

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

**Rekultivierung von Deponien mit Oberflächenabdichtungen:
Untersuchungen zur
Gestaltung von
Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren**

Förderkennzeichen: BWD 99003

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg gefördert

Juli 2002

Finanzierung: Land Baden-Württemberg
Programm BWPLUS
Zuwendungs-Nr. BWD 99003

Landkreis Böblingen

Projektlaufzeit: 1. Oktober 1999 - 30. März 2002

Projektleitung: Institut für Landespflege der
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Prof. Dr. Werner Konold

Tennenbacher Str. 4, D-79085 Freiburg
Tel: 0761-2033637 Fax: 0761-2033638

Beteiligte Institutionen Universität Karlsruhe,
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik
Büro Dr. Ehrmann, Neuffen
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA)
Baden-Württemberg, Abteilung Landespflege
UW Umweltwirtschaft GmbH, Stuttgart
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Institut für Bodenkunde und Waldernährung

Projektbearbeitung: Dr. P. Wattendorf
Dr. A. Bieberstein
G. Bönecke, Dipl.-Ing. (FH)
Prof. Dr. J. Brauns
Dr. O. Ehrmann
E. Haubrich, Dipl. Ing.
M. Koser, Dipl. Ing.
H. Reith, Dipl. Ing.
Dr. H. Schack-Kirchner

Dank

Das Forschungsvorhaben zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren wurde von verschiedenen Institutionen finanziell gefördert. Ohne diese Finanzierung wären der Bau der Testfelder und die wissenschaftlichen Untersuchungen nicht möglich gewesen. Deshalb sei an dieser Stelle dem Forschungszentrum Karlsruhe als Projektträger für das Programm BW-PLUS des Landes Baden-Württemberg und dem Landkreis Böblingen für die umfassende finanzielle Unterstützung herzlich gedankt. Der Deutsche Wetterdienst unterstützte das Vorhaben durch die vergünstigte Überlassung von Klimadaten der nahegelegenen Messstationen¹.

Weiterhin danken wir allen Mitarbeitern des Forschungszentrums Karlsruhe, die mit der Verwaltung und Abwicklung des Vorhabens BWD 99003 betraut waren.

Der Landkreis Böblingen hat das Projekt nicht nur durch seine großzügige finanzielle Unterstützung ermöglicht, sondern der Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises hat auch das Gelände für die Einrichtung der Versuchsfelder auf der Kreismülldeponie Leonberg zur Verfügung gestellt. In Ihrer Funktion als „Hausherren“ bzw. „Gastgeber“ haben die Mitarbeiter der Abfallwirtschaft, zu nennen sind in erster Linie die Herren Bagin und Schweizer, viele große und kleine Probleme beim Bau und der Einrichtung der Versuchsfelder unbürokratisch aus dem Weg geräumt.

Vor allem Herrn Schweizer gebührt ein ganz besonderer Dank für seine tatkräftige Begleitung und Unterstützung unseres Vorhabens, die sich von den ersten Planungsschritten bis zu den letzten Reparaturarbeiten erstreckte.

Frau Dr. Henning-Müller (Universität Hohenheim) danken wir für das Überlassen der Hohenheimer Klimadaten.

Herrn C. Emmerling (Universität Trier) besorgte die Untersuchung der mikrobiellen Parameter und Dr. K. Hammel (Universität Weihenstephan) stand uns mit Rat und Tat bei Fragen zur Bodenphysik und Wasserhaushaltsmodellierung zur Seite. Ihnen beiden sei sehr herzlich gedankt.

Nicht zu vergessen sind schliesslich J. Grüner, T. Wolf und E. Zähringer, die beim Bau und der Betreuung der Versuchsfelder im wahrsten Sinn des Wortes Schwerstarbeit leisteten. Frau C. Petschke vom Institut für Bodenkunde und Waldernährung danken wir für die schnelle und sorgfältige Analyse der Bodengasproben (nahezu) ohne Glasbruch! Frau S. Doerk sorgte mit Höchstgeschwindigkeit für die Schlusskorrekturen am Gesamtwerk, auch Ihr danken wir herzlich.

¹ Der nicht in Rechnung gestellte Informationspreis beträgt 970,30 €.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage - Motivation für das Vorhaben	1
2	Aufgabenstellung, Planung und Ausführung	4
2.1	Aufgabenstellung und Zusammensetzung der Arbeitsgruppe.....	4
2.2	Planung und Ausführung des Vorhabens	6
2.2.1	Planung.....	6
2.2.2	Vorgehensweise.....	7
2.2.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2.3	Versuchsanlagen	10
2.3.1	Gestaltung von Rekultivierungsschichten (Deponie Leonberg).....	10
2.3.1.1	Aufbau der Versuchsanlage in Leonberg	10
2.3.1.2	Versuchsvarianten in Leonberg	11
2.3.1.3	Instrumentierung der Versuchsfelder in Leonberg	14
2.3.2	Wirkung von Wurzelsperren (Freifeldprüfanlage Freiburg)	17
3	Stand der Forschung und Technik.....	21
3.1	Der Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten	21
3.2	Die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht.....	25
3.3	Begrenzung des Wurzelwachstums	27
4	Ergebnisse I: Gestaltung von Rekultivierungsschichten	29
4.1	Standsicherheit und Setzungsverhalten unverdichteter Rekultivierungsschichten	29
4.1.1	Problemstellung	29
4.1.2	Laboruntersuchungen	30
4.1.3	Versuchseinrichtungen für Felduntersuchungen.....	38
4.1.3.1	Feuchtemesskabel.....	38
4.1.3.2	Sackungs- und Verschiebungsverhalten	39
4.1.3.3	Karlsruher Schertester	42
4.2	Bautechnik und Bauausführung	46
4.2.1	Bodenauswahl.....	46
4.2.2	Bodeneinbau, Oberbodenlockerung und Erosionsschutz	49
4.2.2.1	Bodeneinbau.....	49
4.2.2.2	Oberbodenlockerung und Erosionsschutz.....	53
4.3	Bodenphysik.....	60
4.3.1	Trockenraumdichte	60
4.3.2	Eindringwiderstand.....	63
4.3.3	Infiltrationseigenschaften.....	66
4.3.4	Mikromorphologie der Verdichtungen.....	69
4.4	Bodenluft.....	76
4.5	Bodenwasserhaushalt und Bodentemperatur	88
4.5.1	Bodenwassergehalt und Bodenwasserspannung	88
4.5.2	Bodentemperatur	94
4.5.3	Abflüsse aus den Lysimeterfeldern.....	97

4.6	Bodenleben	104
4.6.1	Regenwürmer	104
4.6.1.1	Einführung	104
4.6.1.2	Regenwürmer in den Lysimeterfeldern	110
4.6.1.3	Regenwürmer auf der Kreismülldeponie Leonberg	114
4.6.2	Mikroorganismen	119
4.7	Vegetationsentwicklung	122
4.7.1	Oberirdische Biomasse der Pflanzen (Phytobiomasse)	122
4.7.2	Vitalität der Gehölze	124
4.7.3	Durchwurzelung	126
4.8	Ingenieurbiologischer Verbau	129
4.8.1	Bau des Testfeldes „Buschlagen“ und Wuchsentwicklung der Buschlagen..	130
4.8.2	Die Standsicherheit durch Buschlagen verstärkter Böschungen	132
4.8.3	Ermittlung der Standsicherheit – Messung des Herausziehwiderstandes	132
4.8.4	Aufgrabungen zur Untersuchung der Durchwurzelungstiefe	134
4.8.5	Geeignete Gehölzarten und Einbauverfahren	139
4.9	Wasserhaushaltsmodellierung	142
4.9.1	Klima von Leonberg und Witterungsbedingungen im Jahr 2001	143
4.9.2	Eingabedaten für die Wasserhaushaltsmodellierung mit HELP.....	146
4.9.3	Vergleich der Ergebnisse: Modellierung und Messungen.....	149
4.9.4	Vergleich der modellierten Absickerung aus U- / K-Feld und Profil 1	155
5	Ergebnisse II: Wirkung von Wurzelsperren.....	159
5.1	Funktion und Eigenschaften von Wurzelsperren	159
5.2	Wasserhaushalt der Versuchsfelder	162
5.3	Einfluss der Sperren auf das Wurzelwachstum	164
6	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	170
6.1	Fortschritte anderer Stellen im Lauf des Vorhabens	170
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	171
6.3	Forschungsbedarf.....	173
6.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	174
6.4.1	Voraussichtlicher Nutzen und praktische Verwertbarkeit.....	174
6.4.2	Empfehlungen für die Praxis	175
6.4.3	Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Programms BW-PLUS	176
7	Veröffentlichungen.....	177
7.1	Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit	177
7.1.1	Seminarveranstaltung und „Tag der offenen Tür“	177
7.1.2	Veröffentlichungen.....	177
7.2	Geplante Veröffentlichungen.....	178
8	Literatur	179
9	Anhang	

1 Ausgangslage - Motivation für das Vorhaben

Gesetzliche Grundlage für Planung, Bau und Betrieb von Hausmüll- und Erddeponien ist seit 1993 die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TA SIEDLUNGSABFALL 1993, kurz TASI). Sie bestimmt unter anderem die Gestaltung der Oberflächenabdichtungen von Deponien mit einem Regelaufbau (siehe Abbildung 1-1) oder als gleichwertig anerkannten Alternativen. Die Hauptfunktionen der Oberflächenabdichtung sind das Abkapseln des Deponieinhalts von der Umgebung und das Abdichten der Oberfläche, um Niederschlagswasser vom Deponiekörper fernzuhalten. So sollen Schadstoffausträge durch Sickerwasser in die Umwelt verhindert werden. Die Rekultivierungsschicht ist ein wichtiges Element im Oberflächenabdichtungssystem und muss eine Reihe von Aufgaben erfüllen:

- Sie ist Tragschicht für den Bewuchs und somit Grundlage für die langfristige Wiedereingliederung des Deponiebauwerkes in die Landschaft.
- Sie schützt die übrigen Komponenten der Dichtung vor hydraulischer Überlastung, Frost oder Erosion.
- Sie soll die Absickerung in die Entwässerungsschicht und die Deponie über Zwischenspeicherung und Wasserentzug durch die Verdunstung aus dem Boden und der Pflanzendecke reduzieren und vergleichmäßigen.

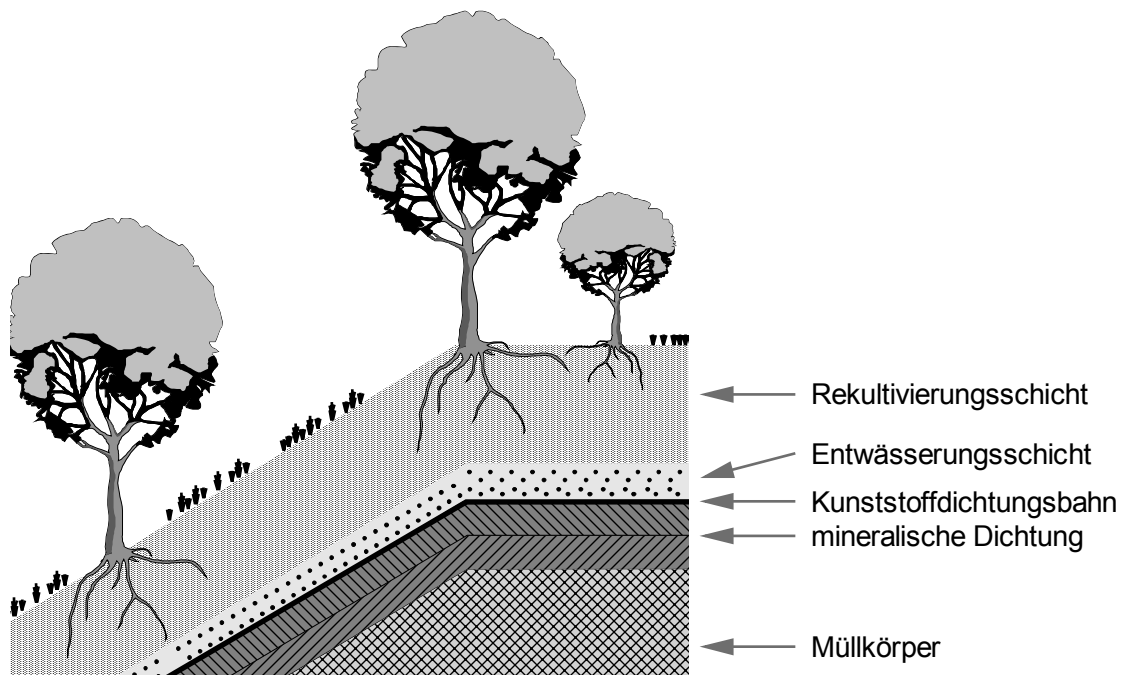


Abbildung 1-1: Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems gemäß TASI, Deponieklasse II

Diese vielfältigen Anforderungen können Rekultivierungsschichten jedoch nur erfüllen, wenn sie entsprechend gestaltet sind. Bislang waren diesbezügliche Forderungen von Seiten der Boden- und Vegetationskunde vor allem an der Zielsetzung orientiert, vitale und dauerhafte Pflanzenbestände zu etablieren, um die landschaftspflegerischen Vorgaben erfüllen zu können oder die rekultivierten Flächen land- oder forstwirtschaftlich

nutzen zu können (z.B. BARNER 1978). In den letzten Jahren rückte jedoch die Wasserhaushaltsfunktion der Rekultivierungsschichten immer stärker ins Zentrum des Interesses (z.B. DGGT 2000). Dies gilt vor allem auch im Hinblick auf die Langzeitverwahrung, denn der Lebensdauer der technischen Komponenten von Oberflächenabdichtungen sind Grenzen gesetzt (z.B. MÜLLER & AUGUST 1997, MELCHIOR 2000).

Die Absickerung aus einer Rekultivierungsschicht ergibt sich aus der Differenz zwischen Wassereintrag aus Niederschlag und dem Wasserverbrauch durch Transpiration der Pflanzen und Evaporation (Interzeption, Bodenevaporation) sowie dem Abfluss (an Böschungen). Der Anteil dieser Komponenten (siehe auch Abbildung 3-1) an der Gesamtbilanz ist neben allgemeinen klimatischen Bedingungen von physikalischen Bodeneigenschaften und vom Bewuchs abhängig. Langjährige Untersuchungen zur Grundwasserneubildung (Zusammenstellung in PROKSCH 1990, siehe auch 3.1) zeigen, dass unter Waldbeständen die geringsten Absickerungsraten entstehen. Von den für Deponieoberflächen in Frage kommenden Vegetationsformen haben Wälder die höchsten Transpirationsraten und weisen, vor allem bei abgestuftem Bestandaufbau, auch die höchste Interzeption auf. Der Wasserverbrauch von Pflanzen, die Transpirationsleistung, ist jedoch nicht nur artspezifisch, sondern auch von der im Boden pflanzenverfügbar gespeicherten Wassermenge abhängig. Wenn lange Zeit genügend Bodenwasser für Pflanzen verfügbar ist, so wird mehr Wasser verbraucht, als wenn zeitweise Wasserknappheit herrscht.

Vor diesem Hintergrund wurde 1995 vom Umweltministerium Baden-Württemberg eine Literaturstudie in Auftrag gegeben (BRAUNS et al. 1997), um zu prüfen, ob Waldbestände als Bewuchs auf rekultivierten Deponien gemäß TASI realisierbar seien. Die Studie zeigte auf, unter welchen Rahmenbedingungen, z.B. hinsichtlich der Standsicherheit, Wald auf Deponien zulässig ist. Auf der Basis allgemeiner bodenkundlicher und waldbaulicher Erkenntnisse und spezieller Erfahrungen mit Bodenumlagerungen in der Rekultivierung (z.B. ZWÖLFER et al. 1994) wurden grundsätzliche ökologische Anforderungen an Rekultivierungsschichten formuliert und erste Empfehlungen zur Gestaltung von Deponiewaldbeständen unter Wasserhaushaltsgesichtspunkten erarbeitet. Es wurde angeregt, durch eine zweckmäßige Gestaltung des Systems „Rekultivierungsschicht + Bewuchs“ den Oberflächenwasserhaushalt dahingehend zu beeinflussen, dass Absickerungsraten langfristig auf natürlichem Wege minimiert werden. Alle verfügbaren Literaturquellen belegten, dass hierbei nicht nur der Substratqualität, sondern auch dem Einbauverfahren, z.B. im Hinblick auf Bodenverdichtungen, eine maßgebliche Bedeutung für die spätere Qualität der Rekultivierungsschicht zukommt.

