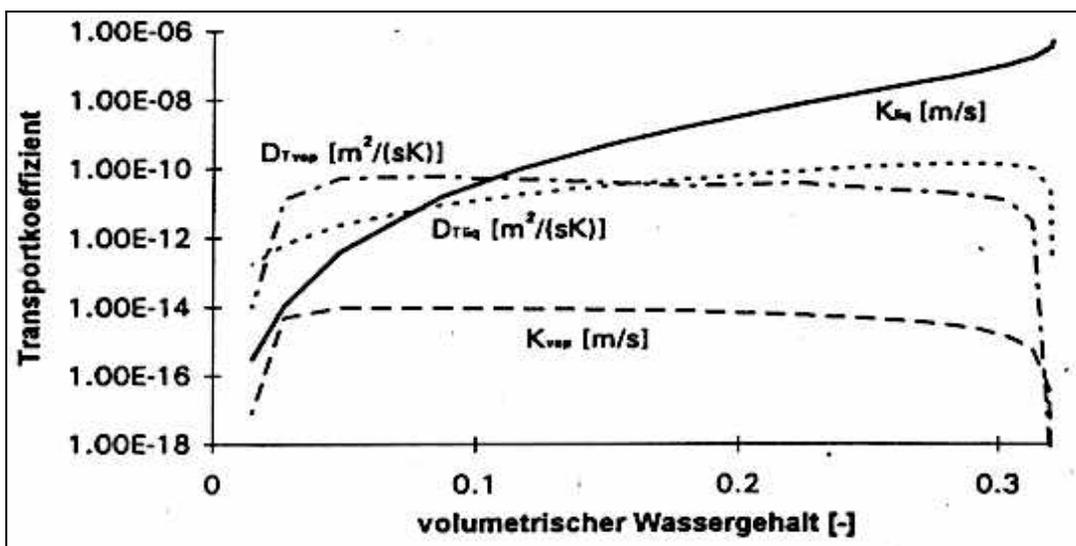


Abb. 13: Transportkoeffizienten in einem wasserungesättigten Sand mit 15 % Schluff und Ton bei 20 °C .

Koeffizienten des Transports von flüssigem Wasser aufgrund der Gravitation und eines Matrixpotentialgradienten (K_u), von Wasserdampf aufgrund eines Temperaturgradienten (D_{Tvap}). D_{Tliq} spiegelt den Transport von flüssigem Wasser aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Matrixpotentials wieder

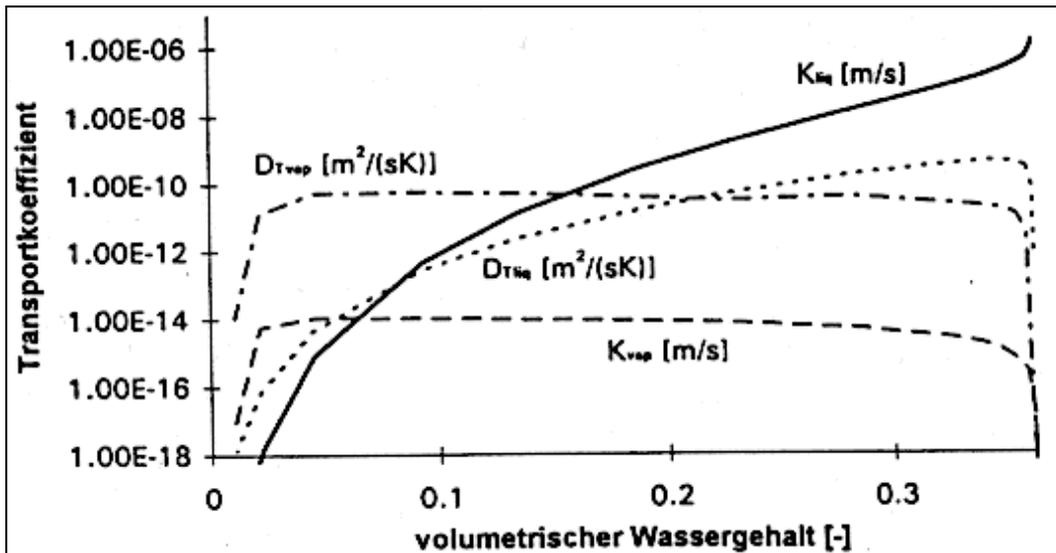


Abb. 14: Transportkoeffizienten in einem wasserungesättigten schluffigen Lehm bei 20 °C.

Diese Schlußfolgerung kann nicht als endgültig betrachtet werden, da eine Reihe von Prozessen nicht berücksichtigt werden konnten (z.B. Einfluß der erhöhten Bodentemperatur auf die Evapotranspiration) und offensichtlich Widersprüche zu den Beobachtungen im Gelände bestehen. Wir halten es deshalb für unabdingbar, zukünftig umfangreiche Geländemessungen auf bestehenden Deponien durchzuführen, um eindeutige Aussagen treffen zu können. Eine richtige Abschätzung der Sickerwassermenge ist vor allem für die Erstellung von Sanierungskonzepten für alte, noch warme Hausmülldeponien wichtig. So könnte zusätzlich zu den Klimabedingungen und den physikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht die Deponietemperatur ein wichtiger Parameter bei der Entscheidung sein, ob und wann Oberflächenabdichtungen einzubauen sind.

