

# **„Rekultivierung von Deponien mit Oberflächenabdichtungen“**

## **Forschungsvorhaben mit Bau von Testfeldern**

### **1 Einleitung**

In der TA Siedlungsabfall sind folgende Anforderungen an den Aufbau einer Rekultivierungsschicht gestellt: Schutz der Dichtung vor Frost und Erosion und die Eignung als Substrat eines späteren Bewuchses, der so auszuwählen ist, dass „die Infiltration von Niederschlagswasser in das Entwässerungssystem minimiert wird“. Die TASI weist damit deutlich darauf hin, dass die Rekultivierungsschicht neben ihrer Funktion als Tragschicht für Bewuchs wichtige Funktionen im Wasserhaushalt einer Deponie übernimmt. Trotz zahlreicher Studien über den Aufbau und die Funktionsweise der Abdichtungssysteme selbst, fehlt es an Grundlagen, wie eine Rekultivierungsschicht, besonders im Hinblick auf ihre Funktion im Wasserhaushalt, optimal auszuführen ist.

Mit dem hier vorgestellten Forschungsvorhaben sollen diese Wissensdefizite systematisch aufgearbeitet werden. Es wird untersucht, wie weit bei der Gestaltung von Rekultivierungsschichten ökologische und bautechnische Anforderungen zu vereinbaren sind, um optimale Voraussetzungen für eine dauerhaft sickerwasserminimierende Vegetationsdecke gemäß TASI zu schaffen.

Das Vorhaben baut auf einer bereits 1997 veröffentlichten Forschungsarbeit auf, die sich in erster Linie mit den theoretischen Zusammenhängen des Themas befasst.

Die Finanzierung erfolgt durch das Land Baden Württemberg, BW-PLUS Forschungszentrum Karlsruhe und den Landkreis Böblingen.

### **2 Projektbeteiligte**

In der interdisziplinär besetzte Arbeitsgruppe sind Wissenschaftler und Ingenieure der folgenden Arbeits- und Fachgebiete tätig:

Landespflege/Vegetationskunde:  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Institut für Landespflege  
Institut für Bodenkunde und Waldernährung

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg,  
Abteilung Landespflege

Bodenbiologie:  
Büro Ehrmann

Bodenmechanik/Standsicherheit:  
Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik,  
Abt. Erddamm- und Deponiebau

Deponietechnik:  
UW Umweltwirtschaft GmbH, Stuttgart

### 3 Ziele des Forschungsvorhabens

Rekultivierungsschichten sollen als Bestandteile des Oberflächenabdichtungssystems eine Reihe von Aufgaben erfüllen:

- Sie sind Tragschicht für den Bewuchs.
- Sie schützen die übrigen Komponenten der Abdichtung, z. B. vor Frost, Erosion und Wurzeleinwirkung.
- Sie reduzieren die Sickerwassermenge in die Deponie über den Wasserentzug durch die Verdunstung aus dem Boden und der Pflanzendecke (Evapotranspiration) auf natürlichem Weg (Wasserhaushalt).

Letzteres ist vor allem im Hinblick auf die Langzeitverwahrung von Deponien relevant, denn im Gegensatz zu technischen Komponenten der Abdichtung (z. B. mineralische Dichtung, Kunststoffdichtung) bleibt das System Boden/Vegetation zeitlich unbegrenzt wirksam.

Ziel des Vorhabens ist es, das System Rekultivierungsschicht/Vegetation so zu optimieren, dass es einen möglichst hohen Anteil des Niederschlags aufbraucht und damit die Sickerwassermenge langfristig reduziert. Unter Berücksichtigung folgender Problemfelder sollen Grundsätze für die Gestaltung von qualifizierten Rekultivierungsschichten entwickelt und in einem praxisnahen Versuch ihre Umsetzbarkeit und Wirkung erprobt werden:

- **Wasserhaushalt und Vegetation:** Wälder mit intensiver, tief reichender Durchwurzelung und hohen Blattflächenindices in abgestuften Beständen weisen höchste Evapotranspirationswerte auf. Sie benötigen ausreichend mächtige, locker gelagerte und tief durchwurzelbare Böden mit hoher pflanzenverfügbare Wasserspeicherkapazität. Ein günstiges Bodengefüge und die biologischen Eigenschaften der Böden sind ebenfalls für die Entwicklung der Vegetation von großer Bedeutung.
- **Standsicherheit:** In der Baupraxis werden Rekultivierungsschichten beim Einbau in der Regel lagenweise verdichtet hergestellt. Dies steht im Widerspruch zu der seit Jahren im Hinblick auf dauerhafte und leistungsfähige Pflanzenbestände geforderte lockere Lagerung der Substrate. Im Rahmen des Vorhabens wird daher untersucht, welche Reibungseigenschaften locker geschüttete Substrate besitzen; das ist eine wesentliche Grundlage für den erdstatischen Standsicherheitsnachweis derartiger Rekultivierungsschichten. Zusätzlich wird die Wirkung ingenieurbiologischer Verbaumaßnahmen (Buschlagen) auf die Standsicherheit locker geschütteter Böschungen untersucht.

- **Erfordernisse des Baubetriebes – Praxisbezug:** Es fehlt bisher an Grundlagen, ob und wie für einen Bewuchs optimierte Rekultivierungsschichten unter Praxisbedingungen (z. B. Substratverfügbarkeit, Geräteeinsatz, Kosten) realisierbar sind. Deshalb werden aus den Erfahrungen beim Bau der Testfelder Einbauhinweise für die Praxis entwickelt, die bei zukünftigen Baumaßnahmen zur Herstellung der Rekultivierungsschichten Anwendung finden können.
- **Schutz der Dichtungskomponenten durch Wurzelsperren:** Pflanzen können nicht nur Rekultivierungsschichten durchwurzeln, sondern auch in Entwässerungsschichten und darunter liegende mineralische Dichtungen eindringen und deren Wirkung verringern. Deshalb beschäftigt sich das Vorhaben mit der Erprobung praxistauglicher Wurzelsperren.