Unter Mitwirkung des Instituts für Landespflege begann eine Arbeitsgruppe der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik den bisherigen Kenntnisstand zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und des Bewuchses von Deponieoberflächen aufzubereiten und die GDA-Empfehlungen E 2-31 und E 2-32 (DGGT 2000 und 2000a) zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und ihres Bewuchses als sogenannte „Wasserhaushalts-

schichten“ zu erarbeiten. Die wichtigsten Vorgaben zur Herstellung solcher Rekultivierungsschichten sind :

- Verwendung geeigneter Bodenarten (v.a. Schluffe, schluffige und lehmige Sande, Lehme) mit möglichst geringem Steingehalt
- Beschränkung der Verdichtung beim Einbau auf das unvermeidbare Maß
- Bereitstellen einer ausreichenden pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicherkapazität im Wurzelraum

Die inzwischen vorliegenden Erkenntnisse boten den Anlass, das Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren“ zu konzipieren. Praxiserfahrungen zeigten, dass zwischen Vorgaben und technischer Ausführung der Rekultivierung eine große Diskrepanz bestand und bis heute weiterhin besteht. In der Vergangenheit standen bei der Gestaltung von Rekultivierungsschichten überwiegend bautechnische Anforderungen im Vordergrund der Betrachtung. Ökologische Aspekte blieben unberücksichtigt oder bestenfalls auf die Auswahl geeigneter Substrate beschränkt. Die von Boden- und Vegetationskunde im Hinblick auf einen funktionsfähigen Pflanzenbestand erhobene Forderung, Substrate beim Einbau nicht zu verdichten, sondern möglichst locker zu lagern, wurde in der Praxis - mit teilweise dauerhaften Folgeschäden - meist nicht erfüllt. Die Bauausführung erfolgte in der Regel verdichtet, da das Standsicherheitsverhalten unverdichteter Substrate an Böschungen nicht hinreichend bekannt war und zweifelhaft erschien.

Wenn der Anforderung der TA SIEDLUNGSABFALL an Rekultivierungsschichten, die Infiltration von Sickerwasser in den Deponiekörper zu reduzieren, konsequent Rechnung getragen werden soll, so bedeutet dies, nach Möglichkeit Waldbestände auf tief und intensiv durchwurzelbaren Rekultivierungsschichten zu etablieren. Wälder sind die natürlichen Endglieder der Vegetationssukzession in Mitteleuropa und stellen sich ein, wenn Pflegemaßnahmen nachlassen oder aufgegeben werden. Die Wurzeln der Waldbäume durchwachsen jedoch nicht nur die Rekultivierungsschicht, vielmehr besteht die Gefahr, dass Wurzeln in die Dichtungskomponenten, v.a. die Entwässerungsschicht und die mineralische Dichtung, eindringen und deren Wirkung verringern. Aus diesem Grund beschäftigt sich das Vorhaben auch mit der Entwicklung und Erprobung von Wurzelsperren unterhalb von gut durchwurzelbaren Rekultivierungsschichten.

2 Aufgabenstellung, Planung und Ausführung

2.1 Aufgabenstellung und Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

Ausgehend von der in Kapitel 1 dargestellten Problematik und der Tatsache, dass es bisher an Grundlagen fehlte, wie hinsichtlich ihrer Wasserhaushaltsfunktion gestaltete Rekultivierungsschichten in der Praxis realisiert werden können, wurden für das Vorhaben zwei Oberziele definiert:

1. Die Entwicklung und Erprobung von Rekultivierungsschichten, die im Gesamtsystem der Oberflächenabdichtung einschließlich Bewuchs bis zu einer definierten Böschungsneigung standsicher und bodenphysikalisch, -chemisch und -biologisch so beschaffen sind oder sich absehbar so entwickeln können, dass sie dauerhaft vitale Gehölzbestände zu tragen vermögen.
Die Bodeneigenschaften sollen darüber hinaus möglichst hohe Evapotranspirationsraten der Pflanzenbestände ermöglichen, um die Absickerungsmengen zu minimieren. Die Umsetzung in praxistaugliche Rekultivierungsverfahren muss gegeben sein.
2. Die Entwicklung und Erprobung von Wurzelsperren unter Rekultivierungsschichten, um die Komponenten der Oberflächenabdichtung langfristig vor dem Einwachsen von Wurzeln zu schützen, ohne hierbei die Rekultivierungsschicht nachteilig zu beeinflussen.

Diese Aufgabenstellung, insbesondere zu Punkt 1, machte es erforderlich, die bisher in Planung und Ausführung von Rekultivierungsschichten fehlende Abstimmung zwischen den Fachgebieten Deponietechnik, Bodenmechanik, Bodenkunde sowie Vegetations- und Standortkunde beispielhaft zu vollziehen. Deshalb sind in der interdisziplinär besetzten Arbeitsgruppe Wissenschaftler und Ingenieure der folgenden Arbeits- und Fachgebiete tätig:

Landespflege, Vegetations- und Standortkunde:

Dr. P. Wattendorf, Prof. Dr. W. Konold
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Institut für Landespflege

Bodenkunde (Bodengashaushalt):

Dr. H. Schack-Kirchner
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Institut für Bodenkunde und Waldernährung

Forstwissenschaften, Ingenieurbiologie:

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

Bodenbiologie, Mikromorphologie:

Dr. O. Ehrmann

Büro Dr. Ehrmann, Neuffen

Bodenmechanik/Standsicherheit:

Dr. A. Bieberstein, Prof. Dr. J. Brauns, H. Reith

Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik,

Abt. Erddammbau und Deponiebau

Deponietechnik:

E. Haubrich, M. Koser

UW Umweltwirtschaft GmbH, Stuttgart

Abfallwirtschaft Landkreis Böblingen

H. Schweizer, W. Bagin

2.2 Planung und Ausführung des Vorhabens

2.2.1 Planung

Eine wesentliche Fragestellung des Vorhabens beschäftigt sich mit der Möglichkeit, unverdichtete Rekultivierungsschichten unter Praxisbedingungen herzustellen. Somit ist die Einrichtung der Versuchsfelder in Leonberg bereits als ein (Teil)Ergebnis des Vorhabens zu sehen. Die Gesamtplanung des Vorhabens war demnach auf ein schrittweises Vorgehen ausgerichtet:

A. Konzept der Versuchsanlage, Design der Rekultivierungsschicht und der Wurzelsperren:

Die wichtigste Aufgabe der Gesamt-Arbeitsgruppe bestand darin, ein unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungen (z.B. an die Standsicherheit) und der gegebenen Umstände (z.B. Substratverfügbarkeit in der Region) „kompromissfähiges“ Design einer Rekultivierungsschicht sowie ein vermutlich zielführendes Herstellungsverfahren zu erarbeiten.

Parallel dazu waren die für Wurzelsperren in Frage kommenden Materialien zu ermitteln.

B. Bau der Versuchsfelder in Leonberg und Freiburg:

Anhand der Vorgaben sollten unter Praxisbedingungen Versuchsfelder für die Rekultivierungsschicht auf der Deponie Leonberg eingerichtet werden. Es war ursprünglich vorgesehen, ein Versuchsfeld mit möglichst unverdichteter Rekultivierungsschicht sowie ein Vergleichsfeld mit konventionell hergestellter, d.h. beim Einbau verdichteter, Rekultivierungsschicht zu bauen. Um den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht möglichst genau bilanzieren zu können, sollte das Feld mit unverdichteter Rekultivierungsschicht als Großlysimeterfeld angelegt werden. Weitere Testfelder waren für zusätzliche Versuche geplant.

Das Einwerben zusätzlicher Mittel aus dem kommunalen Investitionsfonds im Jahr 2000 ermöglichte den Bau einer zweiten Großlysimeteranlage. Aufgrund dieser Erweiterung der ursprünglichen Konzeption stehen nun je ein Lysimeterfeld mit unverdichtet eingebauter und konventionell hergestellter Rekultivierungsschicht für die Wasserhaushaltsuntersuchungen zur Verfügung.

Die Prüfung der Wurzelsperren sollte aus Kostengründen in kleinerem Maßstab auf der Freifeldprüfanlage des Instituts für Landespflege in Freiburg erfolgen.

C. Untersuchungen nach Abschluss der Baumaßnahmen:

Nach der Einrichtung der Testfelder sollte die Entwicklung der physikalischen Bodeneigenschaften, des Bodenlebens und der Vegetation in den Testfeldern untersucht und dokumentiert werden. Für Wasserhaushaltsbetrachtungen und -modellierungen sollten schwerpunktmäßig die Abflüsse aus den Lysimeterfeldern sowie begleitend weitere Parameter des Bodenwasserhaushaltes laufend ermittelt werden.

2.2.2 Vorgehensweise

Diese allgemeine Konzeption des Vorhabens wurde in folgenden Arbeitsschritten umgesetzt:

A. Konzept der Versuchsanlage, Design der Rekultivierungsschicht und der Wurzelsperren

1. Eine kurze Literaturrecherche war notwendig, um einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu gewinnen. Weiterhin konzentrierte sich die Recherche auf Anregungen zur Gestaltung von Wurzelsperren.
2. Zeitgleich wurde die Konzeption zur baulichen Ausführung des Lysimeterfeldes entwickelt und erste Planunterlagen erstellt.
3. Ein wesentlicher Arbeitsschritt im Vorhaben war die Auswahl geeigneten Bodenmaterials. Um den Praxisbezug des Vorhabens zu gewährleisten, sollten zur Herstellung der Rekultivierungsschicht nicht optimale, sondern vielmehr geeignete durchschnittliche und regional verfügbare Substrate herangezogen werden. Standsicherheitsberechnungen für den Aufbau einer Oberflächenabdichtung gemäß TASI mit und ohne Waldbestand lagen zwar vor (BRAUNS et al. 1997), jedoch nicht unter der Annahme, dass die Rekultivierungsschicht mit geringer Lagerungsdichte eingebaut wird. Deshalb waren vor Baubeginn Untersuchungen zum Scherverhalten locker geschütteter Rekultivierungssubstrate erforderlich, um daraus die maßgebenden Scherparameter ableiten zu können.
4. Ein geeignetes Einbauverfahren musste ebenfalls in einem Abstimmungsprozess gefunden werden. Das Verfahren sollte den Anforderungen an die Rekultivierungsschicht genügen und auch in der gängigen Baupraxis anwendbar sein, z.B. hinsichtlich Maschinenverfügbarkeit und Kosten.
5. Als Ergebnis der Arbeitsschritte 1. bis 4. wurden konkrete Einbauvorgaben erarbeitet. Diese bildeten zusammen mit den Planvorgaben zur Ausführung der Lysimeterfelder die Grundlage für die Ausschreibungsunterlagen (Leistungsverzeichnis) zum Bau der Versuchsfelder auf der Deponie Leonberg. Trotz dieser Vorarbeiten waren im Zuge der Ausschreibung weitere Abstimmungen zwischen Arbeitsgruppe und Baufirma nötig, bis eine im Sinne der Projektzielsetzung brauchbare Kompromisslösung gefunden werden konnte.

B. Bau der Versuchsanlagen

6. Die Ausführung der Baumaßnahme musste aufgrund des langwierigen Abstimmungsprozesses und ungünstiger Witterungsbedingungen im Sommer 2000 in den Herbst dieses Jahres verlegt werden. Die Bauausführung erfolgte unter Praxisbedingungen mit den im Erdbau üblicherweise verfügbaren Geräten. Während der Ausführung der jeweils ca. 400 m² großen Testfelder erfolgte die laufende Bauüberwachung der Erdbaumaßnahmen durch Mitglieder der Arbeitsgruppe, um eine permanente Kontrolle der Materialparameter (Trockenraumdichte usw.) und das Einhalten der Vorgaben zu gewährleisten.

C. Untersuchungen nach Abschluss der Baumaßnahmen

7. Zur Überprüfung der aus den Laborversuchen ermittelten Kennwerte hinsichtlich des Scherverhaltens sowie des Sackungs- und Setzungsverhaltens, die als Grundlage für den rechnerischen Nachweis der Standsicherheit dienen, war es erforderlich, geeignete in-situ-Messungen zu entwickeln und durchzuführen. Wiederholte in-situ-Messungen in Zeitabständen sollten Veränderungen bzw. die zeitliche Entwicklung der Scherparameter des unverdichteten Bodens belegen. Die stabilisierende Wirkung ingenieurbioologischer Maßnahmen war zu quantifizieren.
8. Mit der Großlysimeteranlage können die Absickerungsraten aus den Rekultivierungsschichten genau ermittelt werden. Somit kann die Wirkung der sich entwickelnden Gehölzbestände auf den Wasserhaushalt in Abhängigkeit von der Ausführung der Rekultivierungsschicht bilanziert werden.
9. Zum Vergleich des Luft- und Wasserregimes im Wurzelraum der Rekultivierungsschichten werden kontinuierlich bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu waren nach Abschluss der Baumaßnahmen entsprechende Messeinrichtungen zu installieren. Seit Frühjahr 2001 werden in regelmäßigen Intervallen Wasserspannung und Wassergehalt sowie der CO₂-Gehalt der Bodenluft gemessen. Um die Rekultivierungsschichten in den Großlysimetern möglichst geringen Störungen auszusetzen, wurden begleitende Untersuchungen zu konventionellen bodenphysikalischen Parameter wie Gesamtporenvolumen, Eindringwiderstand und Trockenraumdichte im Zuge des Einbaus der Messinstrumente durchgeführt.
10. Vegetationseigenschaften, Klima- und Bodendaten dienen als Grundlagen für eine exakte Wasserbilanz. In jeder Vegetationsperiode werden deshalb die entsprechenden Merkmale der Vegetation (z.B. Bestandesstruktur, Biomasse, Deckungsgrad) quantitativ erfasst. Von besonderer Bedeutung für den Wasserhaushalt ist die Bodendurchwurzelung. Deshalb müssen Durchwurzelungstiefe, Durchwurzelungsintensität und maßgebliche Bodenmerkmale aufgenommen werden.
11. Da Rekultivierungsschichten nach dem Einbau verarmte Bodenbiozöten und meist höhere Lagerungsdichten als natürliche Böden aufweisen, kommt der Entwicklung des Bodenlebens und der Bodenstruktur eine große Bedeutung im Hinblick auf die Standortqualität zu. Im Vordergrund der Untersuchungen zu Bodenleben und Bodenstruktur steht daher die Frage, welchen Einfluss die unterschiedlichen Einbau-

verfahren auf die Ausbildung der Bodenstruktur und auf das Vorkommen von Regenwürmern und Mikroorganismen haben und wie Regenwürmer die Bodenstruktur der Rekultivierungsschichten verändern können. Hierzu erfolgen mikromorphologische Untersuchungen der Bodenstruktur an Dünnschliffen aus den Testfeldern. Die Regenwürmer werden nach Arteninventar, Anzahl und Biomasse erfasst; weiterhin werden Biomasse und Aktivität der Mikroorganismen ermittelt.

12. Auf den Versuchsfeldern zur Wirkung von Wurzelsperren konzentrieren sich die Untersuchungen auf die Funktionskontrolle dieser Sperren einschließlich unerwünschter Nebenwirkungen. Die Wirksamkeit der Wurzelsperrenschichten wird qualitativ und quantitativ mit Aufgrabungen untersucht.

2.2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Da die Projektgruppe bereits interdisziplinär mit Vertretern der zur Bearbeitung der Fragestellung erforderlichen Fachrichtungen besetzt ist, wurden Kontakte zu weiteren Fachinstitutionen nur in geringem Umfang nötig. Dies war vor allem in der Planungsphase der Großlysimeterfelder der Fall, hier wurden praktische Erfahrungen aus anderen Forschungsvorhaben mit Großlysimetern auf Deponien eingeholt. Die Arbeitsgruppe besuchte hierzu die Großlysimeteranlagen auf den Deponien „Karlsruhe-West“ (Prof. Dr. H. Hötzl, Dr. W. Breh, siehe z.B. ZISCHAK 1997) und „Im Dienstfeld“, Aurach (Dr. U. Henken-Mellies). In den Gesprächen mit Planern und Betreibern der Versuchsanlagen konnten Hinweise zum Bau und Betrieb von Großlysimeteranlagen gewonnen werden.

Als externer Berater zu Fragen der Bodenphysik, des Wasserhaushaltes und der Wasserhaushaltsmodellierung wurde Dr. K. Hammel (TU Weihenstephan) hinzugezogen.