5. Literatur

- DÖLL, P. und G. WESSOLEK (1995): Wasserhaushalt mineralischer Deponiebasisabdichtungen unter dem Einfluß von Temperaturgradienten. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., im Druck.
- PHILIP, J.R. und D.A. de VRIES (1957): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. Mitt. Institut für Wasserwesen, 38b, Bundeswehrhochschule München, 295-305.
- RENGER, M. und G. WESSOLEK (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderung auf die Grundwasserneubildung. Mitt. Inst. f. Wasserwesen, 38b, Bundeswehrhochschule München, 295-305.
- RIJTEMA, P.E. (1968): On the relation between transpiration, soil physical properties and crop production as a basis for water supply plans. Techn. Bulletin 58, Inst. for Land and Water Management, Wageningen
- SELLERS, W.D. (1965): Physical Climatology, The University of Chicago Press
- WESSOLEK, G., KÖNIG, R. und RENGER, M. (1992): Entwicklung und Anwendung von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen für Hangstandorte. Bodenökologie und Boden-genese, Selbstverlag der FG Bodenkunde der Techn. Universität Berlin, Heft 8

Überblick über die neueren Arbeiten und Forschungen zur Wasserhaushaltsbilanzierung mit dem HELP-Modell

Dr. N. Markwardt; pedo tec GmbH, Ingenieurbüro für Boden und Wasser, Berlin

Die bisherigen Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit der Modellierung des Wasserhaushalts von Deponien und Altablagerungen mit Hilfe des HELP-Modells (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) beziehen sich schwerpunktmäßig auf die genauere Erfassung der Verdunstungskomponenten in Oberflächenabdeckungen bzw. Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien und Altablagerungen. Diese dem Niederschlag entgegenwirkende Wasserhaushaltskomponente bestimmt neben den Niederschlägen selbst entscheidend die übrigen Komponenten Oberflächenabfluß, Versickerung, Dränschichtabfluß und Änderung der Bodenfeuchte im verdunstungswirksamen Bodenbereich.

Ausgehend von dem in der Originalversion des HELP-Modells gewählten Verdunstungsansatzes zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration (maximal wieder in die Atmosphäre verdunstete Niederschlagsmenge) aus der Tagesmitteltemperatur und der Globalstrahlung wurde eine für hiesige Klimaverhältnisse modifizierte Formel zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration gefunden, die durch vergleichende Messungen bestätigt wurde.

In der Abb. 1 ist ein Vergleich zwischen den gemessenen und gerechneten Werte der potentiellen Evapotranspiration für das hydrologische Jahr 1989 zu erkennen. Die Messungen wurden an einem wägbaren Lysimeter der Lysimeteranlage in Berlin/Dahlem durchgeführt. Das Lysimeter war mit Gras bewachsen und wurde in der Vegetationszeit zusätzlich bewässert.

Ausgehend von der so ermittelten potentiellen Verdunstung wird die aktuelle Evapotranspiration bei der Simulation unter Berücksichtigung der berechneten Bodenfeuchte im verdunstungswirksamen Bereich (Durchwurzelungstiefe) bestimmt.

Für einen unbewachsenen und grasbewachsenen lehmigen Sand konnte für einen mehrjährigen Zeitraum ein guter Vergleich zwischen gerechneten und gemessenen Werten der aktuellen Evapotranspiration und der Versickerung erzielt werden (MARKWARDT 1989). Die potentielle und auch die aktuelle Evapotranspiration von horizontalen, grasbewachsenen Standorten konnte mit dem gegenüber der HELP-Version modifizierten Verdunstungsansatz durch die Messungen für den Standort Berlin bestätigt werden (für eine flächendeckende Anwendung in der Bundesrepublik sind weitere vergleichende Verdunstungsmessungen an verschiedenen Standorten notwendig).

Insbesondere für die zum Teil sehr steilen Deponiehangbereiche muß deren exponierte Lage im Hinblick auf eine differenzierte Betrachtung der Verdunstung miteinbezogen werden. Ausgehend von der Berechnung der potentiellen Evapotranspiration von horizontalen Flächen aus der Tagesmitteltemperatur und der Globalstrahlung wird für die Berechnung der potentiellen und aktuellen Verdunstung die Neigung und Orientierung eines Hanges berücksichtigt. Bei der Simulation wird in diesen Fällen die Einstrahlung auf die Hangfläche in Abhängigkeit von der Orientierung, der Neigung und unter Berücksichtigung der vorhandenen Bewölkung umgerechnet. Bei dem hier gewählten Verdunstungsansatz ist die Erhöhung bzw. Reduzierung

der potentiellen Verdunstung direkt proportional zur verminderten (Nordorientierung) bzw. erhöhten (Südorientierung) Einstrahlung auf einer geneigten Fläche.

Während die Unterschiede in der potentiellen Verdunstung nordorientierter und südorientierter Hänge bei entsprechend steilen Böschungen an strahlungsintensiven Tagen nahezu 100 % betragen können, zeigt die Tab. 1 für den Standort Berlin die jahreszeitliche Verteilung der unterschiedlichen potentiellen Verdunstung von einer horizontalen Fläche im Vergleich zu einem um 25° nach SSW und 10° nach NNO geneigten Hang für den Berechnungszeitraum 1984 - 1988. Im 5-jährigen Mittel ergibt sich für die horizontale Fläche ein Jahressummenwert der potentiellen Evapotranspiration von 634 mm. Innerhalb dieses Zeitraums zeigt sich die Bandbreite der potentiellen Evapotranspiration von der horizontalen Fläche verdunstungsreicher und -armer Jahre (1988 bzw. 1984) mit einer jährlichen Differenz von ca. 70 mm. Die weitere Aufteilung in Monatssummenwerte macht die unterschiedliche Verteilung innerhalb der einzelnen Jahre deutlich.