Das zur Zeit anlaufende Untersuchungsprogramm vergleicht die unverdichtete und die konventionell verdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht. Folgende Merkmale stehen hierbei im Vordergrund:

- Wasserhaushalt - exakte Bilanzierung der Absickerung in den Lysimeterfeldern, Messung von Wassergehalt und Wasserspannung
- Vegetationsentwicklung und Durchwurzelung der Substrate
- Gefügeentwicklung
- Bodenbiologie - Entwicklung der Bodenfauna, mikrobiologische Aktivität.

#### 4 Standort der Testfelder mit Angaben zur Deponie

Verschiedene Vorgespräche mit den Projektbeteiligten führten zu einer ersten Auswahl geeigneter Deponien. Die besten Voraussetzungen für die Installation von Testfeldern bestanden auf der Deponie Leonberg im Landkreis Böblingen (s. Abb. 1).

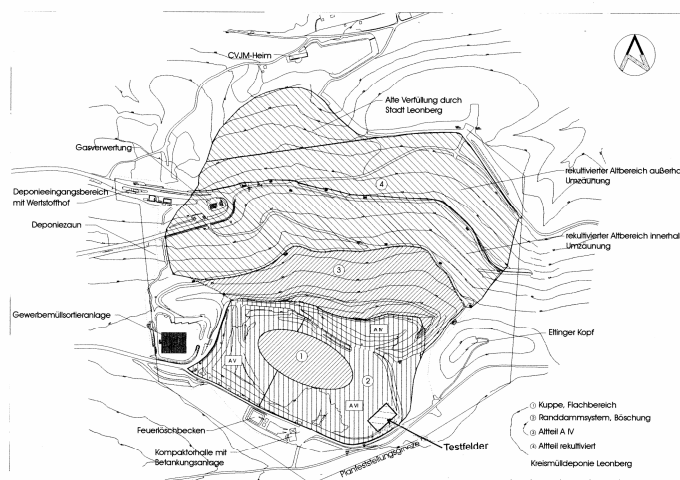


Abb. 1: Lageplan Deponie Leonberg

Der Landkreis hat von 1974 bis 1999 die Kreismülldeponie betrieben welche eine Gesamtfläche von ca. 30 ha umfasst.

In den Jahren 1996 - 1999 wurden die Deponieabschnitte A V und A VI als letzte verfüllt. Die beiden Deponieabschnitte haben zusammen eine Fläche von ca. 6 ha.

Um den Forderungen zur **Minimierung der Sickerwasser- und Gasemission** frühzeitig gerecht zu werden, wurde von der UW ein Konzept zum Bau eines **Randdammsystems** entwickelt, welches im Zuge der Verfüllung des A V/VI Anwendung fand.

Zielsetzung war die Schaffung eines Systems, das langfristig, mindestens aber bis zum Abklingen der Hauptsetzungen, die Abdichtungsfunktion übernimmt und das später, falls erforderlich, in ein endgültiges Oberflächenabdichtungssystem integriert werden kann.

Zum Schutz des Randdamms vor Erosion, Durchwurzelung und Austrocknung wurden für den Übergangszeitraum eine Entwässerungs- und eine Rekultivierungsschicht aufgebracht. Dadurch bleibt der Randwall langfristig als wirkungsvolles Dichtungselement erhalten. Wenn von der Behörde die Aufrüstung der temporären mineralischen Dichtung zur Kombinationsabdichtung oder Gleichwertigem gefordert wird, kann der Randdamm in das endgültige Dichtungssystem integriert werden. (s. Abb. 2).