2.3 Versuchsanlagen

2.3.1 Gestaltung von Rekultivierungsschichten (Deponie Leonberg)

2.3.1.1 Aufbau der Versuchsanlage in Leonberg

Vorgespräche der am Projekt Beteiligten führten vor der Antragstellung zu einer ersten Auswahl geeigneter Deponien. Die besten Voraussetzungen für den Bau von Testfeldern bestanden auf der Kreismülldeponie Leonberg, zumal der Landkreis Böblingen als Deponiebetreiber sich bereit erklärte, erhebliche Investitionsmittel für den Bau der Versuchsanlage zur Verfügung zu stellen.

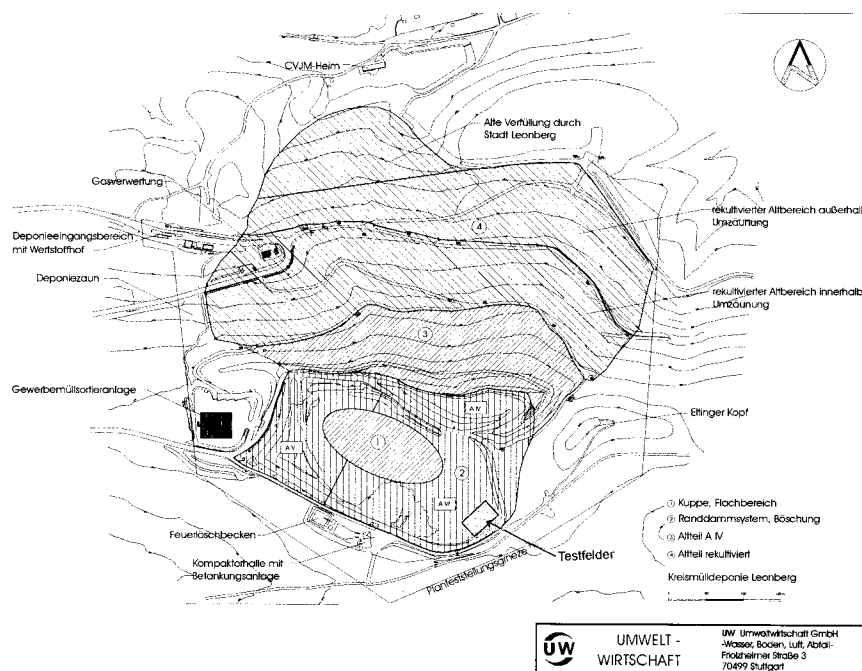


Abbildung 2-1: Lage der Versuchsfelder auf der Kreismülldeponie Leonberg

Der Landkreis Böblingen hat die von der Stadt Leonberg 1963 eingerichtete Deponie im Jahr 1974 übernommen und bis 1999 weiterbetrieben. Sie umfasst heute eine Gesamtfläche von ca. 30 ha (siehe Abbildung 2-1). In den Jahren 1996 - 1999 wurden die Deponieabschnitte A V und A VI als letztes verfüllt. Diese beiden Deponieabschnitte haben eine Fläche von ca. 6 ha, wovon jeweils die Hälfte der Basisabdichtung mit einer mineralischen bzw. einer Kombinationsabdichtung ausgeführt ist. Als temporäre Oberflächenabdichtung wurde hierzu ein Randdammssystem aus mineralischem Dichtungs-

material entwickelt (HAUBRICH 1997) und eingesetzt. Ziel 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.

Bei der Konzeption des Forschungsvorhabens wurde vorgesehen, die Testfelder im Zuge der temporären Oberflächenabdichtung und Rekultivierung des letzten Betriebsabschnittes A VI im Jahr 1999 zu errichten. Da die Beschaffung von Forschungsmitteln mehr Zeit in Anspruch nahm als geplant, konnte diese Zeitvorgabe nicht eingehalten werden. Deshalb wurde bei der Rekultivierung im Bereich des Verfüllungsabschnitts A VI eine ausreichend große Aussparung vorgesehen, in der die Versuchsfelder nach der Bewilligung von Forschungsmitteln im Jahr 2000 untergebracht werden konnten.

Vor Herstellung der Versuchsfelder musste die bestehende und durch Witterungseinflüsse angegriffene Randdammoberfläche in der Aussparung in einer Lage von ca. 25 cm Mächtigkeit abgetragen und anschließend mit mineralischem, steinfreiem Dichtungsmaterial wieder verfüllt werden. Das Material wurde verdichtet und ein Planum als Auflager für eine Kunststoffdichtungsbahn hergestellt.

2.3.1.2 Versuchsvarianten in Leonberg

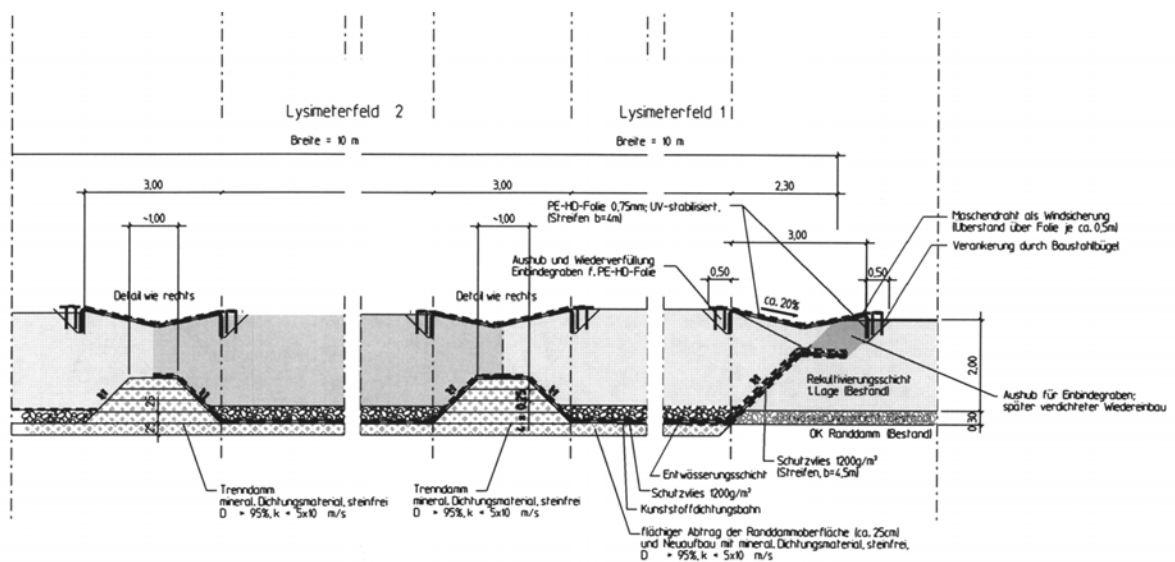


Abbildung 2-2: Aufbau der Lysimeterfelder auf der Kreismülldeponie Leonberg (Querschnitt)

Die Anlage zur Untersuchung der Rekultivierungsschichten auf der Deponie Leonberg besteht aus insgesamt vier Versuchsfeldern (Tabelle 2-1). Sie ist die südöstlich exponierte Böschung des Deponieabschnittes A VI mit einer mittleren Neigung von etwa 1 : 2,7 integriert (siehe Bild 1).

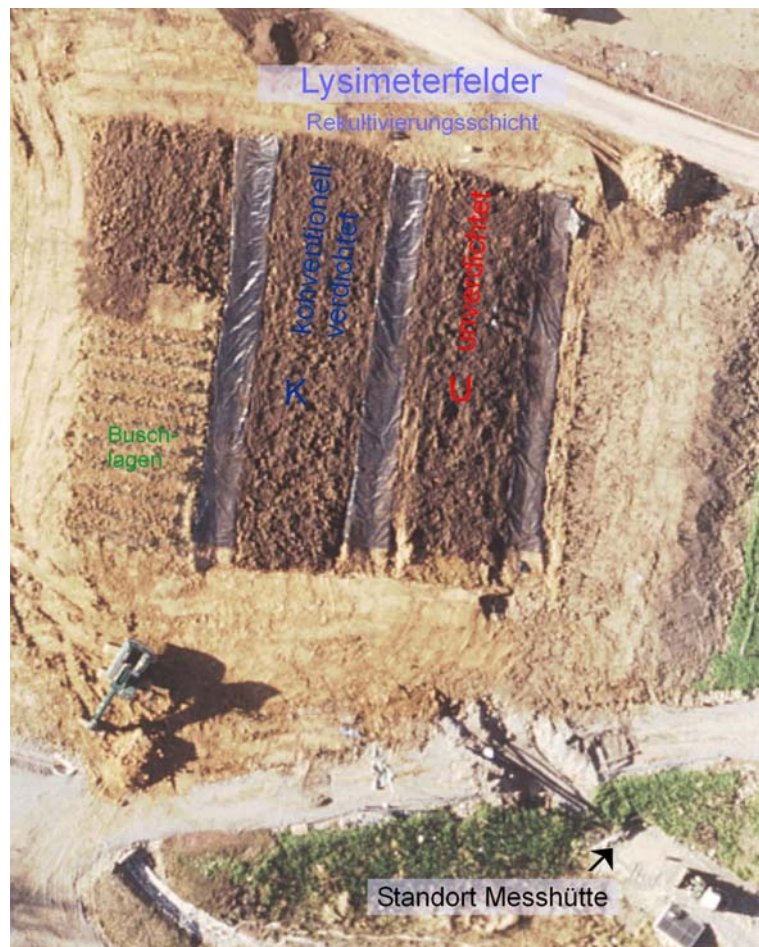


Bild 1: Testfelder in Leonberg nach dem Abschluss der Bodenarbeiten (Dezember 2000)

Tabelle 2-1: Versuchsfelder zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten

Feld	Fläche	Rekultivierungsschicht
U	360 m ²	U nverdichtet, d.h. ohne zusätzliche Verdichtung eingebaut
K	360 m ²	nach k onventionellem Verfahren dreilagig verdichtet (Kontrolle)
D	180 m ²	unverdichtet, Feld für umfangreichere d estruktive Versuche
B	180 m ²	unverdichtet mit ingenieurbioologischem Verbau (B uschlagen)

Kern dieser Versuchsanlage in Leonberg sind die beiden Großlysimeterfelder **U** und **K** von jeweils ca. 9 x 40 m Größe (Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3). In ihnen werden die beiden Varianten

- „unverdichtete Rekultivierungsschicht“ (**Feld U**) und
- „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ (**Feld K**) miteinander verglichen.

Der Aufbau der Testfelder ist analog zu den Vorgaben der TASI gestaltet, die Mächtigkeit der Rekultivierungsschichten orientiert sich an aktuellen Empfehlungen (z.B. BRAUNS et al. 1997).

Die Abgrenzung am Fuß der Lysimeterfelder bildet ein mit dem Untergrund verzahnter bindiger Randwall. Zur seitlichen Abgrenzung der Lysimeterfelder dienen ca. 1 m hohe Trenndämme aus mineralischem Dichtungsmaterial (Proctordichte $\geq 95\%$), die in der Böschungfalllinie verlaufen.

Über diesen Aufbau wurde eine Kunststoffdichtungsbahn ($d = 2,5\text{ mm}$) verlegt und verschweißt, die seitlich und unterhalb auf die Trenndämme hochgezogen wurde, so dass zwei dichte Wannen entstanden. Die verwendete Kunststoffdichtungsbahn (KDB) besteht aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Sie ist 2,5 mm dick und zur Gewährleistung der erforderlichen Scherparameter beidseitig strukturiert („sandrauhe“ Struktur). Die Dichtungsbahn besitzt eine Zulassung durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) für den Einsatz als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung im Deponiebau. Während des Einbaus erfolgte eine lückenlose Dichtheitsprüfung der Schweißverbindungen gemäß DVS-Richtlinie 2225, Teil 4, durch eine kunststofftechnische Fremdprüfung. Da die Kunststoffdichtung nicht bis zur Bodenoberfläche reicht, werden Randumläufigkeiten, z.B. durch den Eintritt von Regenwasser vermieden.

Zur Vermeidung von Beschädigungen der Kunststoffdichtungsbahn in den Lysimeterfeldern wurde diese nach dem Bau der Wannen durch ein Schutzvlies mit einem Flächengewicht von 1.200 g/m^2 abgedeckt.

Darauf folgt eine 30 cm mächtige Entwässerungsschicht aus durchlässigem Schottermaterial (Korngröße 0/56), auf dem die beiden Rekultivierungsschichten direkt aufliegen.

Die verdichtete Rekultivierungsschicht im K-Feld wurde mit einer Mächtigkeit von ca. 2,1 m, die unverdichtete im U-Feld mit ca. 20 cm Überhöhung zum Feld K eingebaut, um zu erwartende Setzungen des lockeren Materials auszugleichen (siehe 4.1.3.2). Nach Einbau des Mineralbodens wurde außer in Feld B eine 2 cm dünne Kompostschicht (ca. 10 kg/m^2) ohne Einarbeiten von Hand auf die Bodenoberfläche aufgebracht, um den Anteil organischer Substanz zu erhöhen. Damit soll, im Gegensatz zu dem in der Rekultivierungspraxis üblichen Humusieren (Auftrag von 20 - 30 cm stark humosem Oberboden), die Tiefendurchwurzelung angeregt und so der Wasserentzug durch die Vegetation verbessert werden.

Die Lysimeterfelder werden durch 3 m breite KDB-Streifen auf der Bodenoberfläche voneinander und von der Umgebung abgegrenzt, um lateralen Wasserzutritt zu vermeiden. Hierzu wurde eine UV-stabilisierte Folie aus PE-HD mit einer Stärke von 0,75 mm verwendet. Diese Streifen leiten durch eine muldenförmige Profilierung des Untergrundes Niederschlagswasser ab (siehe Abbildung 2-2 und Bild 1).

2.3.1.3 Instrumentierung der Versuchsfelder in Leonberg

Großlysimeterfelder dienen dem Erfassen der Abflüsse, z.B. von Waldstandorten, unter weitgehender Erhaltung ungestörter Wuchsbedingungen (PROKSCH 1990). Sind Niederschlagssummen und die Abflussraten (Oberflächenabfluss, Absickerung) bekannt, so können exakte, zeitlich hoch aufgelöste Wasserhaushaltsbilanzen erstellt werden (siehe 3.1).

In Leonberg wird das Sickerwasser aus den Rekultivierungsschichten in der Entwässerungsschicht am unteren Rand der Lysimeterfelder mit einer gelochten Dränleitung gesammelt und in separaten Rohrleitungen zur quantitativen Erfassung der Messstation zugeführt. Am Fuß des Lysimeterfeldes U wird der Oberflächenabfluss in einer PEHD-Rinne gefasst und ebenfalls zur Messeinrichtung geleitet. Aus Kostengründen wurde auf die Erfassung der Oberflächenabflüsse aus beiden Testfeldern verzichtet, denn Da die Bodenoberfläche beider Versuchsfelder gleich gestaltet ist (siehe 4.2), sind gleiche Oberflächenabflussraten zu erwarten. Weiterhin zeigen die Ergebnisse von Untersuchungen an Großlysimeterfeldern, dass Oberflächenabfluss spätestens nach wenigen Jahren keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die Wasserhaushaltsbilanz von Oberflächenabdichtungen und Rekultivierungsschichten hat (siehe 4.5.3).

Die Lysimeterfelder sind mit folgenden Messeinrichtungen zur laufenden Überwachung des Bodenwasser-/Bodenlufthaushaltes und der bodenmechanischen Eigenschaften bestückt (Abbildung 2-3, Tabelle 2-2):

1. Bodenwasserhaushalt

Die Abflüsse der Lysimeterfelder werden in eine Messstation geleitet und kontinuierlich aufgezeichnet. Weiterhin werden mit den in Tabelle 2-2 aufgeführten Messgeräten Bodenwassergehalt und -wasserspannung in vier Tiefenstufen in regelmäßigen Zeitabständen von ca. zwei Wochen gemessen.

2. Setzungseigenschaften

Unverdichtet eingebaute Böden sind Setzungen unterworfen. Um das Ausmaß dieser Entwicklung zu dokumentieren, sind in Feld U sechs Messpunkte (Vermarkungen) zur Dokumentation von Bodenbewegungen installiert.

3. Bodenlufthaushalt

Der CO₂-Gehalt der Bodenluft wird in vier Tiefenstufen an je zwei Messpunkten in jedem Lysimeterfeld in Zeitabständen von ca. zwei (Vegetationszeit) bis vier (Winter) Wochen gemessen.