Im Vergleich zu diesen Werten der horizontalen Fläche ist für den um 25° nach SSW geneigten Hang im 5-jährigen Mittel ein rechnerischer Zuwachs von ca. 40 mm vorhanden. Die Erhöhung der potentiellen Evapotranspiration ETP ist innerhalb der einzelnen Jahre generell für die Monate Januar bis April und August bis Dezember als Folge der erhöhten Gesamteinstrahlung dieser Fläche durch den günstigeren Stand zur Sonne festzustellen. Bei dem vorhandenen Neigungswinkel von 25° ergeben sich während der verdunstungsintensiven Monate Mai bis Juli näherungsweise die gleichen Werte wie für die Horizontale. Dies ist darauf zurückzuführen, daß unter den vorhandenen Bedingungen der erhöhte Strahlungsgenuß der SSW-orientierten Fläche in den frühen Nachmittagstunden durch eine Reduzierung der Sonneneinstrahlung in den Morgenstunden näherungsweise wieder kompensiert wird.

Für die um 10° nach NNO geneigte Fläche ergibt sich bei einer Abnahme der Gesamteinstrahlung folgerichtig eine reduzierte potentielle Evapotranspiration, die im 5-jährigen Mittel nur noch 594 mm beträgt. Auch auf der Basis von Monatssummenwerten ist sie immer geringer als die der horizontalen Fläche.

In den Wintermonaten ist die Änderung der potentiellen Evapotranspiration von der NNO-orientierten Fläche im Vergleich zu dem um 180° gedrehten SSW-Hang umgekehrt proportional. Die Abnahme der Gesamteinstrahlung im Vergleich zur Globalstrahlung auf die horizontale Fläche ist für diesen um 10° nach NNO geneigten Hang, bedingt durch den hohen Anteil diffuser Einstrahlung, relativ gering.

Die Tab. 2 zeigt die Rahmen eines neueren Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit der TU-Berlin durchgeführten Verdunstungsberechnungen für den Zeitraum von Juni 1993 bis Mai 1994 für zwei unterschiedlich geneigte und orientierte Hänge unter Einbeziehung der direkt am Hang gemessenen klimatologischen Parameter.

Neben den Forschungsarbeiten für eine genauere Einbeziehung der "Klimatologie", insbesondere der Verdunstung, in die Wasserhaushaltsbilanzierungen für Deponien und Altablagerungen ist im Hinblick auf die Möglichkeit einer benutzerfreundlichen Anwendung des Modells in der Bundesrepublik auch an eine Umprogrammierung des Modells gedacht bzw. z.T. schon durchgeführt worden.

Nachfolgend ist die gegenüber der Originalversion geänderte Eingabe und Ausgabe dargestellt, an der kurz die derzeit laufenden Forschungsarbeiten angesprochen werden.

Eine wesentliche Vereinfachung im Hinblick auf eine benutzerfreundliche Anwendung ist durch die Umstellung von dem ursprünglichen Duodezimalsystem auf das metrische System und den übersichtlicheren Ein- und Ausgabedateien gegeben. (Ein Benutzerhandbuch und Erläuterungen zur Theorie über die geänderten Verdunstungsberechnungen sind in diesem Zusammenhang erforderlich.)

Die Eingabe erfolgt über die drei Dateien:

Klima.dat

Boden.dat

Pflanzen.dat

In der Datei Klima.dat (Tab. 3) werden alle erforderlichen Klimadaten eingelesen. Neben den täglichen Niederschlägen (Regen) sind das zunächst wie bereits in der ursprünglichen Version die Tagesmitteltemperatur (Tmp) und die Globalstrahlung (Glob).

Sind keine Werte der Globalstrahlung vorhanden, so kann auf die Sonnenscheindauer (Sonne) zur Berechnung der Globalstrahlung zurückgegriffen werden.

Weiterhin ist die Möglichkeit gegeben gemäß der TA-Siedlungsabfall die potentielle Verdunstung nach HAUDE zu berechnen. Hierzu können bei der Simulation mit dem modifizierten HELP Modell die z.B. direkt auf der Deponie gemessenen 14° Werte der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit (Tmp 14, Feu 14) verwendet werden.

Ein bislang noch nicht genügend berücksichtigter Faktor ist die Windgeschwindigkeit (Wind). Diese Komponente sollte zukünftig mitberücksichtigt werden für die Ermittlung der Verdunstung von Deponienhangbereichen und von höheren Vegetationsbeständen (Einbeziehung der Interzeptionsverdunstung).

Desweiteren wird in der neueren Literatur der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Fehler der Niederschlagsmessung hingewiesen, so daß es durch entsprechende Korrekturverfahren (KFAK) gilt, die Niederschläge zu korrigieren. Eigene Messungen an der Lysimeteranlage in Berlin haben in den Jahren 1990-1993 eine Abweichung zwischen den in 1m Höhe und den am Boden gemessenen Niederschlägen von 8 - 14 % ergeben.

Die Dateien boden.dat (Tab. 4) und pflanzen.dat (Tab. 5) zeigen die geänderten Eingabeformate für die bodenphysikalischen und vegetationsspezifischen Parameter.