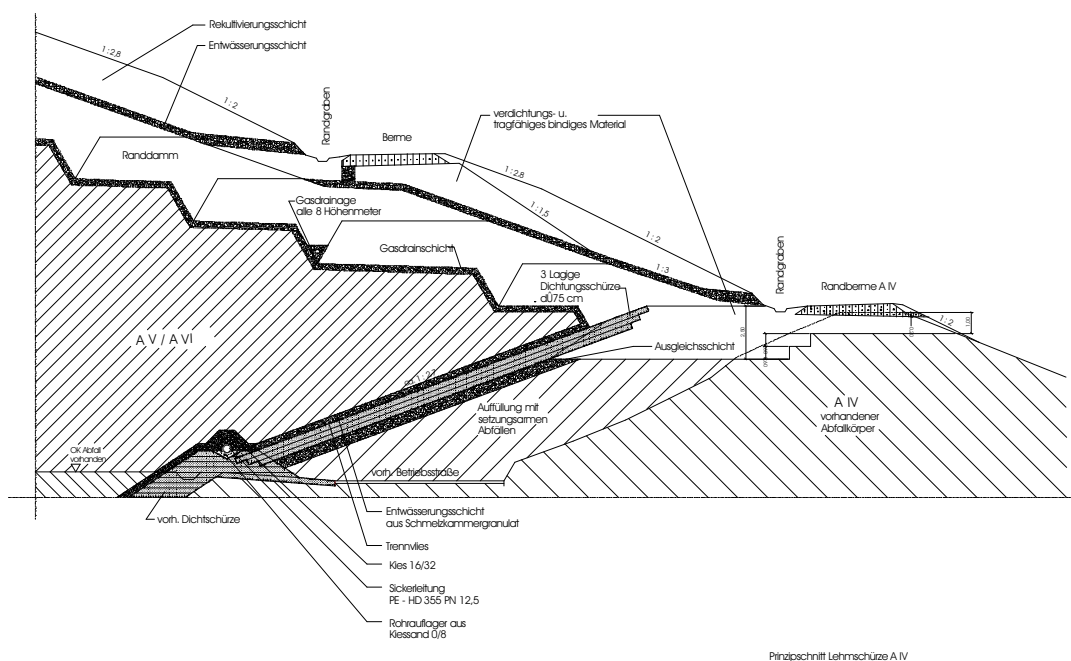


Abb. 2: Schnitt Randdammsystem/Zwischenabdichtung

## 5 Planung und Bau von Testfeldern

Kern der Versuchsanlage auf der Deponie Leonberg sind zwei jeweils ca. 350 m<sup>2</sup> große Lysimeterfelder mit den beiden Varianten „unverdichtete Rekultivierungsschicht“ und „konventionell lagenweise verdichtete Rekultivierungsschicht“, die in die vorhandene Böschung mit einer Neigung von ca. 1:2,8 eingebaut wurden (Abb. 3).

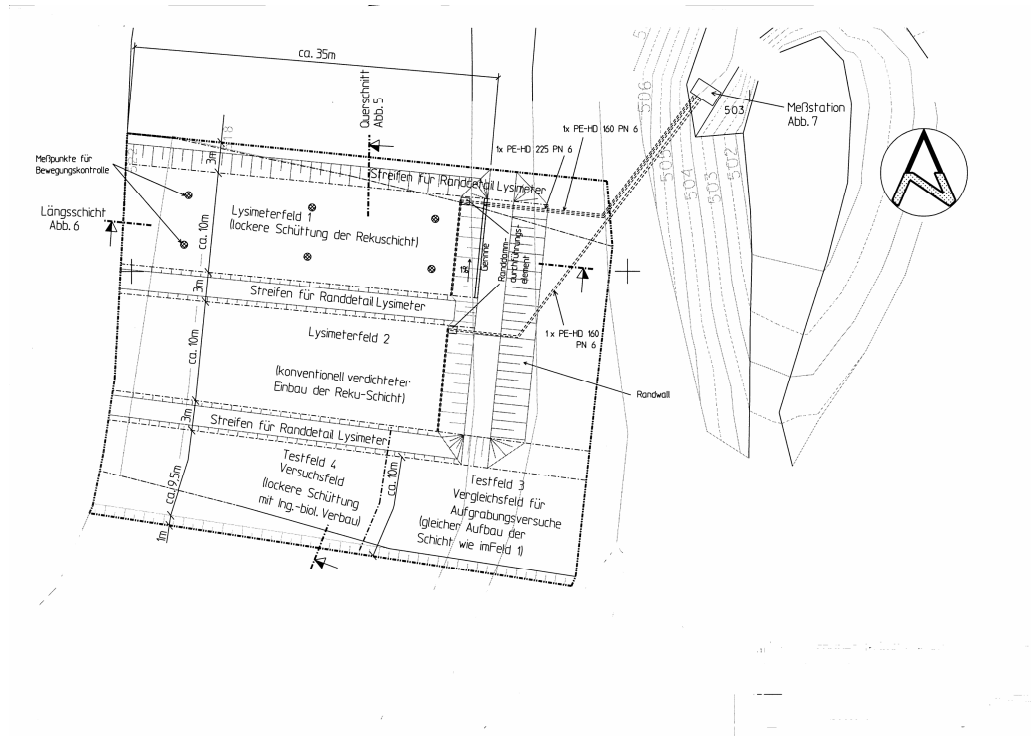


Abb. 3: Lageplan Testfelder

Vor Herstellung der Lysimeterfelder musste die bestehende Randdammoberfläche mit einer Dicke von ca. 25 cm abgetragen und anschließend mit mineralischem, steinfreiem Dichtungsmaterial wieder verfüllt werden. Das Material wurde verdichtet und ein Planum als Auflager für eine Kunststoffdichtungsbahn hergestellt.

Die Abgrenzung am Fuß der Lysimeterfelder bildet ein mit dem Untergrund verzahnter bindiger Randwall. Zur seitlichen Abgrenzung der Lysimeterfelder in Böschungsfälllinie dienen ca. 1 m hohe Trenndämme aus mineralischem Dichtungsmaterial. Über diesen Aufbau wurde eine Kunststoffdichtungsbahn ( $d = 2,5 \text{ mm}$ ) verlegt und verschweißt, die seitlich und unterhalb auf die Trenndämme gezogen wurde, so dass eine dichte Wanne entstand. Da die Kunststoffdichtung nicht bis zur Bodenoberfläche reicht, werden Randumläufigkeiten, z. B. durch den Eintritt von Regenwasser vermieden. Die Lysimeterfelder werden durch 3 m breite KDB-Streifen auf der Bodenoberfläche voneinander und gegen die Umgebung abgegrenzt, um Wasserzutritt von der Oberfläche auszuschließen. Diese Streifen leiten durch eine gerinneförmige Profilierung des Untergrundes Niederschlagswasser ab.