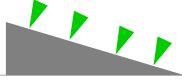




4. Scherparameter

Da Untersuchungen zum Scherverhalten unverdichteter Substrate bisher nur im Labor vorgenommen werden konnten, war es unerlässlich, in der ersten großtechnischen Umsetzung zu prüfen, inwieweit die Ergebnisse der Laborversuche auf die realen



Bedingungen in der Natur tatsächlich übertragbar sind. Aus diesem Grunde wurden in Feld U eigens entwickelte Einrichtungen zur Ermittlung der Scherparameter in-situ des locker gelagerten Substrats eingebaut („Karlsruher Schertester“).

Tabelle 2-2: Instrumentierung der beiden Großlysimeterfelder U und K (Deponie Leonberg)

In beiden Lysimeterfeldern (**U** - unverdichtet / **K** - konventionell verdichtet):

Messgröße Methode		Lage	Tiefenstufe [cm]			
			25	50	85	135
➤ Bodenwassergehalt TDR-Punktmessung	4		■	◆	●	▼
	1		■		●	▼
➤ Wasserspannung Einstich-Tensiometer	2		■	◆	●	▼
➤ Bodentemperatur Thermometer	2		■	◆	●	▼
➤ Bodenluft: CO₂-Gehalt Gaslysimeter	2		■	◆	●	▼

In Testfeld **U**:

➤ Schereigenschaften In-Situ-Schertester	2			◆		▼
➤ Bodenmechanik Bewegungs-/Setzungspegel	6		Bodenoberfläche			

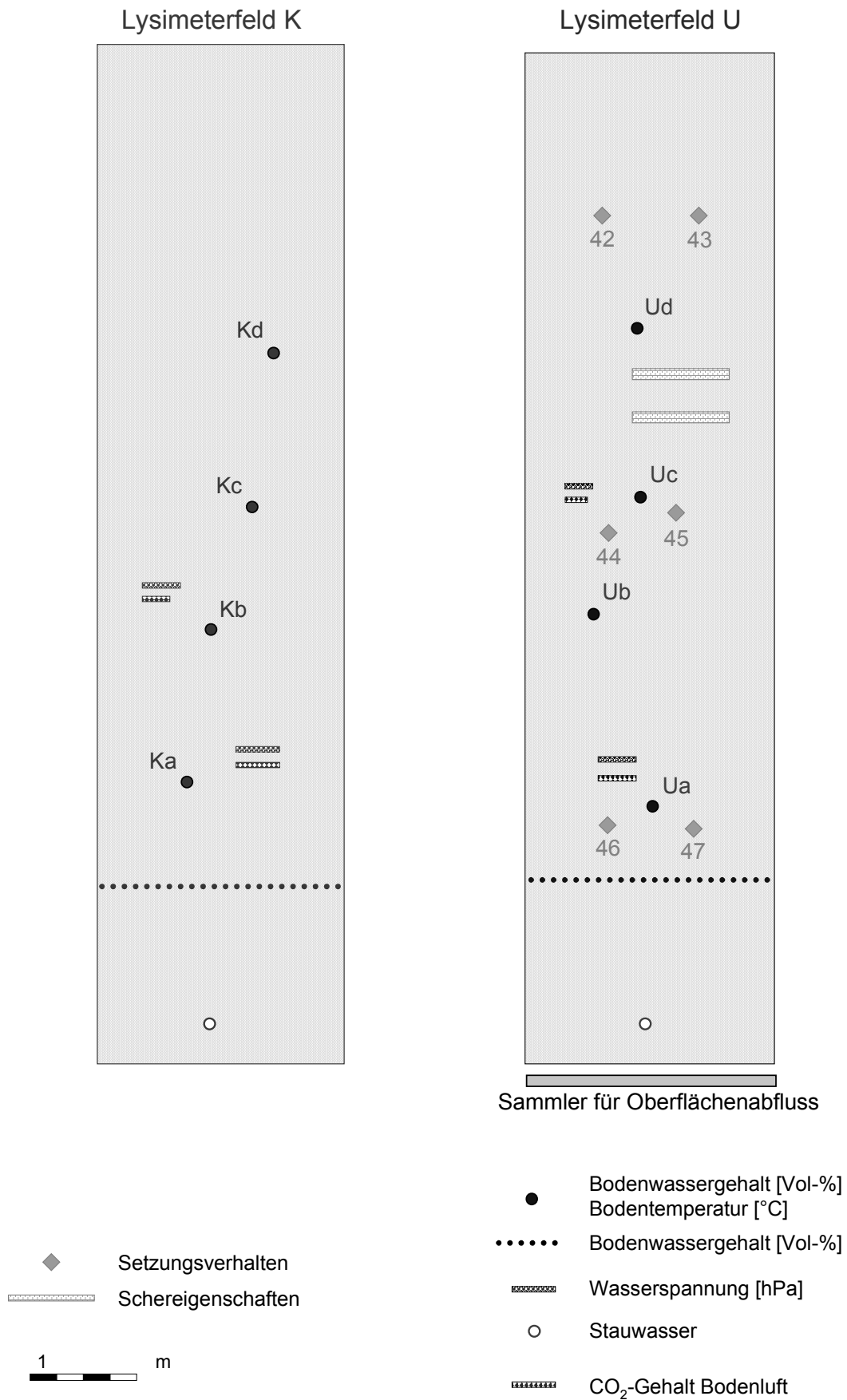


Abbildung 2-3: Anordnung der Messinstrumente und Bezeichnung der Messpunkte in den Groß-lysimeterfeldern auf der Kreismülldeponie Leonberg (GO = Geländeoberfläche)

2.3.2 Wirkung von Wurzelsperren (Freifeldprüfanlage Freiburg)

Die Versuchsanordnung zur Prüfung der Wirksamkeit von Wurzelsperren wurde auf der Freifeldprüfanlage des Instituts für Landespflege in Freiburg-Günterstal eingerichtet. Es werden vier Varianten von Wurzelsperren (Tabelle 2-3) in je 6 m² grossen Feldern untersucht (Abbildung 2-4). Die Felder sind analog dem Regelaufbau nach TAS_I (1993), jedoch ohne Dichtungselemente, aufgebaut (Abbildung 2-5). Zwischen Rekultivierungs- und Entwässerungsschicht wurden die Wurzelsperren eingesetzt. Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht beträgt lediglich 50 cm, um die Durchwurzelung bis zur Wurzelsperre zu beschleunigen. Als Rekultivierungssubstrat wurde der anstehende Boden verwendet. Es handelt sich um einen lehmigen Sand mit einem bis in ca. 20 cm Tiefe reichenden humosen Oberboden. Das Oberbodenmaterial wurde beim Ausbaggern der Versuchsfelder separat abgehoben, zwischengelagert und später wieder an ursprünglicher Stelle eingebracht. Der Steingehalt des Materials konnte durch Auslesen der Blöcke mit mehr als 10 cm Durchmesser auf ca. 5 - 10 Vol-% reduziert werden. Die Entwässerungsschicht besteht einheitlich aus ca. 15 cm Filterkies der Körnung 16/32. Um die unterschiedlichen Materialstärken der mineralischen Wurzelsperren (30 cm) und der Wurzelspermatte (< 1 cm) auszugleichen, wurden bei dieser Variante ca. 40 cm Filterkies sowie 5 cm Sand als Feinplanum aufgebracht.

Tabelle 2-3: Versuchsvarianten zur Überprüfung der Wirkung von Wurzelsperren

Wurzelsperren-Varianten	
1. Wurzelspermatte Linteco-Wurzelstopp	Die Matte besteht aus drei Schichten: einem oberen und unteren Geotextil mit zwischengelagerter gelochter Kupferfolie. Die drei Komponenten sind miteinander vernäht.
2. Dränbeton	Kies 8/16 und 16/32 Zement (90 CEM I 32,5 R) 170 kg/m ³ und Wasser 70 kg/m ³ unverdichteter Einbau (siehe Bild 2)
3. Sand, verdichtet	Betonsand (0/8), 3-lagig verdichtet, Trockenraumdichte 1,5-1,6 g/cm ³ , Ø (n = 9) 1,56 g/cm ³
4. Glassplitt, verdichtet	Recycling-Glassand (0/8), 3-lagig verdichtet (siehe Bild 3) Trockenraumdichte nicht bestimmbar

Als Begrenzung der Versuchsfelder wurden Holzbretter eingebaut, um das Einwachsen von Wurzeln aus der Umgebung oder benachbarten Feldern zu unterbinden. Der Einbau des Dränbetons erfolgte unverdichtet, um seine Wasserdurchlässigkeit nicht zu verringern. Die Wurzelsperren der Varianten *Sand* und *Glassplitt* wurden beim Einbau in mehreren Schichten mit einem Vibrationsplattenrüttler verdichtet. In der Sandvariante war

es möglich, die erreichten Dichten mit Stechzylinderproben exakt zu ermitteln. Trotz intensiver maschineller Verdichtung wurden beim Einbau des Sandes mit einem Wassergehalt von ca. 4 Vol-% nur Trockenraumdichten zwischen 1,5 und 1,6 g/cm³ erreicht. Aus der Glassplittvariante konnten aufgrund der Struktur und der fehlenden Kohäsion des Materials keine Proben mit Stechzylindern entnommen werden. Der Glassplitt ließ sich jedoch nur wenig verdichten, weil er eine sehr grobe und relativ einheitliche Körnung aufweist.

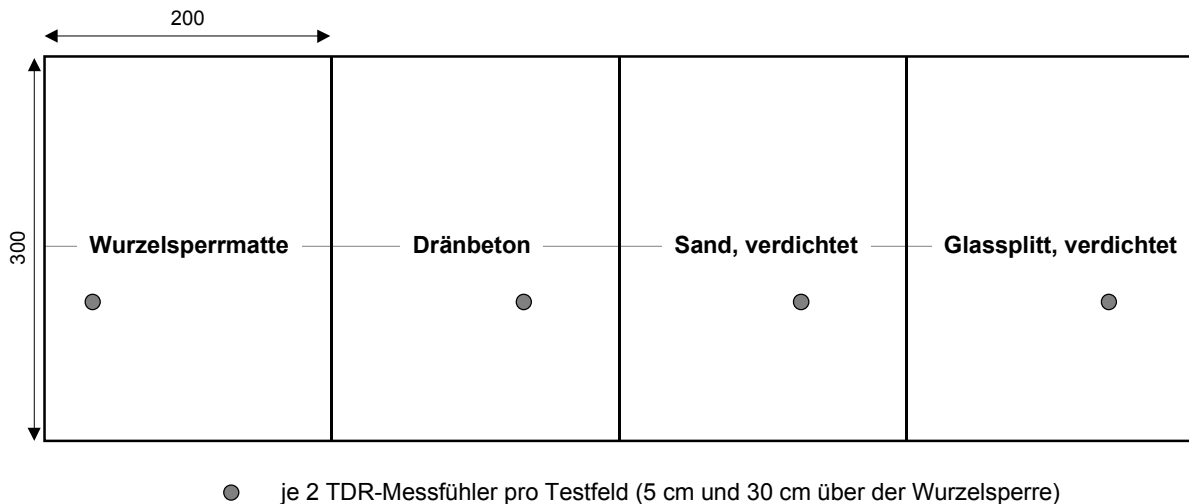


Abbildung 2-4: Anordnung der Wurzelsperren-Versuchsfelder und Messeinrichtungen (alle Maße in cm), aus statischen Gründen wurde jedes Feld in der Mitte unterteilt.

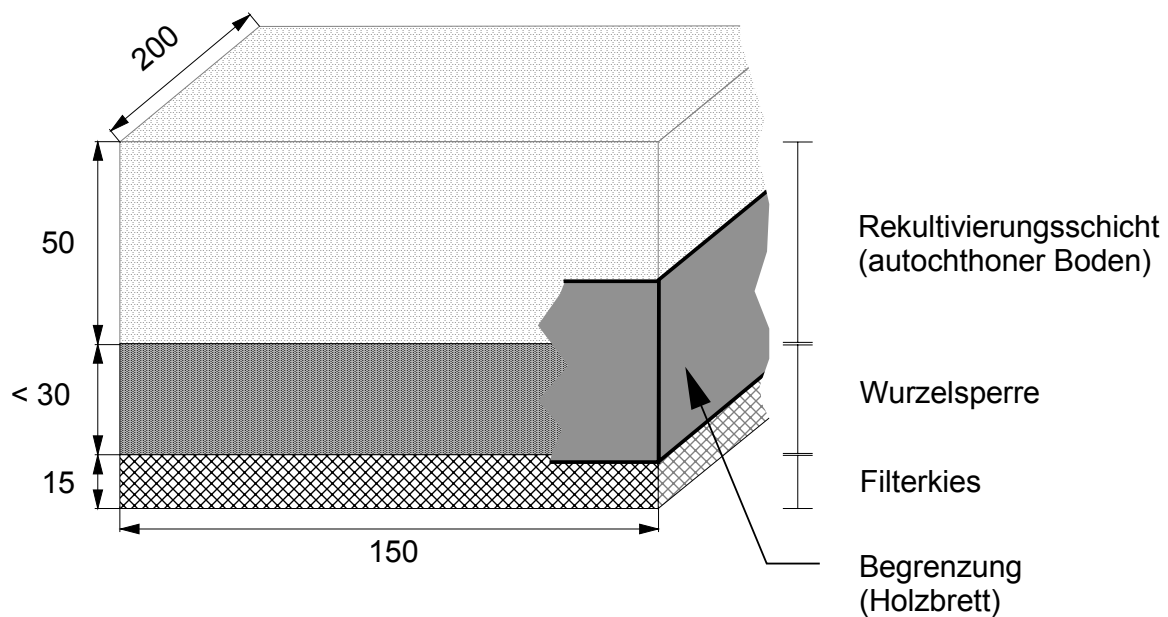


Abbildung 2-5: Aufbau der Wurzelsperren-Versuchsfelder (alle Maße in cm)



Bild 2: Bau der Wurzelsperren-Testfelder: unverdichtetes Einschütten des Dränbetons



Bild 3: Bau der Wurzelsperren-Testfelder: Einbau und Verdichten des Recycling-Glassplitts

Die Bepflanzung der Versuchsfelder in Günterstal erfolgte in mehreren Schritten:

1. Beide Felder einer Variante wurden nach Abschluss der Erdarbeiten (April 2000) flächendeckend mit Ölrettich (*Raphanus sativus* ssp. *oleiferus*) eingesät.
2. In jeweils ein Feld wurden zusätzlich jeweils zwei Heister der Zitterpappel (*Populus tremula*) gepflanzt, um später die Wirkung von Gehölzwurzeln zu untersuchen.
3. Der in der Umgebung der Versuchsfelder vorkommende Ampfer (*Rumex obtusifolius*) ist als tiefwurzelnde Art mit kräftiger Pfahlwurzel bekannt (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 1992, LINERT 1995). Deshalb wurden im Oktober 2000 aus dem angrenzenden Wiesengelände kräftige Ampferpflanzen in die Testfelder verpflanzt. Gleichzeitig wurden weitere Zitterpappeln (*Populus tremula*) gepflanzt, um die Ausfälle im Sommer zu ersetzen.

Um die Auswirkungen der Wurzelsperren auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht zu untersuchen, wurden in jedem Testfeld zwei TDR-Sonden installiert, mit denen der Wassergehalt des Bodens bestimmt werden kann:

- Eine Sonde 5 cm oberhalb der Wurzelsperre und
- eine zweite Sonde 30 cm oberhalb der Wurzelsperre.

Zusätzlich kann mit einer Einstichsonde der Bodenwassergehalt der Bodenoberfläche bis in 15 cm Tiefe gemessen werden.