Die Datei monats.erg (Tab. 6) zeigt einen Ausschnitt der Monats- und Jahresergebnisse der Berechnung für das Jahr 1993. Die Ergebnisse sind auf der Basis von Monatssummen- bzw. Jahressummenwerten in der Dimension (mm) bzw. (m^3) dargestellt. Der jahreszeitliche Verlauf der Komponente Versickerung durch die Abdeckung zeigt, daß bei den in Brandenburg vorhandenen klimatologischen Bedingungen des Jahres 1993 (Niederschlag = 519 mm. DWD Angermünde) eine rechnerische Versickerung nur in den Monaten Januar, Februar und Dezember auftritt.

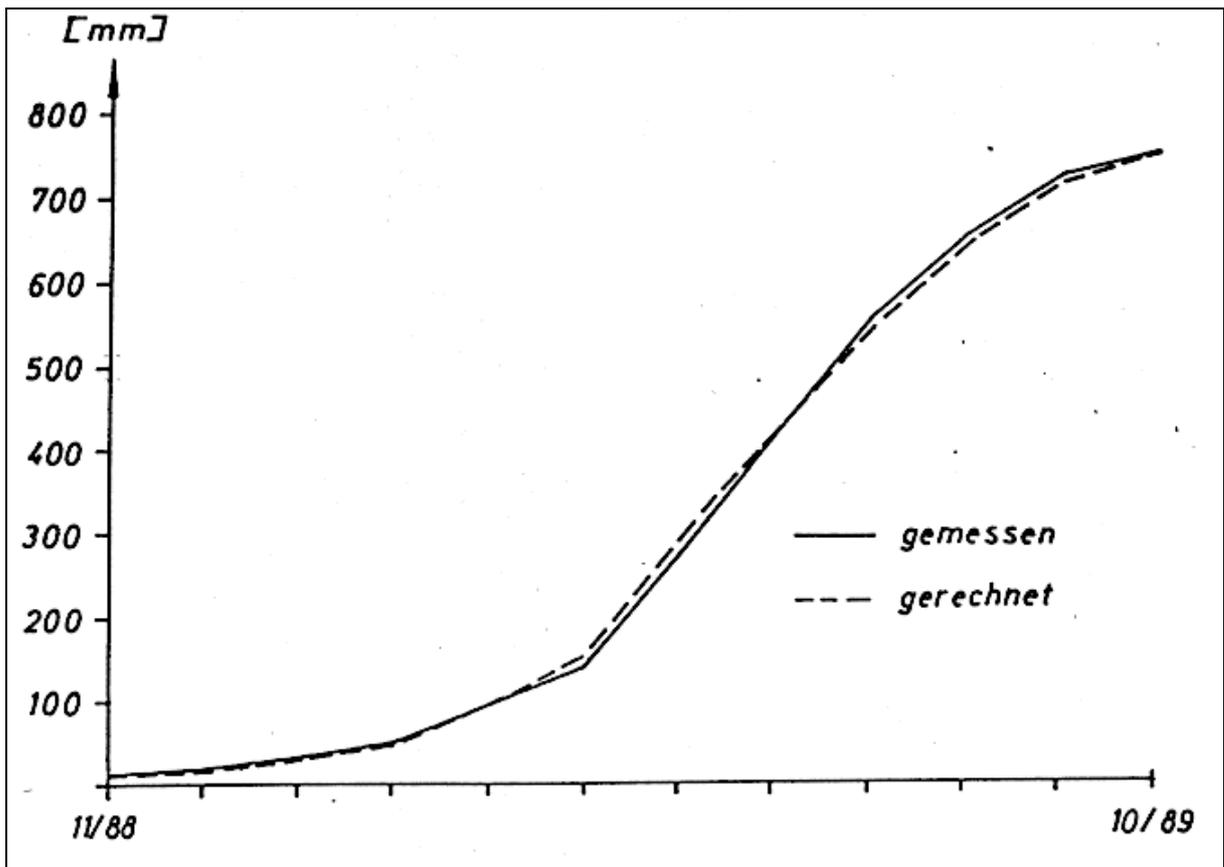


Abb. 15: Kumulative Monatswerte der potentiellen Evapotranspiration für das hydrologische Jahr 1989 Berlin (horizontal)