Abb. 4: Einbau der Rekultivierungsschicht im Testfeld „lockere Schüttung“

Die Basis der Testfelder ist analog zu den Vorgaben der TA Siedlungsabfall gestaltet, die Mächtigkeit der Rekultivierungsschichten orientiert sich an aktuellen Empfehlungen: Nach dem Bau der Wannen wurde die KDB durch ein Schutzvlies abgedeckt und eine 30 cm mächtige Entwässerungsschicht aus durchlässigem Schottermaterial eingebaut, auf dem die Rekultivierungsschicht direkt aufliegt. Der verdichtete Rekultivierungsboden im Feld 2 wurde mit einer Mächtigkeit von ca. 2,1 m und die unverdichtete Rekultivierungsschicht im Feld 1 mit ca. 20 cm Überhöhung eingebaut, um zu erwartende Setzungen des lockeren Materials auszugleichen. Zur Kontrolle des Setzungs- und Verformungsverhaltens wurden im Testfeld mit locker geschütteter Rekultivierungsschicht 6 Messpunkte zur Dokumentation von Bodenbewegungen sowie Einrichtungen zur insitu-Ermittlung der Scherparameter des locker gelagerten Substrates eingebaut.

Das Sickerwasser aus den Rekultivierungsschichten wird in der Entwässerungsschicht am unteren Rand der Testfelder mit einer gelochten Drainleitung gesammelt und ebenso wie das im locker geschütteten Testfeld in einem PEHD-Gerinne gefasste Oberflächenwasser in drei separaten Rohrleitungen zur quantitativen Erfassung der Messstation zugeführt.

Zwei weitere, nicht als Lysimeter gestaltete Testfelder gleichen Aufbaues mit locker eingebauter, unverdichteter Rekultivierungsschicht dienen der Quantifizierung der stabilisierenden Wirkung ingenieurbioologischer Bauweisen (Buschlagen) und können für invasive und destruktive Versuche herangezogen werden:

- **Bodenauswahl und Bodeneinbau:** Das Material sollte deshalb folgende Anforderungen erfüllen: Die Entnahme sollte möglichst aus einer Herkunftsstelle erfolgen. Weiterhin sollten bevorzugt Böden der Bodengruppen 4 bis 8 gemäß DIN 18 915 verwendet werden. Bei Bodengruppe 8 waren jedoch Böden mit den Hauptanteilen (> 25 %) Ton möglichst auszuschließen. Der Steingehalt

wurde auf  $\leq 20$  Gew.-% begrenzt. Zwischenlagerungen des Materials waren unerwünscht, da eine Verdichtung infolge Abwalzen nicht zulässig ist und Vernässungen des Bodens ausgeschlossen werden mussten.

Um dem großtechnischen Einsatz möglichst nahe zu kommen, wurde beim unverdichteten Einbau der Boden in einer Schicht „Vorkopf“ vom oberen Testfeldrand ausgehend mit einer leichten Raupe (D4) mit Moorkette eingeschoben (Trockenraumdichte i. M.  $1,45 \text{ g/cm}^3$ ).

Während des Einbaus wurden wichtige Eigenschaften der angelieferten Substrate laufend überprüft.

Im Testfeld „konventioneller Einbau“ wurden die unteren 1,5 m der Rekultivierungsschicht in drei Lagen mittels Walze auf eine Proctordichte  $D_{pr} \geq 95 \%$  verdichtet. Die oberen 0,5 m wurden analog zu den anderen Testfeldern unverdichtet eingebaut. In allen Feldern war ein nachträgliches Auflockern der Oberfläche erforderlich.

Auf die Testfeldoberfläche wurde lediglich eine 2 cm dünne Kompostschicht (von Hand ohne Einarbeiten auf die Bodenoberfläche aufgebracht, um den Anteil organischer Substanz geringfügig zu erhöhen. Hierdurch soll die Tiefendurchwurzelung der Gehölze angeregt und so der Wasserentzug durch die Vegetation verbessert werden.

- **Bepflanzung:** Die Versuchsfelder wurden mit Ausnahme von Feld 3 nach ihrer Fertigstellung im Herbst 2000 mit Aspen (*Populus tremula*) bepflanzt und zum Schutz vor Erosion mit Winterweizen (*Triticum aestivum*) eingesät. Im Frühjahr 2001 wurden weitere Gehölze zur Förderung einer raschen Waldentwicklung gepflanzt und Stauden eingesät. Untersuchungen zur Durchwurzelung in den Testfeldern 1 und 2 erfolgen an raschwüchsigen Stauden noch in der Vegetationsperiode 2001. Die Wirkung der Gehölze auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht kann sinnvoll erst nach einer längeren Entwicklungszeit untersucht werden.
- **Wurzelsperren:** Zur Untersuchung von Wurzelsperren wurden auf der Freifeldprüfanlage für Landespflege an der Universität Freiburg Versuchsfelder mit folgenden Materialien eingerichtet:
  1. Wurzelsperrmatte aus Geotextil mit Kupfereinlage
  2. Dränbeton locker geschüttet Körnung 8/16 und 16/32;  $170 \text{ kg/m}^3$  Zement
  3. verdichteter Sand Körnung 0/8; Mächtigkeit 30 cm; 3-lagig verdichtet,  $\rho_d = 1,5 - 1,6 \text{ g/cm}^3$
  4. verdichteter Glassplitt (Recyclingmaterial) Körnung 0/8; 3-lagig verdichtet.

Der Aufbau der Felder entspricht prinzipiell der TASI, lediglich die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht wurde auf 50 cm reduziert, um die Durchwurzelung bis zur Wurzelsperre zu beschleunigen. Die Felder wurden mit Aspen bepflanzt und mit Ölrettich eingesät, der Böden schnell und tief reichend durchwurzeln kann.

- **Setzungs- und Verformungsverhalten:** Bei der lockeren Schüttung von Rekultivierungsschichten sind Setzungsprobleme durch Lasten auf Bauwerke in der Rekultivierungsschicht (z.B. Entgasungsleitungen, Gasbrunnenköpfe, Biofilter und Kondensatschächte) nicht auszuschließen. Verschiebungen der Rekultivierungsschicht können zu Schäden führen. Im Rahmen der Untersuchungen wird daher das Setzungs- und Verschiebungsverhalten überwacht. Aus der Beobachtung des Verformungsverhaltens sind Erkenntnisse zu erwarten, inwieweit die Setzungen kritisch zu werten sind, so dass zukünftig gegebenenfalls im Bereich von Bauwerken Zonen mit verdichtetem Bodeneinbau zuzulassen sind.