Da die Versuchsanlage Günterstal in einem niederschlagsreichen Tal am westlichen Schwarzwaldrand liegt, waren die Böden insgesamt sehr gut wasserversorgt (siehe 5.2). Das Austrocknen des Bodens stimuliert die Pflanzen zur Tiefendurchwurzelung, um die Wasserversorgung sicherzustellen. Um diesen Effekt zu erreichen, wurde die Versuchsanlage im Frühjahr 2002 mit einem Foliendach versehen. Auf diese Weise werden Niederschläge abgehalten und die hierdurch hervorgerufene zeitweise größere Trockenheit fördert eine intensivere Wurzelerschließung der Böden.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Der Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten

Alle im Hinblick auf die Vorgaben der TASI zur Minimierung der Absickerung relevanten Prozesse des Wasserhaushalts von Böden und Rekultivierungsschichten können summarisch mit der allgemeinen Wasserhaushaltsgleichung beschrieben werden:

$$N = ET + A \pm \Delta B$$

N = Niederschlag / ET = Evapotranspiration / A = Abfluss, Absickerung / ΔB = Wasservorratsänderung

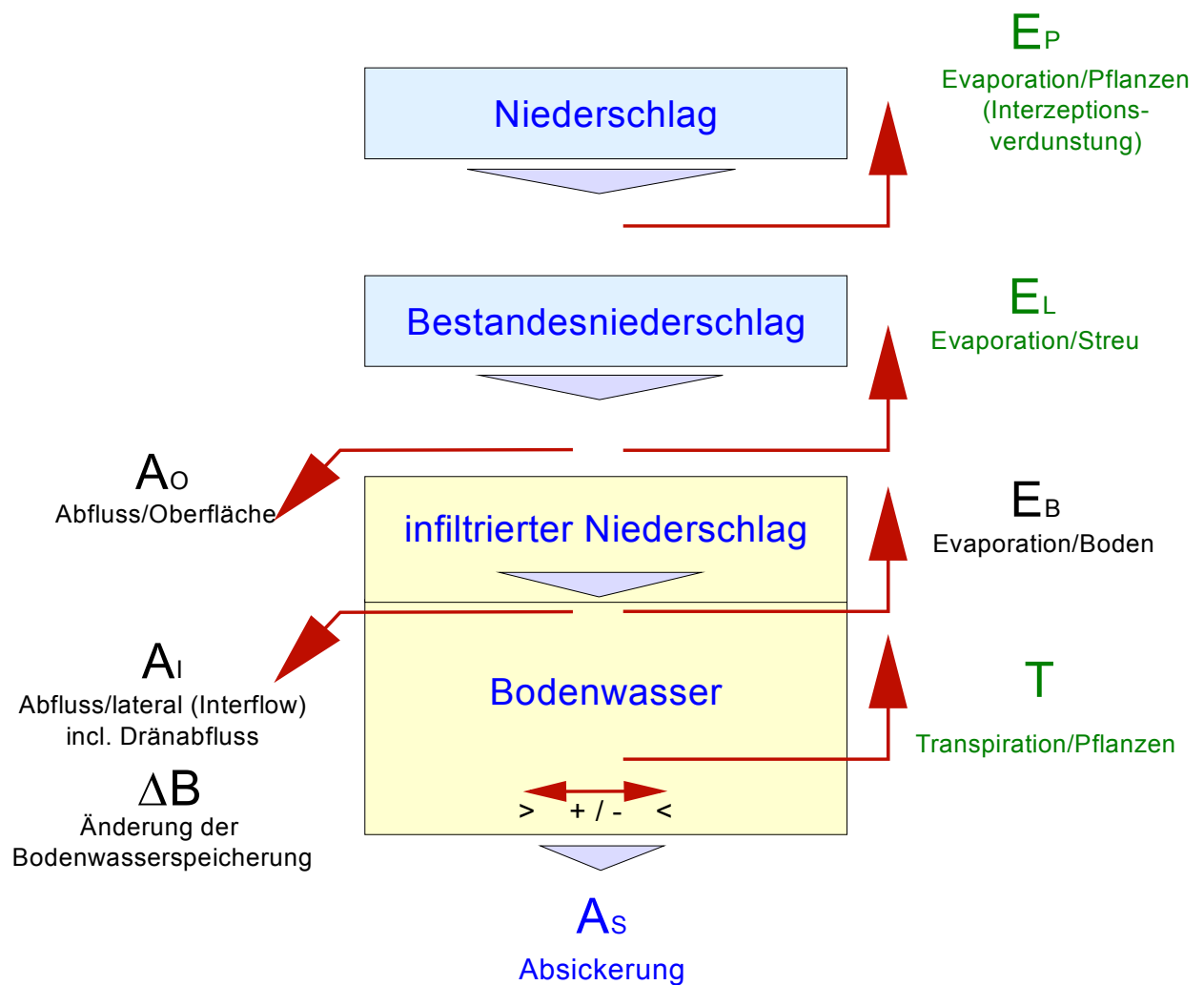


Abbildung 3-1: Wasserhaushaltsbilanz einer Rekultivierungsschicht mit Bewuchs (aus WATTENDORF & SOKOLLEK 2000)

In humiden Klimaten ist davon auszugehen, dass die Niederschlagssumme die tatsächliche Evapotranspiration übersteigt und somit ein Abfluss (Versickerung) erfolgt. In Deutschland fallen im Mittel ca. 700 - 800 mm Niederschlag, die tatsächliche Verdunstung beträgt je nach Vegetationsausprägung ca. 400 - 700 mm (BERGER & SOKOLLEK 1997). In niederschlagsarmen Gebieten, wie dem Oberrheintal, kann die Absickerung daher äußerst geringe Werte erreichen (z.B. LEHNHARDT & BRECHTEL 1980).

Die Eigenschaften des Bodens und der Vegetation eines Standortes beeinflussen alle Glieder dieser Gleichung mehr oder weniger stark (z.B. PROKSCH 1990) und nehmen damit direkten Einfluss auf die Absickerungs- bzw. Grundwasserneubildungsrate. Dies wird deutlicher, wenn man die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung in weitere Teiglieder zerlegt (Abbildung 3-1), die nachfolgend unter dem Aspekt der Reduzierung und Vergleichmäßigung der Absickerung betrachtet werden:

- $N - E_P - E_L = N_B$

Der Bestandesniederschlag (N_B) ist der Anteil vom Gesamtniederschlag N , der nach Passage der Pflanzen- und Streudecke die Bodenoberfläche erreicht. Er hängt einerseits von der Evaporation (Interzeptionsverdunstung) auf den Pflanzenoberflächen (E_P) und der Streudecke (E_L) ab, andererseits wird er von den meteorologischen Größen Niederschlagsmenge und -verteilung beeinflusst.

Je üppiger die Vegetationsdecke entwickelt ist, desto mehr Blattfläche steht als Zwischenspeicher für Niederschlagswasser zur Verfügung. Waldbestände weisen die höchsten Blattflächenindices (LAI) auf, insbesondere, wenn sie „stockwerkartig“ z.B. aus unterschiedlich hohen Baumschichten, einer Strauch- und einer Krautschicht aufgebaut sind. Das auf Blattoberflächen zwischengespeicherte Niederschlagswasser ist Sonne und Wind ausgesetzt und gelangt von dort wieder als Wasserdampf in die Atmosphäre zurück oder fließt mit zeitlicher Verzögerung als Stammabfluss dem Boden zu. Diese Abflussverzögerung kann auch den Oberflächenabfluss und damit verbundene Bodenerosionsprozesse verringern.

- $N_B - A_O = N_i$

Der in den Boden infiltrierte Niederschlag N_i ergibt sich aus Bestandesniederschlag und Oberflächenabfluss (A_O). Im Hinblick auf eine Minimierung der Absickerung aus der Rekultivierungsschicht könnten hohe Oberflächenabflussraten prinzipiell akzeptiert werden. In der Realität erfolgen Oberflächenabflüsse auf bewachsenem Boden jedoch fast nur bei Starkniederschlägen und sind meist mit unerwünschter Bodenerosion gekoppelt. Neben der Erhöhung der Rauigkeit der Bodenoberfläche durch die Vegetation verhindert auch eine ausreichende Infiltration hohe Oberflächenabflussraten und somit auch Wassererosion.

- $ET_a = E_B + E_P + E_L + T$

Die (tatsächliche oder reale) Evapotranspiration ET_a setzt sich aus den Komponenten Evaporation von Boden, Pflanzenoberflächen und Streu (s.o.) sowie der Transpiration T , der Verdunstung durch die Pflanzen selbst, zusammen.

Während der physikalische Prozess der Bodenverdunstung in Abhängigkeit von der Bodenart meist nur eine relativ geringmächtige Bodenschicht entwässern kann, nehmen Pflanzen im optimalen Fall aus der gesamten durchwurzelten Bodenmatrix Wasser auf und führen es wieder der Atmosphäre zu. Die Transpiration ist aus physiologischen Gründen lebensnotwendig für die Pflanze und wird aufrechterhalten, solange ausreichend Bodenwasser von den Wurzeln aufgenommen werden kann.

Die Gesamtverdunstung eines Pflanzenbestandes hängt ab von

- der Energiezufuhr aus der Atmosphäre,
- dem Sättigungsdefizit der umgebenden Luft,
- der Windgeschwindigkeit,
- der verfügbaren nutzbaren Wasserspeicherung und der Wasserleitfähigkeit des Bodens,
- der Bestandesstruktur des Pflanzenbestandes sowie
- artenspezifischen Mechanismen der Transpirationssteuerung.

Meist wird die physikalisch mögliche Verdunstung (potentielle Evapotranspiration ET_p) von der tatsächlichen Verdunstung (ET_a) nicht erreicht. Vor allem während der Sommermonate, wenn aufgrund günstiger Witterungsbedingungen (Temperatur, Strahlung) hohe Verdunstungsraten möglich wären, lässt eine nicht ausreichende Wasserversorgung bzw. -nachlieferung aus dem Boden die tatsächliche hinter der potentiellen Evapotranspiration zurückbleiben. Ebenso reagieren die meisten Pflanzen auf abnehmende Bodenwassergehalte bzw. steigende Wasserspannung im Wurzelumfeld frühzeitig mit einer Einschränkung ihrer Transpirationsleistung (LYR et al. 1992), um einer Austrocknung und Wasserstress vorzubeugen. So beträgt beispielsweise der Wasserverbrauch eines 30jährigen Fichtenbestandes unter sonst gleichen Bedingungen bei Bodenwassergehalten unter 50 % der nutzbaren Wasserspeicherkapazität (nWSK) ca. 2 mm/d, bei höheren Bodenwassergehalten dagegen ca. 3,7 mm/d (LYR et al. 1992).

- ΔB

Die nutzbare Wasserspeicherkapazität des Wurzelraums ist eine Schlüsselvariable im Hinblick auf die Reduzierung von Absickerungsmengen. Böden mit hoher (nutzbarer) Wasserspeicherkapazität sind in der Lage, die Niederschlagsüberschüsse des Winters und Frühlings sowie ergiebige Sommerniederschläge aufzunehmen und zwischenzuspeichern. Das gespeicherte Sickerwasser kann dem Boden in Phasen höchster potentieller Evapotranspiration durch die Pflanzen wieder entzogen werden. Ein aufnahmefähiger Bodenwasserspeicher trägt dazu bei, eine üppige, mehrschichtige und langfristig stabile Vegetationsdecke zu erhalten, die sowohl hohe

Evapotranspirationsraten erreicht, als auch längere Trockenphasen mit unzureichender Wasserversorgung überstehen kann. Nach erschöpfter Wasserspeicherkapazität ist nicht nur die aktuelle Evapotranspiration in Trockenperioden vermindert, es kann darüber hinaus auch eher zu Trockenstress mit entsprechenden Anpassungsreaktionen kommen, die mittelfristig mit verminderter potentieller Evapotranspiration einhergehen.

Neben der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht beeinflusst eine Reihe von Bodeneigenschaften die (Gesamt-) Wasserspeicherkapazität und den hiervon pflanzenverfügbaren Anteil (nutzbare Wasserspeicherkapazität²) eines Bodens:

- Humusgehalt
- Bodenart (Körnung) und Porung
- Lagerungsdichte (Trockenraumdichte)
- Gefügeeigenschaften

Das sich aus diesen Bestimmungsgrößen ergebende Wasserspeicherpotential wird jedoch erst durch eine entsprechende Erschließung des Unterbodens mit Wurzeln verfügbar gemacht und diese hängt neben dem artspezifischen Durchwurzelungsverhalten auch von den physikalischen (z.B. Lagerungsdichte) und chemischen (z.B. Bodengashaushalt) Bodeneigenschaften ab.

Weiterhin beeinflusst die Wasserleitfähigkeit den Wassertransport aus feuchteren in trockenere Bodenzonen, beispielsweise zu wasseraufnehmenden Pflanzenwurzeln, sowie die Infiltration das Eindringen von Regenwasser in den Boden.

² in der Bodenkunde auch (nutzbare) Feldkapazität genannt

3.2 Die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht

Während die Rekultivierung von Deponien erst seit wenigen Jahrzehnten Thema eingehender Untersuchungen ist (z.B. NEUMANN 1971 und 1981, KONOLD 1981, KONOLD & ZELTNER 1981), wurden bei der Rekultivierung von Bergbaufolgeflächen langjährige Erfahrungen gesammelt. Die hierbei erworbenen allgemeinen Erkenntnisse zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten lassen sich jedoch nur bedingt auf Deponien übertragen, da meist spezielle Ausgangssubstrate (Bergematerial, Abraum u.a.) und grundsätzlich andere Rekultivierungsverfahren (z.B. Bodenauftrag mit Großabsetzern) Anwendung finden. Ebenso wie im Bergbau stand in der Vergangenheit auch in der Deponierekultivierung die sogenannte „Begrünung“ unter landschaftspflegerischen Aspekten oder die Wiederherstellung nutzbarer Agrar- und vor allem Forststandorte im Vordergrund der Bemühungen. Seit einigen Jahren wird der Wasserhaushaltsfunktion der Rekultivierungsschicht verstärkt Beachtung geschenkt. So formuliert die TA SIEDLUNGSABFALL folgende Anforderungen an den Aufbau:

- Schutz der Dichtung vor Frost und Erosion sowie
- Eignung als Substrat eines späteren Bewuchses, der so auszuwählen ist, *dass die Infiltration von Niederschlagswasser in das Entwässerungssystem minimiert wird.*

Eine unter dieser Maßgabe hergestellte „Wasserhaushaltsschicht“ reduziert und gleichmäßig die Abflüsse in die Entwässerungsschicht. Sie trägt auf lange Sicht zur Umweltvorsorge bei, da die Versickerung in den Deponiekörper mit natürlichen Mitteln zeitlich unbegrenzt funktioniert, während alle technischen Dichtungssysteme einer Alterung und damit einhergehendem Funktionsverlust unterworfen sind.

Unter den in Mitteleuropa gegebenen Klimabedingungen ist es nur in wenigen Gebieten ausreichend, durch das alleinige Aufbringen einer Rekultivierungsschicht, einer sogenannten „qualifizierten Abdeckung“, die Versickerung vollständig zu unterbinden (BERGER & SOKOLLEK 1997). Allerdings ist die Versickerungsrate in hohem Maß von den Substrateigenschaften und der Vegetationsdecke abhängig (z.B. MITSCHERLICH 1981, BRECHTEL 1984, siehe 3.1). So zeigen Standortuntersuchungen und Wasserhaushaltsmodellierungen älterer Abdeckungen, dass Bereiche, die z.B. mit gut geeigneten Substraten und geringer Verdichtung „besser“ rekultiviert wurden, deutlich günstigere Wasserhaushaltseigenschaften mit geringeren Absickerungsraten (WATTENDORF & BÖNECKE 1999) aufweisen.

Der Gestaltung der Rekultivierungsschicht, dem Einbau des Substrats und der Bepflanzung bzw. Vegetationssteuerung kommt deshalb eine große Bedeutung zu (z.B. WOHLRAB 1997, DGGT 2000a, WATTENDORF & SOKOLLEK 2000). Um eine möglichst weitgehende Sickerwasserreduzierung zu erreichen, sind gesunde, standortgerecht aufgebaute Vegetationsbestände (Hinweise dazu in BRAUNS et al. 1997, BÖNECKE 2001) erforderlich, welche die Rekultivierungsschicht horizontal und vertikal möglichst intensiv durchwurzeln. Dies ist notwendig, um versickerndes Bodenwasser aus dem gesamten

Wurzelraum aufzunehmen und zu transpirieren. Wichtigste Voraussetzungen hierzu sind neben der Verwendung geeigneter Rekultivierungssubstrate ein lockerer Einbau ohne Verdichtungen (z.B. BÖNECKE 1994) sowie eine funktionierende Bodenorganismengemeinschaft.

Die Vegetation sich selbst überlassener Flächen entwickelt sich über verschiedene Sukzessionsstufen weiter, so dass auf nahezu allen Standorten in Mitteleuropa schließlich Waldbestände entstehen. Wälder sind auch im Hinblick auf die Minimierung des Sickerwasseranfalls die für Deponieoberflächen günstigste Vegetationsform (BRECHTEL 1984) und somit grundsätzlich anzustreben. Probleme mit Gehölzbeständen ergeben sich in Fragen der Standsicherheit sowie der Gefährdung der Dichtungskomponenten durch einwachsende Wurzeln (siehe 3.3). Hierzu wurden von BRAUNS et al. (1997) die Möglichkeiten der Bewaldung rekultivierter Deponien auch im Hinblick auf die Standsicherheit der Oberflächenabdichtung geprüft. Es kann davon ausgegangen werden, dass Gehölzbewuchs an Böschungen flacher 1:3 grundsätzlich möglich ist. Jedoch konnten weitere relevante Fragen, v.a. zur Standsicherheit locker eingebauter Rekultivierungssubstrate, im Rahmen dieser Literaturstudie nicht geklärt werden.