| Potentielle Evapotranspiration [mm] | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-----|-------|
| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Jahr |
| horiz. | 8.2 | 14.0 | 40.0 | 68.4 | 87.5 | 83.8 | 95.1 | 106.7 | 50.4 | 31.0 | 12.3 | 5.2 | 602.6 |
| 84 SSW25° | 10.8 | 17.0 | 46.2 | 72.9 | 87.7 | 82.6 | 95.0 | 112.9 | 54.3 | 37.3 | 16.5 | 7.0 | 640.2 |
| NNO10° | 6.9 | 12.3 | 36.0 | 63.8 | 84.2 | 81.3 | 91.6 | 99.8 | 47.0 | 27.3 | 10.1 | 4.3 | 564.6 |
| horiz. | 7.1 | 13.9 | 26.5 | 59.8 | 109.0 | 93.9 | 123.5 | 96.4 | 58.5 | 30.1 | 9.9 | 6.7 | 635.3 |
| 85 SSW25° | 9.4 | 18.5 | 28.7 | 63.8 | 110.7 | 92.9 | 124.2 | 100.2 | 64.8 | 36.7 | 12.3 | 9.1 | 671.3 |
| NNO10° | 5.9 | 11.5 | 24.7 | 55.8 | 103.9 | 90.8 | 118.3 | 91.0 | 53.7 | 26.3 | 8.5 | 5.5 | 595.9 |
| horiz. | 6.4 | 12.5 | 27.5 | 40.7 | 113.5 | 127.6 | 116.9 | 95.6 | 50.5 | 36.4 | 16.0 | 6.5 | 650.1 |
| 86 SSW25° | 7.6 | 15.8 | 30.4 | 41.2 | 117.2 | 128.5 | 117.0 | 99.0 | 55.8 | 45.7 | 22.5 | 9.3 | 690.0 |
| NNO10° | 5.8 | 10.7 | 25.3 | 39.1 | 107.2 | 121.8 | 112.3 | 90.5 | 46.5 | 31.1 | 12.8 | 5.1 | 608.2 |
| horiz. | 6.8 | 11.9 | 35.8 | 72.6 | 86.5 | 91.5 | 116.0 | 81.4 | 59.2 | 36.3 | 7.3 | 6.1 | 611.4 |
| 87 SSW25° | 9.9 | 16.0 | 41.5 | 78.1 | 87.2 | 90.2 | 116.1 | 83.4 | 64.4 | 45.8 | 8.1 | 8.4 | 649.1 |
| NNO10° | 5.3 | 9.8 | 32.1 | 67.3 | 82.9 | 88.7 | 111.5 | 77.6 | 54.9 | 31.0 | 6.8 | 5.0 | 572.9 |
| horiz. | 9.3 | 15.6 | 31.0 | 78.0 | 124.4 | 95.1 | 116.8 | 98.5 | 54.7 | 30.7 | 11.9 | 6.1 | 672.1 |
| 88 SSW25° | 13.3 | 19.7 | 34.3 | 84.3 | 128.0 | 94.4 | 117.1 | 102.6 | 59.8 | 38.2 | 16.5 | 8.1 | 716.3 |
| NNO10° | 7.3 | 13.3 | 28.5 | 72.3 | 117.6 | 91.7 | 112.2 | 92.9 | 50.6 | 26.5 | 9.6 | 5.0 | 627.5 |
| 84 horiz. | 7.6 | 13.6 | 32.2 | 63.9 | 104.2 | 98.1 | 113.7 | 95.7 | 54.7 | 32.9 | 11.5 | 6.1 | 634.3 |
| / SSW25° | 10.2 | 17.4 | 36.2 | 68.1 | 106.2 | 97.7 | 113.9 | 99.6 | 59.8 | 40.7 | 15.2 | 8.4 | 673.4 |
| 88 NNO10° | 6.2 | 11.5 | 29.3 | 59.7 | 99.2 | 94.9 | 109.2 | 90.4 | 50.5 | 28.4 | 9.6 | 5.0 | 593.8 |

Tab. 9: Potentielle Evapotranspiration ETP von der horizontalen Fläche im Vergleich zu den um 25° nach SSW und 10° nach NNO geneigten Hängen 1984-88

| | horiz. [mm] | Nord 9° [mm] | Süd 6° [mm] |
|-------|----------------|-----------------|----------------|
| 6/93 | 107,0 | 103,6 | 108,4 |
| 7/93 | 101,7 | 98,8 | 102,9 |
| 8/93 | 91,8 | 87,6 | 93,8 |
| 9/93 | 45,0 | 42,3 | 46,4 |
| 10/93 | 29,2 | 25,8 | 31,2 |
| 11/93 | 6,9 | 6,3 | 7,3 |
| 12/93 | 5,2 | 4,6 | 5,6 |
| 1/94 | 6,4 | 5,7 | 6,9 |
| 2/94 | 14,6 | 12,4 | 16,0 |
| 3/94 | 33,5 | 31,0 | 34,9 |
| 4/94 | 71,5 | 67,4 | 73,6 |
| 5/94 | 95,8 | 91,7 | 97,7 |
| Summe | 608,6 | 577,2 | 624,7 |

Tab. 10: Potentielle Evapotranspiration von einem um 9° nach N und einem um 6° nach S geneigten Hang in Brandenburg im Vergleich zu einer horizontalen Fläche