Abb. 5: Versuchsanlage auf der Deponie Leonberg im Oktober 2001, im Hintergrund links Testfeld 3 mit gut entwickelten Buschlagen



## **6 Bisherige Untersuchungen**

### **6.1 Standsicherheit, Setzungs- und Verformungsverhalten**

#### **6.1.1 Standsicherheit**

Untersuchungen im Labormaßstab hatten in der ersten Phase des vorliegenden Projektes den Nachweis der Standsicherheit auch für locker geschüttete Rekultivierungssubstrate erbracht.

In diesem Zusammenhang ergaben sich aus bodenmechanischer bzw. erdstatischer Sicht eine Fülle von Fragestellungen, die systematisch abgearbeitet werden mussten:

- Ermittlung der erzielbaren Trockendichten bei lockerem Substrateinbau sowie Klärung der Dichteentwicklung infolge statischer Belastung bzw. Wasserzugabe (Niederschlagsinfiltration).
- Untersuchung der Scherverhaltens locker geschütteter Rekultivierungssubstrate: Entwicklung der Versuchstechnik sowie Ermittlung der maßgebenden Scherparameter.
- Leistungsverzeichnis: Festlegen der zulässigen Bodenarten im Hinblick auf das Reibungsverhalten.
- Erdstatischer Nachweis zur Standsicherheit der Testfelder in Leonberg und Festlegung von Mindestreibungswinkeln für die verschiedenen Bauelemente bzw. Scherfugen.
- Prognose der zu erwartenden Setzungen zur Ableitung der erforderlichen Schütthöhe.
- Entwicklung und Bau einer Messtechnik zur Überprüfung der Scherparameter in situ.

Auf dieser Grundlage konnten die Versuchsfelder auf der Deponie Leonberg gebaut werden. Allerdings war es aus bodenmechanischer Sicht bei der Konzeption bzw. dem Bau der Versuchsfelder unerlässlich, die im Labormaßstab ermittelten Zusammenhänge zur Standsicherheit locker geschütteter Rekultivierungssubstrate in situ zu überprüfen und Ermittlungen der Scherkenngrößen des locker geschütteten Substrates durchzuführen.

Erste Messungen an den so genannten Karlsruher Schertestern zur Ermittlung der Scherkenngrößen wurden durchgeführt; ohne hier auf Einzelheiten eingehen zu können, kann festgestellt werden, dass die bislang vorliegenden Ergebnisse die im Labormaßstab gefundenen Zusammenhänge weitgehend bestätigen.

#### **6.1.2 Setzungs- und Verformungsverhalten**

Zur Beobachtung des Setzungs- bzw. Verformungsverhaltens der lockeren Schüttung wurden die sechs Setzungsmesspunkte in regelmäßigen Zeitabständen geodätisch räumlich eingemessen. Zwischenzeitlich liegen Ergebnisse von sechs Messkampagnen vor, die folgende Schlüsse zulassen:

- Nach etwas über einem Jahr nach Herstellung des Feldes sind Setzungen in der Größenordnung von etwa 20 cm festzustellen.
- Wenngleich die Messpunkte über das Testfeld verteilt angeordnet sind, zeigen die Setzungen einen recht einheitlichen Verlauf.
- Es ist davon auszugehen, dass die Setzungen noch nicht abgeklungen sind. Weitere Beobachtungen sind erforderlich und werden durchgeführt.

## 6.2 Bodeneigenschaften der Rekultivierungsschichten

Die Aufgrabungen im Juni 2001 erlauben erste Aussagen über Tendenzen der Bodenentwicklung seit Abschluss der Bauarbeiten sowie der Durchwurzelung in der ersten Vegetationsperiode.

### 6.2.1 Trockenraumdichte

Die Trockenraumdichte (Lagerungsdichte) gilt als geeigneter Parameter zur Beurteilung der Auswirkungen des Einbauverfahrens. Die Bodenuntersuchungen nach Abschluss der Baumaßnahme belegen, dass mit dem verwendeten Verfahren bei unverdichtetem Einbau

- insgesamt tolerierbare Trockenraumdichten überwiegend unterhalb der Ausgangsdichte im Entnahmestand erzielt werden konnten und
- aufgrund einer böschungsabwärts abnehmenden Befahrungshäufigkeit auch die Trockenraumdichten im Böschungsverlauf von oben nach unten abnehmen.

Die **Trockenraumdichten** im U-Feld (U = unverdichtet) liegen im Mittel bei ca.  $1,45 \text{ g/cm}^3$  und fast durchweg deutlich unterhalb der Materialdichte im Entnahmestand. Das Einbauverfahren für unverdichtete Böden genügt somit den Anforderungen weitgehend, denn die erreichten Dichten nach Abschluss der Bauarbeiten sind insgesamt tolerierbar.

Sie lagen im Mittel nur geringfügig über den für optimierte Rekultivierungsschichten geforderten Werten (BRAUNS et al. 1997) von  $1,2 - 1,4 \text{ g/cm}^3$ .

Ein wesentlicher Vorteil des Einbauverfahrens liegt auch darin, dass **keine tiefreichende Verdichtungen** entstehen, die mit technischen Mitteln später praktisch nicht mehr rückgängig gemacht werden können.