Der Stand der Kenntnisse zur Gestaltung und zum Bewuchs von Rekultivierungsschichten unter Wasserhaushaltsaspekten wurde in den GDA-Empfehlungen E 2-31 und E 2-32 (DGGT 2000 und 2000a) zusammengefasst.

3.3 Begrenzung des Wurzelwachstums

Unter den natürlichen Einwirkungsfaktoren auf die Oberflächenabdichtung kommt dem Wurzelwachstum, vor allem von Gehölzen, die größte Bedeutung zu. Die einzelnen Komponenten des Dichtungssystems sind hierbei in unterschiedlichem Maß anfällig gegenüber der Durchwurzelung. Praxiserfahrungen, insbesondere über längere Zeiträume, liegen bisher jedoch nicht vor. Kunststoffdichtungsbahnen aus HDPE-Folien können, zumindest während ihrer vollen Funktionstüchtigkeit und bei einwandfreier Verlegung, als absolute Wurzelsperren angesehen werden (LINERT 1995). Mineralische Dichtungen sind aufgrund ihrer hohen Trockenraumdichte und des geringen Porenvolumens für Pflanzenwurzeln nur sehr schwer zu durchdringen. Im Gegensatz dazu zeigen Aufgrabungen in Testfeldern mit mineralischen Dichtungen, dass diese bei einer Austrocknung sehr leicht durchwurzelt werden können (z.B. MELCHIOR 1993). Die Durchwurzelung fördert die weitere Austrocknung und beschleunigt und verstärkt somit die Beeinträchtigung der Dichtungsfunktion. Absterbende Wurzeln hinterlassen vertikale Röhren als bevorzugte Fließwege. Auch Kapillarsperren und Bentonitmatten werden von eindringenden Pflanzenwurzeln in ihrer Funktion beeinträchtigt.

BRAUNS et al. (1997) empfehlen zum Schutz von Entwässerungsschicht und Dichtungssystem vor Durchwurzelung das Aufbringen einer 2 - 3 m mächtigen Rekultivierungsschicht mit ausreichender Wasserspeicherkapazität, um den Anreiz zur Tiefendurchwurzelung zu unterdrücken. Schichtdicken von mehr als 2 m sind in der Praxis mangels qualitativ geeigneter Materialien und aus Kostengründen meist nicht realisierbar. Einen absoluten Schutz vor Tiefendurchwurzelung bieten sie außerdem nicht (KONOLD et al. 1997). Die Vegetation auf Deponien so zu steuern, dass potenziell tief wurzelnde Pflanzenarten wie Ampfer- (*Rumex spec.*) oder Distelarten (z.B. *Cirsium spec.*) dauerhaft eliminiert werden, wird wegen des immensen Pflegeaufwands nur an wenigen, vorwiegend siedlungsnahen Deponiestandorten, die beispielsweise als Freizeit- oder Erholungsgebiete genutzt werden, möglich sein (WATTENDORF & SOKOLLEK 2000). Es ist deshalb nach Lösungen zu suchen, das Tiefenwachstum von Pflanzenwurzeln über die Rekultivierungsschicht hinaus zu beschränken.

Aus der allgemeinen bodenkundlichen und forstwissenschaftlichen Literatur liegen Erkenntnisse über Bodeneigenschaften vor, die das Wurzelwachstum limitieren (z.B. KÖSTLER et al. 1968). Es sind dies vor allem ungünstige Standortfaktoren wie Staunässe im Untergrund, Bodenverdichtung oder extreme bodenchemische Bedingungen wie Nährstoffmangel oder toxische Konzentrationen von Schadstoffen. Die Mehrzahl dieser Bedingungen kommt jedoch für Deponiestandorte nicht in Frage. Extreme Bodenverdichtung kann bei bestimmten Bodenarten auch an Böschungen Staunässe hervorrufen, und damit die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht bzw. der Oberflächenabdichtung nachteilig beeinflussen.

Maßnahmen zur Begrenzung des Wurzelwachstums müssen diese Problematik berücksichtigen und zwischen Rekultivierungsschicht und Dichtung wurzelhemmende Bodenbedingungen technisch herstellen, ohne die erwünschte intensive Durchwurzelung des darüberliegenden Substrats zu verhindern (siehe 3.2) und die Standsicherheit des Aufbaues zu gefährden. Untersuchungen hierzu sind bisher nicht bekannt.

4 Ergebnisse I: Gestaltung von Rekultivierungsschichten

4.1 Standsicherheit und Setzungsverhalten unverdichteter Rekultivierungsschichten

(A. BIEBERSTEIN, J. BRAUNS, H. REITH)

4.1.1 Problemstellung

Aus bodenmechanischer bzw. erdstatischer Sicht einerseits und andererseits aus pflanzenökologischer Perspektive waren vor allem folgende Problempunkte zu untersuchen (vergleiche auch BRAUNS et al. 1997):

- Ermittlung der erzielbaren Trockendichten bei lockerem Substrateinbau sowie Klärung der Dichteentwicklung unter statischer Belastung bzw. bei Wasserinfiltration, Prognose der zu erwartenden Setzungen zur Ermittlung der erforderlichen Auftragshöhe beim Materialeinbau in situ
- Untersuchung des Scherverhaltens des locker geschütteten Substrates mit einer geeigneten Versuchstechnik im Labor
- Nachweis der Standsicherheit für maßgebende Scherfugen der Testfelder in Leonberg
- Überprüfung des Sackungsverhaltens der Rekultivierungsschicht im Feld
- Entwicklung, Bau und Einsatz einer Messtechnik zur Überprüfung der aktuellen Scherfestigkeit in situ

In diesem Kapitel werden die zu den Teilaspekten Standsicherheit und Setzungsverhalten des Rekultivierungssubstrates durchgeführten Untersuchungen beschrieben und betreffende Ergebnisse mitgeteilt. Im einzelnen handelt es sich um großmaßstäbliche Laborversuche zum Sackungs- und Scherverhalten an regional verfügbarem Lößlehm. Aus dem umfangreichen Untersuchungsprogramm können nur exemplarisch ausgewählte Ergebnisse angeführt werden.

Zur Überprüfung des Verhaltens im Feld wurden spezielle Geräte in situ eingebaut, die vorgestellt werden; erste Ergebnisse werden mitgeteilt.

4.1.2 Laboruntersuchungen

Abbildung 4-1 gibt einige kennzeichnende Größen des Materials wieder, aus dem die klumpigen Aggregate des Schüttstoffes aufgebaut waren. Vergleichsweise durchgeführte Standard-Rahmenscherversuche an zur Fließgrenze aufbereitetem Material haben einen Winkel der Gesamtscherfestigkeit von $\phi_s' \approx 30^\circ$ ergeben.

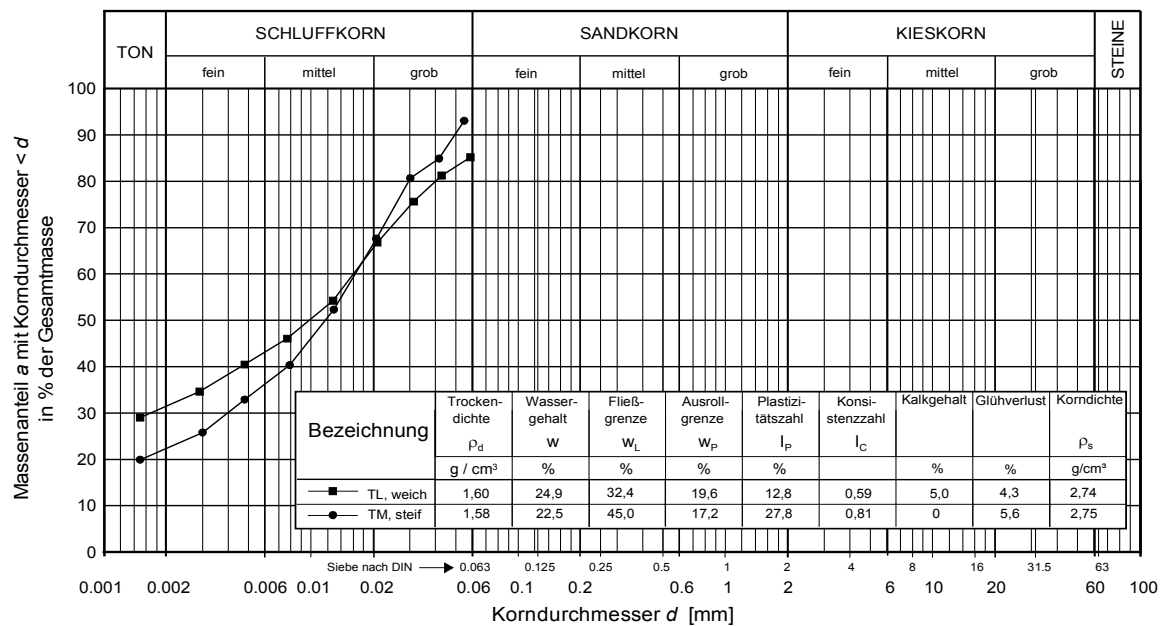


Abbildung 4-1: Kenngößen örtlich verfügbarer und untersuchter Lößlehme

Das Schüttmaterial, dessen Aggregate (Größe bei max. 32 mm) im Ausgangszustand eine Trockendichte um $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$ (entspricht ca. $0,9 \cdot \rho_{\text{Proctor}}$) und einen Wassergehalt im Bereich $w = 23$ bis 25% (deutlich über $w_{\text{Proctor}} \approx 17 \%$) aufwies, wurde in möglichst lockerer Schüttung sowohl in einem Großödometer (Durchmesser: 51 cm) als auch in einem großmaßstäblichen Rahmenschergerät (Probengröße $b \cdot l \cdot d = 1,2 \text{ m} \cdot 1,2 \text{ m} \cdot 0,4 \text{ m}$) auf das Setzungsverhalten unter Last, das Sackungsverhalten unter Befeuchtung und das Scherverhalten unter geringen Auflasten untersucht. Die Untersuchungsergebnisse bildeten die Grundlage der Vorgaben für den Einbau im Feld und für die Bewertung der Verformungen und der Standicherheit in situ.

Haufwerksdichte, Setzungs- und Sackungsverhalten

Die Raumdichte (trocken) des lockeren Aggregathaufwerkes wurde in den verschiedenen Versuchen zu $1,0 \leq \rho_d \leq 1,15 \text{ g/cm}^3$ bestimmt (Größenordnung der Porosität bei $n = 60 \%$). Das Haufwerk wies demgemäß in reichlichem Umfang Makroporen auf, die für den Lufthaushalt und die Durchwurzelbarkeit besonders wichtig sind.

Stellvertretend wird das Verhalten des locker geschütteten Substrates unter einer Belastung von 35 kN/m^2 und anschließender Bewässerung anhand von Ödometerversuchen beschrieben (Abbildung 4-2).

Wie an den aufgetragenen Werten zu Versuchsbeginn zu erkennen ist, lag hier

- die Ausgangstrockendichte bei $\rho_d = 1,05 \text{ g/cm}^3$ (entsprechend $n \approx 60 \%$), der Ausgangswassergehalt bei etwa $w = 13 \%$ (während der Lagerung des Materials bis zum Einbau hat der Wassergehalt somit von ursprünglich 23 bis 25 % durch Verdunstung messbar abgenommen) und
- der relative Sättigungsgrad bei $S_r = 26 \%$.

Unter den relativ geringen Belastungen, die in Anlehnung an die kleinen Auflastspannungen in der 2 bis 3 m dicken Substratschicht im Feld mit $\sigma_{\max} = 35 \text{ kN/m}^2$ gewählt wurden, nahm die Trockendichte nur in Grenzen zu, nämlich allein unter Last bis gegen $\rho_d = 1,18 \text{ g/cm}^3$ ($n \approx 56 \%$).

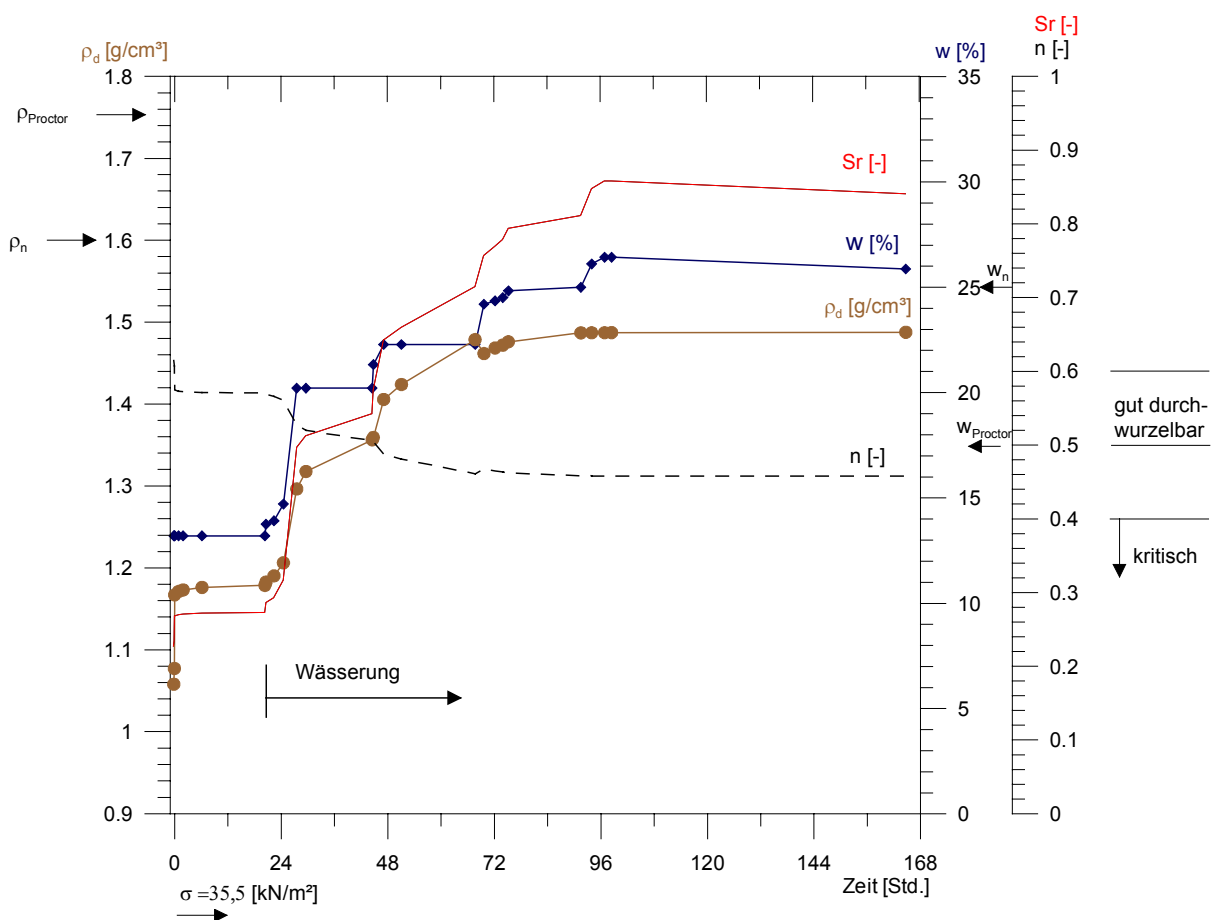


Abbildung 4-2: Locker eingebautes Rekultivierungssubstrat - zeitlicher Verlauf der Trockendichte, der Gesamtporosität, des Wassergehaltes und des Sättigungsgrades während eines Belastungsversuches (Auflast: $\square = 35,5 \text{ kN/m}^2$) mit anschließender Bewässerung

Nach Abklingen der Lastsetzungen wurden die Proben bewässert, um das Sackungsverhalten unter Niederschlagsinfiltration zu untersuchen. Die Bewässerung erfolgte chargenweise bis das kapillare Haltevermögen überschritten war und Wasser unten aus der Probe austrat.