Eingabedatei: Klima.dat

| KFAK: 1.10 Datum | Regen [mm] | ϕ Temp [°] | Temp14 [°] | Feu14 [%] | Glob Sonne [mW/cm ²] | Sonne [h] | Wind [m/s] |
|---------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------|-------------------------------------|--------------|---------------|
| 01.01.1993 | .9 | 2.1 | 4.6 | 88.0 | 7.6 | 4.9 | 1.6 |
| 02.01.1993 | .0 | -4.1 | 8.6 | 95.0 | 27.0 | 5.5 | 1.0 |
| 03.01.1993 | .9 | -5.3 | 7.0 | 91.0 | 41.3 | 4.6 | 0.9 |
| 04.01.1993 | 4.2 | -4.8 | 5.2 | 96.0 | 64.5 | 3.3 | 2.1 |
| 05.01.1993 | 1.7 | .9 | 6.7 | 87.0 | 18.6 | 4.2 | 1.2 |
| 06.01.1993 | .5 | -1.0 | 5.1 | 74.0 | 30.1 | .0 | 1.6 |
| 07.01.1993 | .0 | -5.8 | 5.0 | 81.0 | 32.0 | .0 | 1.0 |
| 08.01.1993 | .7 | -6.8 | 2.3 | 84.0 | 51.1 | .6 | 1.3 |
| 09.01.1993 | .1 | -5.8 | -2.5 | 76.0 | 72.4 | .7 | 2.4 |
| 10.01.1993 | .1 | -12.4 | -3.5 | 70.0 | 41.1 | .0 | 1.0 |
| 11.01.1993 | .0 | -17.9 | -3.0 | 81.0 | 92.9 | .0 | 3.1 |
| 12.01.1993 | 5.0 | -13.6 | -3.6 | 83.0 | 18.8 | .0 | 2.1 |
| 13.01.1993 | .0 | -19.1 | -6.3 | 87.0 | 58.5 | 2.2 | 1.9 |
| 14.01.1993 | .0 | -21.6 | -5.5 | 77.0 | 73.1 | 4.1 | 3.3 |
| 15.01.1993 | .0 | -14.8 | -9.6 | 88.0 | 56.8 | 1.1 | 1.7 |
| 16.01.1993 | .0 | -12.9 | -3.3 | 87.0 | 33.4 | 2.4 | 1.5 |
| 17.01.1993 | .0 | -16.5 | -3.2 | 83.0 | 82.6 | 6.1 | 1.3 |
| 18.01.1993 | .0 | -13.6 | -0.9 | 79.0 | 42.5 | 2.5 | 1.8 |
| 19.01.1993 | .0 | -10.3 | 3.8 | 79.0 | 30.5 | .8 | 2.2 |
| 20.01.1993 | .1 | -15.0 | 1.6 | 80.0 | 53.0 | .0 | 1.4 |

Tab. 11: Geänderte Klimadateneingabe (Ausschnitt)

| Eingabedatei: Boden.dat | | | |
|-------------------------|------------|--|-------------------|
| Deponie *** | | | |
| GRASSBESTAND | | | |
| 11.7.94 | | | |
| : | 3 | := Anzahl der Bodenschichten | [] |
| : | 1 | := Abdichtung vorhanden? | [] |
| : | 0.000000 | := liner leakage fraktion | |
| : | 1.0 | := frunof | [mm] |
| : | 15.0 | := SCS runoff curve number | [] |
| : | 1000.00 | := Bodenfläche | [m ²] |
| : | 0 | := Bodentyp | [] |
| : | 0.0 | := Schneewasser am Anfang der Simulation | [mm] |
| : | 730.0 | := Durchwurzelungstiefe | [mm] |
| : | 10.0 | := Neigungswinkel der Fläche | [°] |
| : | 180.0 | := Flächenazimut S-O-N: [-]; S-W-N: [+] | [°] |
| : | 52.5 | := geographische Breite der Fläche | [°] |
| 1.Schicht | 1500. | | |
| : | 30. | | |
| : | 570. | | |
| : | | Schichtdicke | [mm] |
| 1.Schicht | 0.382 | | |
| : | 0.351 | | |
| : | 0.335 | | |
| : | | Bodenporosität | [vol/vol] |
| 1.Schicht | 0.284 | | |
| : | 0.309 | | |
| : | 0.313 | | |
| : | | Feldkapazität | [vol/vol] |
| 1.Schicht | 0.174 | | |
| : | 0.261 | | |
| : | 0.161 | | |
| : | | Welkepunkt | [vol/vol] |
| 1.Schicht | 4. | | |
| : | 4. | | |
| : | 4. | | |
| : | | kapillares Steigvermögen | [√mm/Tag] |
| 1.Schicht | 0.0000010 | | |
| : | 0.0000014 | | |
| : | 0.00000096 | | |
| : | | gesättigte Durchlässigkeit Kf | [m/s] |

Tab. 12: Geänderte Bodendateneingabe

| Ausgabedatei Monats.org | | angebaute Kultur 1993: Gras | | | | | |
|--|-------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Monatssummenwerte und Monatsmittelwerte für 1993 | | | | | | | |
| | | Jan/Jul | Feb/Aug | Mrz/Sep | Apr/Okt | Mai/Nov | Jun/Dez |
| E Niederschlag | [mm] | 40.4 | 22.0 | 9.6 | 14.9 | 44.5 | 52.5 |
| | | 95.0 | 41.8 | 77.2 | 26.6 | 23.6 | 71.1 |
| E Schneehöhenäquivalent | | 0.0 | 0.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | [cm] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.6 | 0.4 |
| E Oberflächenabfluss | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | [mm] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| E aktuelle Evapotranspiration | | 5.0 | 8.4 | 23.4 | 50.0 | 62.8 | 61.9 |
| | [mm] | 72.8 | 52.4 | 38.1 | 24.5 | 5.6 | 4.6 |
| E potentielle Evapotranspiration | | 8.1 | 10.8 | 33.4 | 73.3 | 105.4 | 97.7 |
| | [mm] | 99.0 | 85.8 | 43.4 | 26.7 | 7.5 | 5.7 |
| Versickerung durch die Abdeckung | | 35.4 | 13.4 | 0.2 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |
| | [mm] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 53.4 |
| Dränschichtabfluss | | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | [mm] | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| φ Globalstrahlung | | 73.2 | 94.6 | 237.0 | 414.9 | 494.5 | 474.8 |
| | [mWh/cm²/d] | 453.7 | 406.9 | 234.6 | 165.9 | 62.2 | 43.2 |
| φ Sonnenscheindauer | | 2.7 | 1.3 | 5.5 | 9.1 | 9.8 | 8.2 |
| | [h] | 7.9 | 8.0 | 4.0 | 4.1 | 0.8 | 0.8 |