## 6.2.2 Vegetationsentwicklung

Im Sommer 2001 erfolgten erste Untersuchungen der Vegetation, um festzustellen, ob die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Rekultivierungssubstrate bereits kurz nach Errichtung der Testfelder die Vegetationsentwicklung beeinflussen konnten.

Die **Durchwurzelung** der Rekultivierungsschicht wurde an dem im Anschluss an die Fertigstellung der Testfelder als Erosionsschutz eingesäten Winterweizen aufgenommen. In den im relativ trockenen oberen Bereich der Böschung gelegenen Profilen Kd und Ud sind die Unterschiede zwischen den Testfeldern deutlich ausgeprägt (siehe Abb. 7): Die Durchwurzelung im K-Feld (Feld 2) konzentriert sich lediglich auf den gelockerten Oberboden, im Übergang zur ersten verdichteten Lage endet die Durchwurzelung abrupt, die Wurzeln wachsen nur noch ein wenig in die verdichtete Schicht ein. Die Durchwurzelung in der Tiefenstufe 25 cm und 50 cm erfolgt vorwiegend entlang von Schrumpfrissen. Auch die Schrumpfrisse enden an der verdichteten Lage. Im Feld mit unverdichtetem Substrat (Profil Ud) ist eine tiefreichende und weit ausgeprägtere Durchwurzelung zu verzeichnen.

In Profil Ud reichen auch die Risse etwas tiefer, was jedoch für die Durchwurzelung nicht entscheidend ist, da die Pflanzen auch rissfreie Bereiche des Unterbodens durchwurzeln können.

Dies wirkt sich auf die oberirdische Biomasse aus, die in Testfeld U (Feld 1) ebenfalls größer war als im Feld mit konventionell verdichteter Rekultivierungsschicht. Messbare Auswirkungen auf den Wasserhaushalt (Absickerungsmenge) der Testfelder sind jedoch hiervon noch nicht zu erwarten.

## 6.3 Wasserhaushalt der Lysimeterfelder

Die Messeinrichtung in Leonberg erlaubt eine kontinuierliche Erfassung der Absickerungsraten aus den beiden Lysimeterfeldern mit hoher zeitlicher Auflösung. Aufgrund von Erfahrungen bei anderen Großlysimeterversuchen (z. B. ZISCHAK, mdl., siehe auch ZISCHAK 1997) kann davon ausgegangen werden, dass es mindestens 6 bis 12 Monate dauert, bevor der Wasserhaushalt einer eingebauten Bodenschicht sich eingeregelt hat und die Messeinrichtungen brauchbare und interpretierbare Daten liefern. Gründe hierfür sind vor allem:

1. Unterschiedliche Anfangswassergehalte der Substrate im Einbauzustand müssen ausgeglichen werden. Für die Lysimeterfelder in Leonberg ist dies von besonderer Bedeutung, da die eingebauten Rekultivierungsschichten entsprechend der Fragestellung des Versuchs eine sehr hohe Gesamt-Wasserspeicherkapazität (ca. 730 mm ) aufweisen, die in der Größenordnung fast die Höhe des mittleren Jahres-Gesamtniederschlags von Leonberg erreicht. Daher dauert die Angleichung unterschiedlicher Ausgangswassergehalte besonders lange.

2. Nach dem Einbau finden, bedingt durch Auflast und Bodenwassergehaltsänderungen, Prozesse mit Auswirkungen auf das Bodengefüge (z. B. Setzungen, Quellung/Schrumpfung) statt. Die Substrate, dies gilt vor allem für das Testfeld U (unverdichteter Einbau), sind somit Entwicklungen mit großem Einfluss auf ihre Wasserhaushaltseigenschaften unterworfen.
3. Weiterhin müssen die Messeinrichtungen an die vorhandenen Gegebenheiten (z. B. Messintervalle) angepasst werden. Die bisherigen Messergebnisse aus den beiden Lysimeterfeldern und von der Wetterstation auf der Deponie Leonberg zeigen auf, dass sehr niedrige monatliche Absickerungsraten gemessen wurden. Aufgrund der wüchsigeren Vegetation (Phytomasse, tiefere Durchwurzelung) waren bei sonst gleichen Bedingungen in Testfeld U (Feld 1) zumindest geringfügig niedrigere Absickerungsraten zu erwarten. Die Absickerung lag jedoch in Testfeld U zwischen 2,3 und 6,6 mm/Monat und im Testfeld K zwischen 0,3 und 0,6 mm/Monat. Die täglichen Absickerungsraten im Testfeld mit unverdichteter Rekultivierungsschicht (Feld U) unterliegen stärkeren Schwankungen und reagieren deutlicher auf Niederschlagsereignisse. Grund hierfür ist eine bessere Wasserwegigkeit vor allem aufgrund geringerer Lagerungsdichten. Im Testfeld K ist die vertikale Wasserwegigkeit durch die horizontalen Verdichtungen unterbrochen. Wie bereits zuvor ausgeführt, sollen diese Werte nur zur Information dienen. Erst nach Wassersättigung des gesamten Bodens ist mit aussagekräftigen Abflussdaten zu rechnen.