Die dabei eingetretenen Veränderungen der Parameter sind aus Abbildung 4-2 ablesbar: Der Wassergehalt stieg stufenweise an und näherte sich 26 % (zufällig etwa dem natürlichen Wassergehalt gleich), entsprechend stieg die relative Sättigung gegen 85 %, während die Befeuchtung eine Sackung der Probe bewirkte, so dass ρ_d weiter auf etwa $1,48 \text{ g/cm}^3$ (entsprechend einer Abnahme von n auf ca. 45 %) stieg, was ca. dem 0,85-fachen Wert der Proctordichte entspricht. Gleichwohl sank die Gesamtporosität – wie rechts neben dem Diagramm in Abbildung 4-2 angeschrieben – nur unwesentlich unterhalb des Bereiches von 0,5 bis 0,6, der als noch gut durchwurzelbar gilt. Sinkt n unter 0,4, gilt die Durchwurzelbarkeit als nicht mehr gegeben bzw. zumindest als kritisch.

Vergleichbares Verhalten wie im beschriebenen Versuch zeigte sich auch bei weiteren Ödometerversuchen mit anderen Auflastspannungen und entsprechenden Versuchen im Großscherkasten.

Insgesamt ergab sich, dass der Hauptanteil der Verformungen im Zusammenhang mit der Wasserzugabe erfolgt, und die sich dann einstellenden Dichten nur unwesentlich von den hier gewählten Spannungen abhängen (vergleiche Abbildung 4-3).

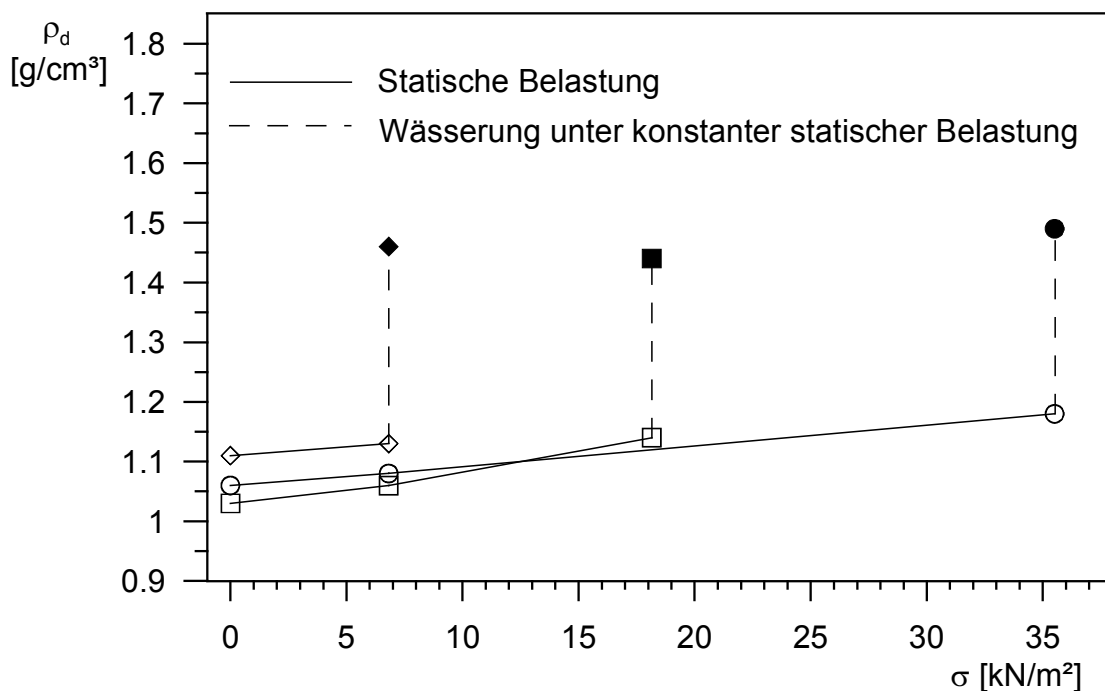


Abbildung 4-3: Resultierende Trockendichten in Abhängigkeit der Auflast und des Bewässerungszustandes (nach MEIER 1999)

Es kann festgehalten werden, dass locker geschüttete Substrate aus (schwach-)bindigem Material als Rekultivierungsschichten eine für die Pflanzenbesiedelung (Durchwurzelung) vorteilhafte hohe Porosität unter Belastungen, wie sie bei Schütthöhen bis 3 m auftreten, behalten. Dies gilt auch unter Einwirkung von Wasserinfiltrationen. Das Verhalten unter Langzeitbedingungen im Feld ist davon unabhängig gesondert zu untersuchen.

Scherverhalten

Das Scherverhalten von Erdstoffen der vorliegenden Art wird gewöhnlich in wohldefinierten Verdichtungszuständen und unter gesättigten Versuchsbedingungen, z.B. im Rahmenscherversuch mit „Wasserbad“, untersucht (vergleiche auch DIN 18 137). Das Ergebnis einer Serie von kleinmaßstäblichen Rahmenscherversuchen (Scherfläche 6 cm x 6 cm) an breiig aufbereitetem und anschließend konsolidiertem Material ist im Diagramm von Abbildung 4-4 dargestellt.

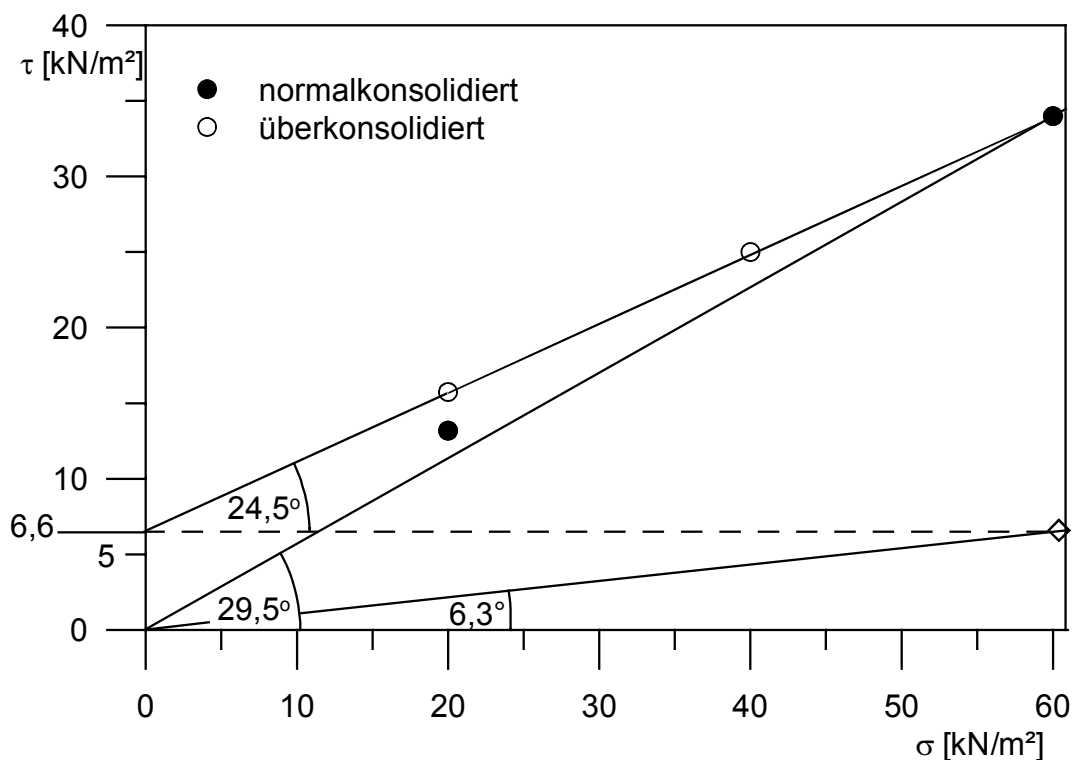
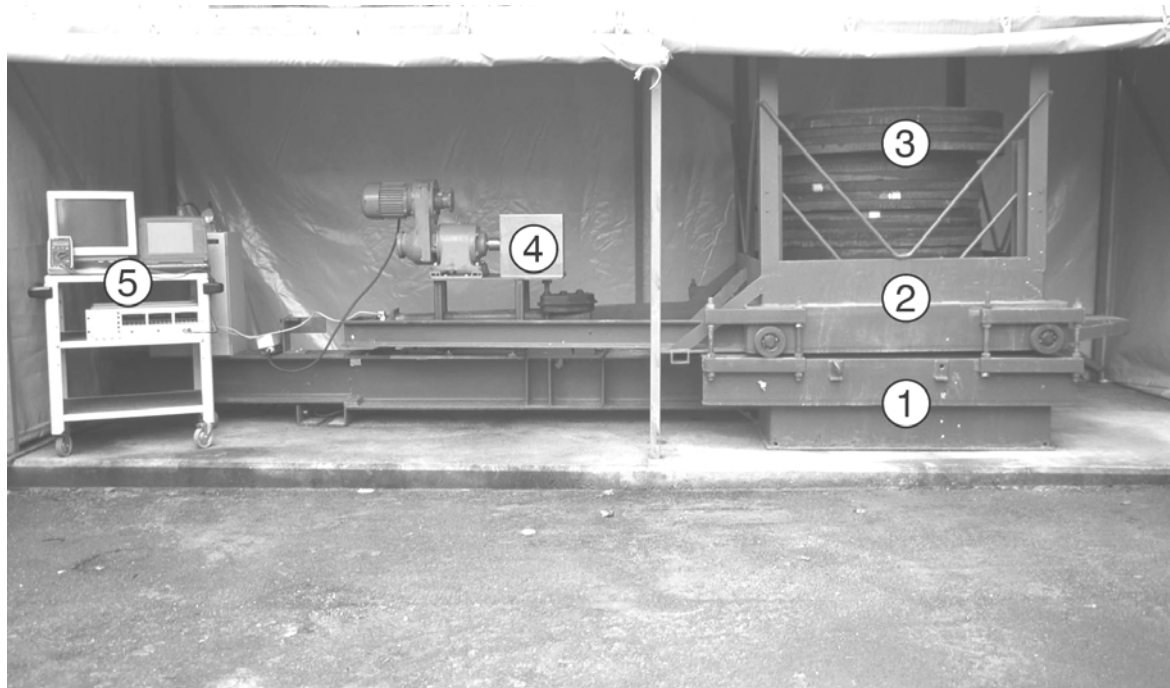


Abbildung 4-4: Ergebnis von üblichen Rahmenscherversuchen an aufbereiteten Substratproben (Scherfläche: 6 cm · 6 cm)

Nach üblicher Interpretation ergibt sich:

- der Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\phi'_s \approx 30^\circ$
- der Winkel der inneren Reibung $\phi' \approx 25^\circ$
- der Winkel der (vorlastabhängigen) Kohäsion $\phi'_c \approx 6^\circ$

Für den Zustand des Substrates bei loser Schüttung als Rekultivierungsschicht stellt sich die Frage nach der in situ verfügbaren Scherfestigkeit unter „natürlichen“ Bedingungen. In einem großmaßstäblichen Rahmenschergerät ist versucht worden, die locker geschütteten Verhältnisse im Labor nachzustellen. Ohne Verdichtung wurde das Material in das große Rahmenschergerät eingebaut (vergleiche Bild 4 und Bild 5).



- | | | | |
|----|-----------------------------------|----|--|
| 1: | unterer, unverschieblicher Rahmen | 4: | Antriebseinheit |
| 2: | oberer, verschieblicher Rahmen | 5: | Steuerungs- und Datenerfassungseinheit |
| 3: | Stahlplattengewichte (Auflast) | | |

Bild 4: Ansicht der Versuchsanlage für großmaßstäbliche Rahmenscherversuche

Insgesamt sind drei betreffende Probenkörper untersucht worden (vergleiche Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Versuchsbedingungen der großmaßstäblichen Rahmenscherversuche

Versuchskörper	Versuchstyp	Wassergehalt w [%]	Auflast σ [kN/m ²]
1	Mehrstufenversuch	19	6,9
		19	17,5
2	Einzelversuch	~ 25*	17,5
3	Einzelversuch	~ 25*	37,0
*durch Bewässerung			



Bild 5: Blick in die Scherbox des Rahmenschergerätes mit dem zusätzlich eingelegten Gitterrahmen zur flächigen Schubkrafteinleitung in die obere Probenhälfte (Probe noch nicht fertig eingebaut)

Zum besseren Verständnis des Scherverhaltens sind in Abbildung 4-5 die gemessenen Arbeitslinien sowie die während der Belastung und während des Abscherens aufgetretenen Setzungen aufgetragen.

Erwartungsgemäß wird der Scherwiderstand des mit Makroporen durchsetzten Materials erst über größere Scherwege geweckt. So ist insbesondere die erste Stufe des Zweistufenversuchs an nicht bewässertem Material (Versuchskörper 1, vergleiche Tabelle 4-1) bei weitem nicht zum Grenzzustand gefahren worden. Das aus dem natürlichen Feuchtezustand auf $w \approx 19\%$ abgetrocknete und so eingebaute Material zeigte unter Auflegen der Auflast die im unteren Diagramm (in Abbildung 4-5) aufgetragenen Setzungen, die sich beim Abscheren nur geringfügig vergrößerten.

Die gewässerten Versuchskörper 2 und 3 zeigten erwartungsgemäß bei Lastaufbringung beträchtlich größere Setzungen. Der verfügbare Scherwiderstand war beim Abscheren auch nach jeweils 160 mm Scherweg noch nicht ausgeschöpft.

Die jeweils zu Versuchsende erzielten Scherwiderstände sind gleichwohl im τ - σ -Diagramm der Abbildung 4-6 aufgetragen und den Linien der klassischen Rahmenscherversuche aus Abbildung 4-4 gegenübergestellt.

Die Werte aus dem Zweistufenversuch an Versuchskörper 1 zu einer Scherkennlinie zu verbinden wäre angesichts der Arbeitslinien (Abbildung 4-5) wenig angebracht. Für die Ergebnisse der Einzelversuche (Versuchskörper 2 und 3), die beide bis $s = 160$ mm gefahren wurden, mag es dagegen Sinn machen.

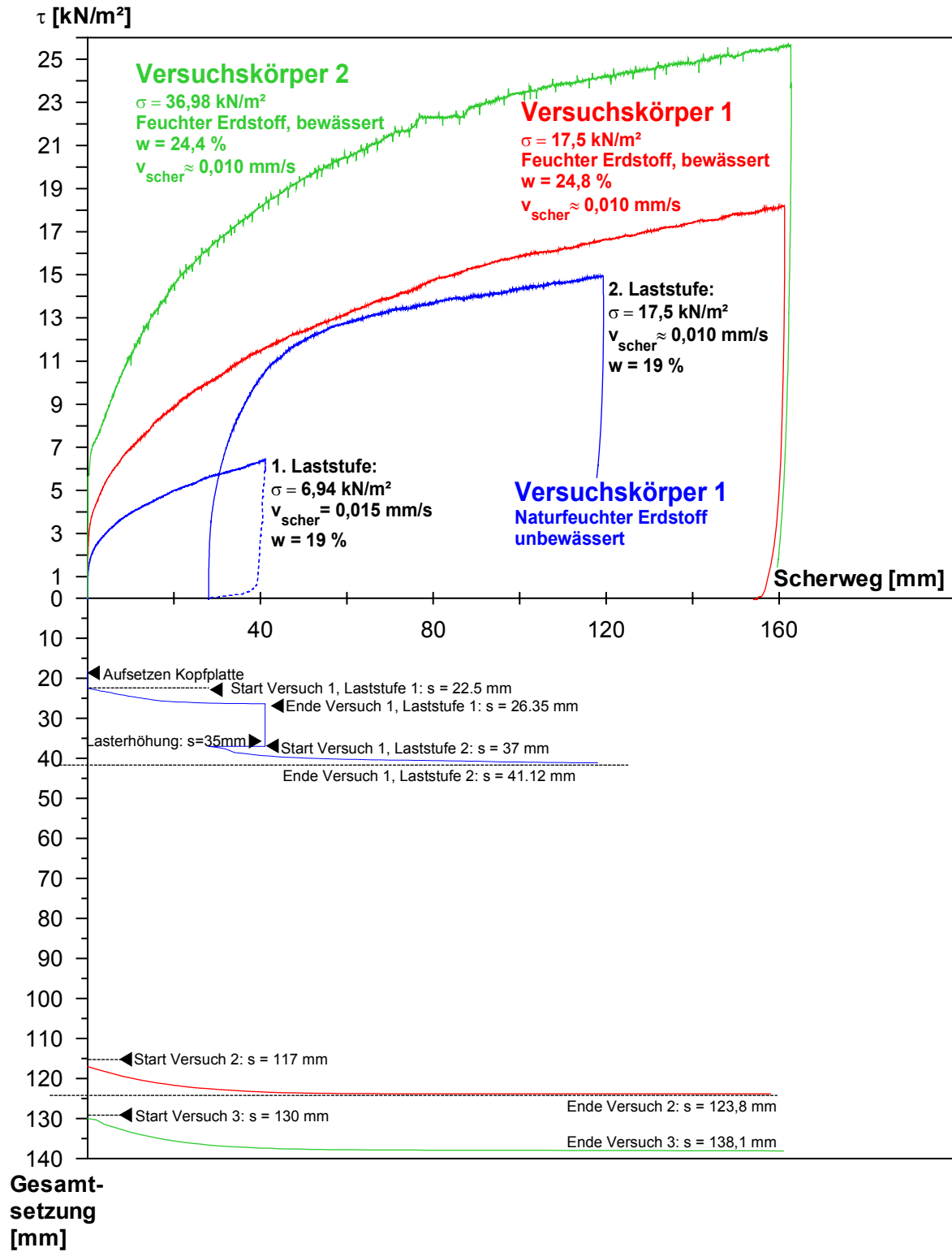


Abbildung 4-5: Arbeitslinien und Setzungsverhalten beim Abscheren im großen Schergerät