| Jahressummenwerte und Jahresdurchschnittswerte für 1993 | | | |
|---|-------|--------|--------|
| | [mm] | [m**3] | [%] |
| Niederschlag | 519.2 | 519.20 | 100.00 |
| Oberflächenabfluss | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| aktuelle Evapotranspiration | 409.7 | 409.68 | 78.91 |
| potentielle Evapotranspiration | 596.8 | 596.82 | |
| Versickerung durch die Abdichtung | 102.5 | 102.50 | 19.74 |
| Dränschichtabfluss | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| Bodenwasser am Anfang des Jahres | 426.0 | 425.96 | |
| Bodenwasser am Ende des Jahres | 433.0 | 432.98 | |
| Schneewasseräquivalent am Anfang des Jahres | 0.0 | 0.00 | |
| Schneewasseräquivalent während des Jahres | 49.0 | 48.95 | |
| Schneewasseräquivalent am Ende des Jahres | 0.0 | 0.00 | |
| Jahreswasserbilanzierung | 0.0 | 0.00 | 0.00 |

Tab. 14: Geänderte Ausgabedatei (Ausschnitt)

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| Abb. 1: | Schematische Darstellung des Druck-Setzungsgerätes..... | 36 |
| Abb. 2: | Schematische Darstellung des Zuggerätes | 37 |
| Abb. 3: | Platzbedarf der Regelabdichtung am Rande einer Deponie /10/..... | 60 |
| Abb. 4: | Geplantes Oberflächenabdichtungssystem der Verbunddeponie Bielefeld-Herford /33/ | 60 |
| Abb. 5: | Modelldeponie mit „KRAU“-Abdichtungssystem | 62 |
| Abb. 6: | Perkulationsrate in Abhängigkeit von Niederschlag und Evapotranspiration des Deponieabschnitts IV (Federlesmahd)..... | 72 |
| Abb. 7: | Perkulationsrate in Abhängigkeit von Niederschlag und Evapotranspiration auf Deponiefläche II (Hintere Halde)..... | 73 |
| Abb. 8: | Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für die Deponiefläche IV (Federlesmahd) | 74 |
| Abb. 9: | Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für die Fläche II ("Hintere Halde") | 75 |
| Abb. 10: | Mittlere Versickerungsmengen (mm/a) aus Deponie-Rekultivierungsschichten für unterschiedliche Klimagebiete Deutschlands (langjährige Mittel) | 81 |
| Abb. 11: | Mittlere Grundwasserneubildung (mm/a) unter Grasvegetation im Raum Frankfurt für unterschiedliche Böden und Reliefbedingungen. | 82 |
| Abb. 12: | Temperaturtiefenprofile von zwei Stellen der Deponie "Monte Scherbelino" (Frankfurt)..... | 83 |
| Abb. 13: | Transportkoeffizienten in einem wasserungesättigten Sand mit 15 % Schluff und Ton bei 20 °C. | 84 |
| Abb. 14: | Transportkoeffizienten in einem wasserungesättigten schluffigen Lehm bei 20 °C. 85 | |
| Abb. 15: | Kumulative Monatswerte der potentiellen Evapotranspiration für das hydrologische Jahr 1989 Berlin (horizontal) | 89 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Tab. 1: | Lysimetervarianten mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen (-abdeckungen) | 39 |
| Tab. 2: | Gründe für kontrollierbare, reparierbare Deponieabdichtungssysteme..... | 49 |
| Tab. 3: | Anforderungen an ein kontrollierbares Abdichtungssystem /18/..... | 51 |
| Tab. 4: | Kriterien zur Bewertung kontrollierbarer Oberflächenabdichtungen | 59 |
| Tab. 5: | Wasserhaushalt der Ist-Situation "Federlesmahd" | 71 |
| Tab. 6: | Wasserhaushalt der Ist-Situation "Hintere Halde" | 72 |
| Tab. 7: | Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I.. | 74 |
| Tab. 8: | Wasserhaushalt einer mineralischen Oberflächenabdichtung für Deponieklasse I.. | 75 |
| Tab. 9: | Potentielle Evapotranspiration ETP von der horizontalen Fläche im Vergleich zu den um 25° nach SSW und 10° nach NNO geneigten Hängen 1984-88 | 90 |
| Tab. 10: | Potentielle Evapotranspiration von einem um 9° nach N und einem um 6° nach S geneigten Hang in Brandenburg im Vergleich zu einer horizontalen Fläche | 90 |
| Tab. 11: | Geänderte Klimadateneingabe (Ausschnitt) | 91 |
| Tab. 12: | Geänderte Bodendateneingabe..... | 92 |
| Tab. 12: | Fortsetzung Geänderte Bodendateneingabe | 93 |
| Tab. 13: | Geänderte Pflanzendateneingabe (Ausschnitt) | 93 |
| Tab. 14: | Geänderte Ausgabedatei (Ausschnitt)..... | 94 |

Indexverzeichnis

B

| | |
|----------------------|----|
| Bentonit | |
| Allgemeines | 43 |
| Bodenluftanalyse | |
| Wasserrückhalt | 25 |