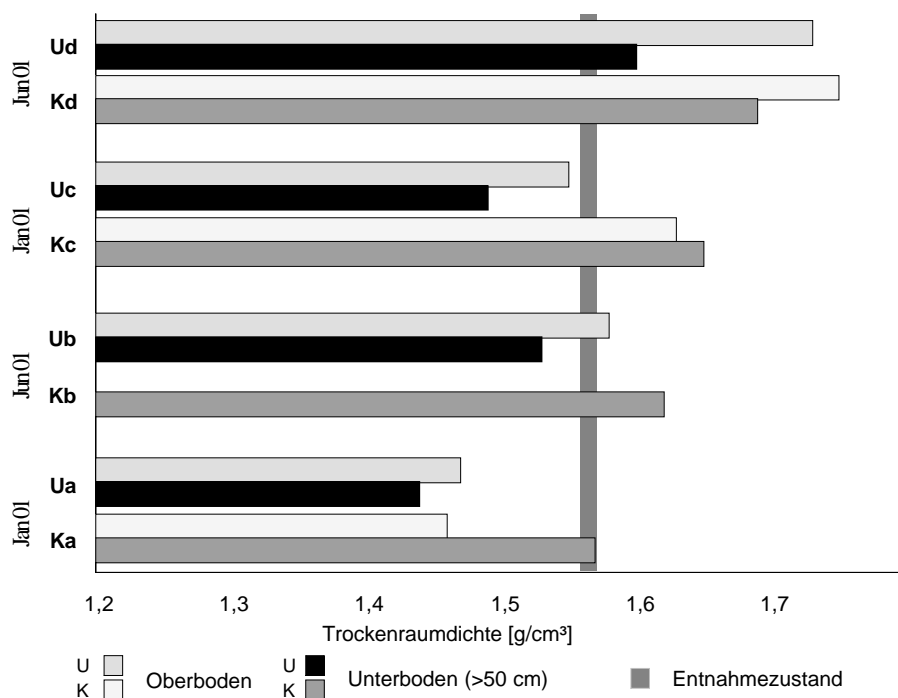


Abb. 6: Versuchsanlage Deponie Leonberg Trockenraumdicke im Ober- (25 cm Tiefe) und Unterboden ( $\varnothing$  der Tiefen 50, 85 und 135 cm) der Testfelder 1 und 2. Die Messpunkte a bis d sind in der Böschung von unten nach oben angeordnet. Probestermine: a und c - Januar 2001, b und d - Juni 2001

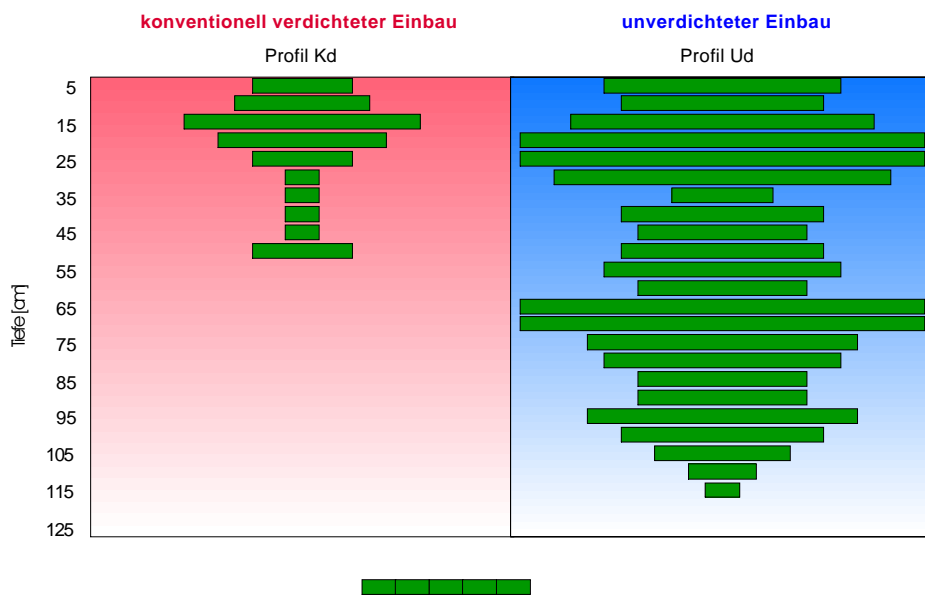


Abb. 7: Versuchsanlage Deponie Leonberg Durchwurzelungstiefe und -intensität (Winterweizen) in den Testfeldern im Juni 2001

## 7 Empfehlungen für die Praxis

### 7.1 Allgemeines

Eines der wichtigsten Ziele des Forschungsvorhabens ist es, die Optimierung der Rekultivierungsschichten mit Praxisbezug vorzunehmen. Deshalb werden aus den Erfahrungen beim Bau der Testfelder Einbauhinweise entwickelt, die bei zukünftigen Baumaßnahmen zur Herstellung der Rekultivierungsschichten Anwendung finden können. Da das Vorhaben noch nicht abgeschlossen ist, sind die nachfolgenden Empfehlungen als Zwischenergebnisse zu sehen.

### 7.2 Standsicherheit

Im Planungsstadium muss eine enge Abstimmung zwischen den beteiligten Fachdisziplinen erfolgen. Der Geotechniker sollte möglichst frühzeitig mit den bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Parametern eine Standsicherheitsberechnung durchführen.

Für locker geschüttete Substrate können die maßgebenden Scherparameter durch klassische Scherversuche im Labor ermittelt werden. Eine Überprüfung der Scherparameter des jeweils einzubauenden Rekultivierungsmaterials ist unerlässlich.

Der Tongehalt des Substrates sollte 25 Gew.-% nicht übersteigen.

### 7.3 Substratauswahl

Die Verteilung der Bodenarten in der Bundesrepublik ist regional sehr unterschiedlich. Es wird deshalb nicht immer möglich sein, die gewünschte optimale Substratqualität für jeden Deponiestandort mit vertretbarem Aufwand zu beschaffen. In der Praxis müssen deshalb Kompromisse zwischen den Anforderungen aus der Bodenkunde und dem wirtschaftlich Vertretbaren eingegangen werden.