D

| | |
|---------------------------------------|-------|
| Deponieabdichtungssysteme | |
| Beispiele | 57 |
| kontrollierbare | 54 |
| Deponiegasbehandlung | |
| Oberflächenabdichtung | 20 |
| Deponiegaskomponenten | |
| Oberflächenabdichtung | 19 |
| Deponiekörper | |
| Abbauverhalten von organischen | |
| Schadstoffen | 21 |
| Deponiegasbehandlung | 20 |
| Deponiegaskomponenten | 19 |
| Druck-Setzungsgerät | 35 |
| Großödometer | 32 |
| mechanische Eigenschaften | 34 |
| Mobilisierungs- und | |
| Konsolidierungsvorgänge | 27 |
| Niederschlagseintrag | 24 |
| Schadstoffmobilisierung | 26 |
| Setzungsmessungen | 33 |
| Verbundforschungsvorhaben | 4, 17 |
| Wasserhaushalt von Landschaftskörpern | |
| | 9, 38 |
| Zeitsetzungsverhalten | 32 |
| Zuggerät | 37 |
| Zugversuche | 34 |

Deponie-Rekultivierung

| | |
|---------------------------------------|--------|
| Allgemeines | 14, 80 |
| Einfluß der Temperatur | 82 |
| Einfluß von Klima, Bodeneigenschaften | |
| und Relief auf die Versickerung | 80 |
| Oberflächenabdichtung | 14, 80 |
| Deponiewasserhaushalt | |
| Oberflächenabdichtung | 6, 24 |
| Druck-Setzungsgerät | 35 |

E

| | |
|-----------------------------|--------|
| Einkapselung | |
| mineralische Barriere | 10, 40 |
| Emission | |
| Allgemeines | 18 |

F

| | |
|-----------------------------|--------|
| Fallbeispiele | |
| Oberflächenabdichtung | 69, 74 |

K

| | |
|---------------------------------|----|
| kapillARBrechende Sperrschicht | |
| Oberflächenabdichtung | 20 |
| Kompostfilterschicht | |
| Oberflächenabdichtung | 20 |
| kontrollierbare | |
| Deponieabdichtungssysteme | 54 |

L

| | |
|------------------------|-------|
| Lysimeter | 39 |
| Lysimeterversuch | 9, 38 |

M

| | |
|------------------------|--------|
| mineralische Barriere | |
| Allgemeines | 10, 40 |
| Austrocknung | 42 |
| Bentonit | 43 |
| Frost-Tau-Zyklen | 42 |
| Schrumpfung | 41 |
| Wasserhaushalt | 40 |

O

| | |
|--|--------|
| Oberflächenabdichtung | |
| Abbauverhalten von organischen | |
| Schadstoffen | 21 |
| Anforderungen | 50, 51 |
| Austrocknung | 42 |
| Begriffe | 44 |
| Bentonit | 43 |
| Beständigkeit | 46 |
| Deponiegasbehandlung | 20 |
| Deponiegaskomponenten | 19 |
| Deponie-Rekultivierung | 14, 80 |
| Deponiewasserhaushalt | 6, 24 |
| Einfluß | 21 |
| Einfluß auf das Emissionsverhalten | 5, 18 |
| Einfluß auf die Sickerwasseremissionen | |
| | 6, 24 |
| Einfluß der Temperatur | 82 |
| Einfluß von Klima, Bodeneigenschaften | |
| und Relief auf die Versickerung | 80 |
| Fallbeispiel Wasserhaushalt | 74 |
| Fallbeispiel Wasserhaushalt Hintere | |
| Halde | 72 |
| Fallbeispiel Perkolationsrate | 71, 72 |

| | | | |
|--------------------------------------|------------|---------------------------------------|------------|
| Fallbeispiel Wasserhaushalt | | Setzung..... | 8, 31 |
| Federlesmahd..... | 71 | System..... | 45 |
| Fallbeispiele Altablagerungen | | Umweltauswirkungen | 67 |
| Federlesmahd und Hintere Halde ... | 69 | Umweltverträglichkeit | 11, 13, 44 |
| Forschungsbedarf..... | 46 | Verringerung von Niederschlägen | 69 |
| Frost-Tau-Zyklen | 42 | Wasserbarriere | 45 |
| Gasbarriere..... | 46 | Wasserbilanzierung..... | 16 |
| geoökologische Aspekte | 68 | Wasserhaushalt | 14, 40, 80 |
| HELP-Modell | 16, 86 | Wasserhaushalt von Landschaftskörpern | |
| kapillarbrechende Sperrschicht..... | 20 | | 9, 38 |
| Kenndaten-Ermittlung | 8, 31 | Wasserhaushaltsbilanzierung | 86 |
| Kompostfilterschicht | 20 | Wasserrückhalt..... | 25 |
| Kontrollierbarkeit | 12, 46, 48 | Wirkungsweise..... | 44 |
| Kontrollmöglichkeit mittels Sensoren | 52 | R | |
| Kosten..... | 61 | Rekultivierungsmassnahmen | 13 |
| Leckkontrolle..... | 51 | S | |
| Lysimeter | 39 | Sicherung und Sanierung von Altlasten | |
| Lysimeterversuch..... | 9, 38 | mineralische Barriere | 10, 40 |
| Marktübersicht Leckortungssysteme .. | 52 | U | |
| mineralische Barriere..... | 10, 40 | Umweltverträglichkeit | |
| Mobilisierungs- und | | Oberflächenabdichtung | 11, 13, 44 |
| Konsolidierungsvorgänge | 27 | W | |
| Niederschlagseintrag..... | 24 | Wasserhaushalt | |
| Problempunkte..... | 59 | Oberflächenabdichtung | 14, 80 |
| Rekultivierungsmassnahmen | 13 | Z | |
| Schadstoffmobilisierung | 26 | Zuggerät | 37 |
| Schrumpfung | 41 | | |