Folgende Bodenarten bzw. Bodengruppen sind für die Herstellung optimierter Rekultivierungsschichten gut bis sehr gut geeignet:

**Bodengruppen:** 4 bis 8 gemäß DIN 18 915, bei der Bodengruppe 8 sollten Böden mit Hauptanteil Ton (> 25 %) möglichst ausgeschlossen werden.

**Bodenarten:** schluffige und schluffig-lehmige Sande (Su3, Su4, Sl2 - Sl4, Slu), Schluffe (Us, Ul, Ut2, Ut3) und sandige und schluffige Lehme (Ls2 - Ls4, Lu, Lt2, Lt3), auch hier gilt die Beschränkung der Tongehalte auf < 25 % (siehe Standsicherheit).

Besonders geeignet sind Substrate mit Steingehalten ( $\emptyset > 2$  mm) unter 10 Vol.-% Substrate, deren Steingehalt 30 Vol.-% übersteigen, sind grundsätzlich ungeeignet.

Stehen geeignete Substrate nicht zur Verfügung, so sind der Optimierung der Rekultivierungsschicht als „Wasserhaushaltsschicht“ enge Grenzen gesetzt. Ein unverdichteter Einbau der Substrate ist jedoch im Hinblick auf die von der TASI geforderte Minimierung der Absickerung immer von Vorteil.

### 7.4 Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht

Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht hängt entscheidend von der späteren Bepflanzung ab. Schichtstärken zwischen 1,5 - 3,0 m werden empfohlen.

Aus Sicht der Forschungsgruppe sollte bei Waldstandorten die Schichtstärke > 2,0 m betragen (s. u.).

### 7.5 Einbau

Der Einbau des Bodens sollte unter möglichst geringen Verdichtungen des Substrates mit den hierfür geeigneten Einbaugeräten erfolgen. Insbesondere sollen Raupen mit breiten Ketten ausgestattet sein, um den punktuellen Lasteintrag zu reduzieren.

Ein schichtenweiser Einbau von Rekultivierungssubstraten ist unbedingt zu vermeiden, da hierdurch die Wurzel ausbreitung in tiefer liegende Bodenschichten behindert wird.

Kennzeichnend für das in Leonberg verwendete Verfahren „Vor-Kopf-Einbau der Gesamtstärke der Rekultivierungsschicht“ ist, dass durch den Materialtransport der Raupe die Bodenoberfläche bis ca. 50 cm Tiefe stark verdichtet wird. Diese Schicht muss im Anschluss an den Einbau z. B. mit einem Teleskopbagger aufgelockert werden. Wesentlich bei dem vorgestellten Verfahren ist, dass die Endhöhe (zukünftige Bodenoberfläche) in einem Zug eingeschoben wird, da andernfalls Verdichtungen unbeabsichtigt auch in tieferen Bodenschichten hervorgerufen werden.

## **7.6 Bepflanzung**

Unter der Maßgabe, langfristig die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht zu minimieren, ist als Bewuchs Wald vorzusehen. Wälder sind in Mitteleuropa fast überall die natürlichen Endstadien der Vegetationssukzession. Sobald Nutzung oder Pflege über längere Zeit ausbleiben, etablieren sich deshalb auch auf Rekultivierungsschichten Waldbestände. Diese Tatsache ist bereits bei der Gestaltung, insbesondere Dimensionierung, von Rekultivierungsschichten zu berücksichtigen. Hinweise zur Gestaltung von Wäldern unter Wasserhaushaltsaspekten finden sich bei BRAUNS et al. (1997) und BÖNECKE (2001).

## **7.7 Wurzelsperren**

Empfehlungen zu Wurzelsperrensystemen können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gegeben werden.

## **7.8 Bautechnik**

Für eine optimale Vegetationsentwicklung mit ausgeprägter Wurzelbildung ist der unverdichtete Einbau der Wasserhaushaltsschicht unabdingbar. Hierdurch ergeben sich allerdings als negative Begleiterscheinung Setzungen. Da sich auf der Rekultivierungsschicht diverse Baulichkeiten befinden, wie z. B. Schächte, Gasregelstationen, Gasleitungen, Gasbrunnenköpfe etc., sind konstruktive Vorkehrungen zu treffen, damit die auftretenden Setzungen zu keinen Schäden führen.

## Literatur

AKS = Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (1996): Forstliche Standortaufnahme. 352 S., Eching

BERGER, K. & SOKOLLEK, V. (1997): Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich? Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Band 103: 15-40

BÖNECKE, G. (1997): Hinweis zur Aufforstung von Deponien mit Oberflächenabdichtung. IN: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt [Hrsg.]: Rekultivierung von Deponien. FVA-Arbeitsberichte 1/97: 39-50

BÖNECKE, G. (2001): Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien - Deponiewald statt Oberflächenabdichtungen? IN: EGLOFFSTEIN, T. & BURKHARDT, G. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Band 122

BRAUNS, J. / KAST, K. / SCHNEIDER, H. / KONOLD, W. / WATTENDORF, P. / LEISNER, T. (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfall konformer Oberflächenabdichtung. Handbuch Abfall, Band 13: 97 S. + Anhang, Karlsruhe

HAUBRICH, E. (1997): Temporäre Oberflächenabdichtungen im Verlauf verfüllbegleitender Baumaßnahmen. Vertiefersseminar „Zeitgemäße Deponietechnik“, FEI Stuttgart

TASi (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger Jahrg. 45, Nr. 99a, Hrsg. vom Bundesministerium der Justiz

WATTENDORF, P. & KONOLD, W. (2001): Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren. 13 S.

WATTENDORF, P. & SOKOLLEK, V. (2000): Gestaltung und Entwicklung von standortgerechtem Bewuchs auf Rekultivierungsschichten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 47: 225-234