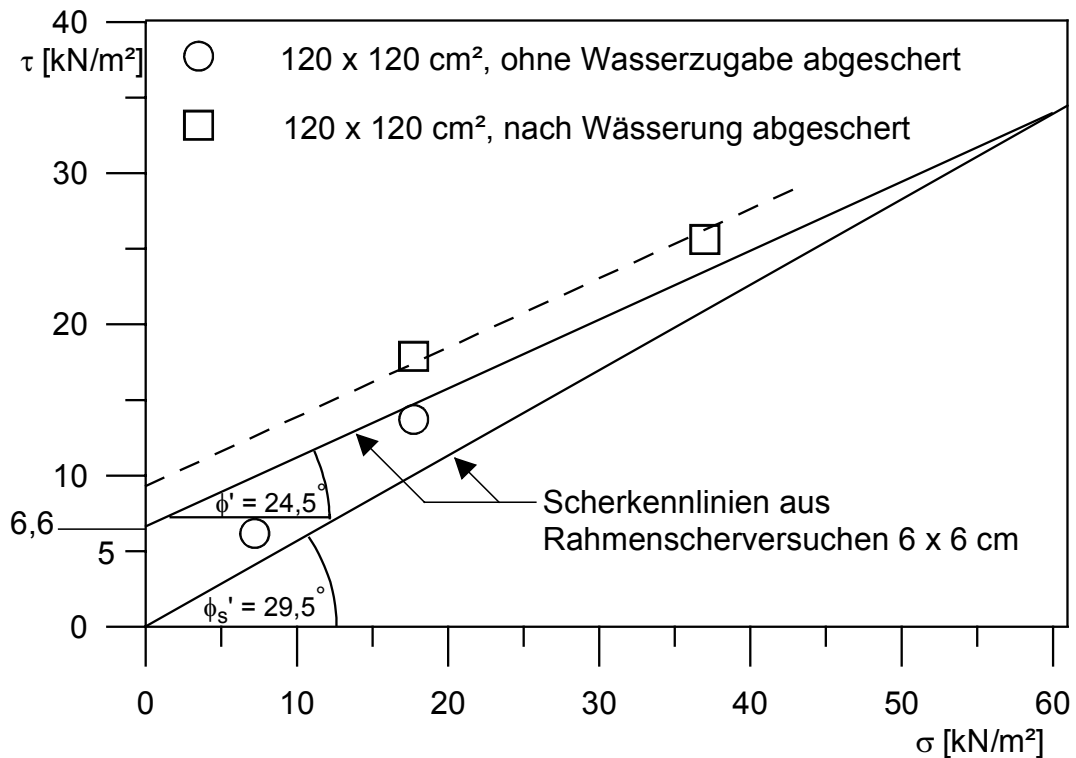


Abbildung 4-6: Ergebnisse der Großscherversuche im Vergleich mit den Resultaten aus klassischen Rahmenschersversuchen nach Abbildung 4-5

Im Endergebnis ist insgesamt bedeutsam, dass die gemessenen Scherwiderstände – obwohl noch nicht bis zum Größtwert ausgeschöpft – sämtlich oberhalb der durch ϕ'_s gekennzeichneten Linie liegen. Offensichtlich liefert die Festigkeit der Aggregate selbst im bewässerten Zustand einen ausreichenden Beitrag, dass das mit Makroporen noch durchsetzte, insgesamt naturgemäß nur teilgesättigte Substratgefüge „en gros“ einen höheren Scherwiderstand als der Boden im (wassergesättigt) normal-konsolidierten Zustand zu entwickeln vermag.

Vor diesem Hintergrund ist der Schluss erlaubt, dass man auf der Basis von klassischen Rahmenschersversuchen an gestört eingebautem Material bei der Wahl von Böschungsneigungen anhand ϕ'_s auch für locker geschüttete Substrate nicht auf der unsicheren Seite liegt. Dies gilt jedenfalls für das im vorliegenden Beispiel untersuchte Material.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen konnten die erdstatischen Nachweise für die Testfelder auf der Deponie Leonberg für alle zu betrachtenden Scherfugen und Lastfälle erbracht werden.

Angesichts dieser im Labor erhaltenen Ergebnisse stellt sich aus der Sicht der Übertragung in die Natur die Frage, wie sich die Feuchtebedingungen, die Dichteentwicklung sowie die Scherfestigkeitsentwicklung dort darstellen.

4.1.3 Versuchseinrichtungen für Felduntersuchungen

Testfeld U mit unverdichteter Rekultivierungsschicht auf der Deponie Leonberg wurde deshalb mit Messeinrichtungen bestückt, die die Gewinnung betreffender Daten ermöglichen sollen. Erste Messergebnisse, die hiermit gewonnen wurden, liegen inzwischen vor.

4.1.3.1 Feuchtemesskabel

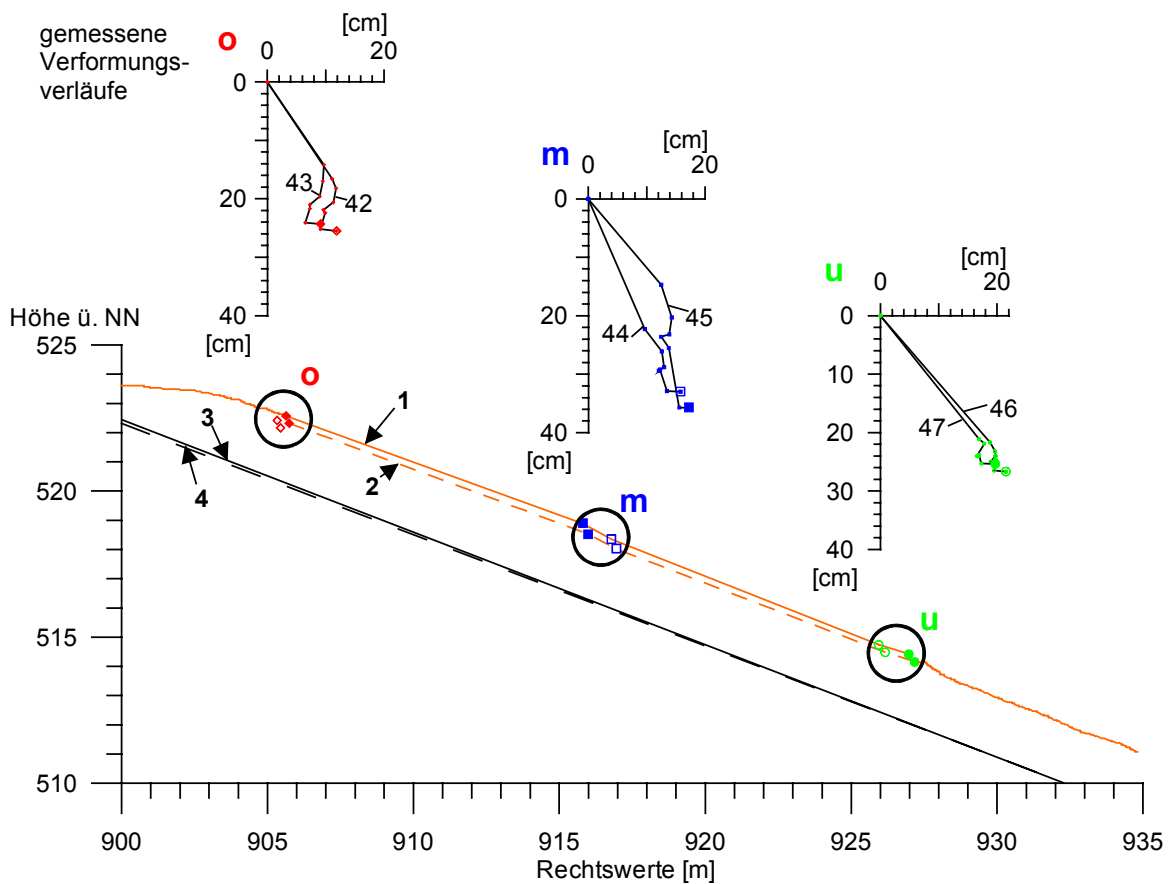
Über eine Anzahl von üblichen TDR-Feuchte-Messsonden hinaus, die von den Kollegen aus Freiburg in der Testfeldanlage platziert worden sind, wurden an zwei im Übersichtsplan (vergleiche Abbildung 2-3) ausgewiesenen Stellen neuartige Feuchtemesskabel installiert (SCHLAEGER 2002, SCHEUERMANN et al. 2001). Hier handelt es sich um eine am Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe entwickelte TDR-Messtechnik, die eine Feuchtebestimmung als Profil entlang eines mehrere Meter langen Messkabels erlaubt (SCHLAEGER et al. 2001). Einen Eindruck vom Einbau eines solchen Kabels in den unteren Bereich der Rekultivierungsschicht gibt Bild 6.



Bild 6: Feuchtemesskabel beim Einbau in der Rekultivierungsschicht

Inzwischen wurden einige Messungen mit dieser Versuchseinrichtung in Leonberg durchgeführt. Die Auswertung bzw. Rekonstruktion der bisherigen Ergebnisse wirft noch einige Fragen unter den hier gegebenen Randbedingungen auf. Zur Zeit wird eine modifizierte Auswertungsroutine entwickelt, die den hier besonderen Randbedingungen (große Länge der Feuchtebandkabel in elektrisch vergleichsweise leitfähigem Rekultivierungssubstrat) Rechnung trägt.

4.1.3.2 Sackungs- und Verschiebungsverhalten



Legende:

- 1 Oberfläche des Testfeldes am 12.01.2001
- 2 Oberfläche des Testfeldes am 26.04.2002
- 3 Ursprüngliche Sohle des Testfeldes (schematisiert)
- 4 Derzeitige Sohle des Testfeldes (abgeschätzt aus Setzungsbeobachtungen am Südhang der Deponie)

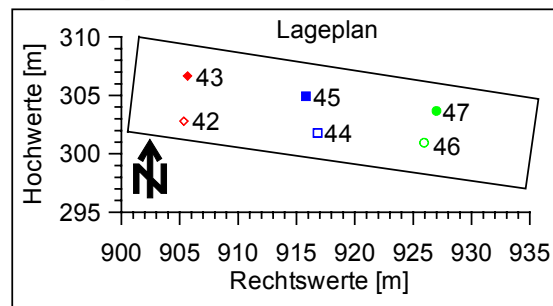


Abbildung 4-7: Ergebnisse zum Sackungs- und Verschiebungsverhalten aus den Beobachtungen der Vermarkungen

Zur Beurteilung des Setzungs- und Verformungsverhaltens des locker geschütteten Rekultivierungssubstrats wurden insgesamt sechs Vermarkungen - je zwei in drei Höhenlagen - auf dem Testfeld eingerichtet (vergleiche Abbildung 2-3 und Lageplan in Abbildung 4-7). Die Darstellung der gemessenen Verformungsverläufe erfolgt jeweils als Mittelwert der jeweiligen Höhenlage.

Die Vermarkungen wurden seit Februar 2001 bislang insgesamt acht mal in zwei-monatigem Turnus geodätisch eingemessen. In Abbildung 4-7 ist im mittleren Bereich ein Schnitt durch das Testfeld mit der Lage der Vermarkungen und die Oberfläche des Testfeldes zu Beginn der Messungen sowie zum Zeitpunkt der letzten berücksichtigten Messung (April 2002) eingetragen. Die Verformungen, die sich im Zeitraum zwischen der Fertigstellung des Testfeldes (Dezember 2000) und der Einrichtung der Vermarkungen (erste Messung) bereits eingestellt hatten, können lediglich grob abgeschätzt werden und wären noch hinzuzurechnen.

In Abbildung 4-7 oben sind die gemessenen Verformungsverläufe im Detail dargestellt. Da die Falllinie der Böschung im Grundriß nur wenig (ca. 8°) von der West-Richtung abweicht, entsprechen die Rechtswerte im vorliegenden Fall weitgehend der horizontalen Komponente der hangabwärts gerichteten Verschiebungen.

Wie hieraus ersichtlich ist, fand ein Großteil der Verformungen bereits innerhalb des ersten Messintervalls statt. Die Horizontalverschiebungen sind tendenziell im unteren Böschungsbereich am größten. Nach dem ersten Messintervall traten keine wesentlichen Horizontalverformungen mehr ein. Erst im letzten Messintervall zeigen sich durchweg erneut nennenswerte Horizontalverformungen. Für den zeitweise beobachteten, geringfügigen Rückgang der Horizontalverformungen - insbesondere bei den beiden oberen Vermarkungen (Nr. 42 und 43) - gibt es bislang keine schlüssige Erklärung. Zum einen mögen hier Messtoleranzen eine gewisse Rolle spielen, zum andern könnte die Ursache im Verformungsverhalten des Deponiekörpers selbst liegen. Insgesamt weisen die beiden oberen (Nr. 42 und 43) und die beiden unteren Vermarkungen (Nr. 46 und 47) jeweils einen recht ähnlichen Verlauf auf. Bei den beiden mittleren Vermarkungen zeigt die südlich Gelegene (Nr. 44) zunächst (im ersten Messintervall) eine deutlich größere Verformung, dann aber im vorletzten Messintervall eine deutlich geringere Verformung als die nördlich gelegene Vermarkung (Nr. 45). In der Summe sind die bisher gemessenen Verformungswerte dann jedoch in etwa gleich. Hier sind auch die größten Vertikalverformungen zu eingetreten.

Die gemessenen hangparallelen Verformungen (Hochwerte) sind erwartungsgemäß gering und betragen maximal ca. 4 cm; auf eine Auftragung wurde verzichtet.

Um nun von den gemessenen Gesamt-Verformungen der Testfeldoberfläche auf die Verformungen bzw. Setzungen der Rekuschiicht schließen zu können, sind die Verformungen des Deponiekörpers mit einzubeziehen. Die geodätischen Messungen im

Rahmen der Bauwerksüberwachung zeigen im gleichen Zeitraum für den oben an das Testfeld angrenzenden Kuppenbereich der Deponie Vertikalverformungen zwischen 10 cm und 18 cm. Für den oberen Bereich des Testfeldes kann daher anhand der Daten von einer Vertikalverformung von etwa 10 cm bis 15 cm ausgegangen werden.

Weiterhin ist aus den Vermessungen des Deponiekörpers bekannt, dass die Vertikalverformungen entlang der Böschung von unten nach oben in etwa linear anwachsen. Die Verformungen am Böschungsfuß sind nahezu Null, da sich die Böschung hier mit dem ursprünglichen Gelände verschneidet.

Dieser Sachverhalt ist durch die mit den Ziffern 3 und 4 gekennzeichneten Linien des Diagramms im mittleren Teil von Abbildung 4-7 dargestellt. Weiterhin wird hier angenommen, dass die Verformungen des Deponiekörpers - die sich bekanntermaßen über sehr lange Zeiträume erstrecken - während des hier betrachteten Zeitraums kontinuierlich eintraten. Unter Berücksichtigung der genannten Sachverhalte wurden die betreffenden vertikalen Verformungsanteile, die aus den Verformungen des Deponiekörpers stammen, ermittelt und von den gemessenen Verformungen der Testfeldoberfläche abgezogen. Diese korrigierten Daten sind in den Diagrammen von Abbildung 4-8 aufgetragen. Der Vertikalanteil, der sich aus den Horizontalverschiebungen eines Punktes an der Böschungsoberfläche ergibt, und nicht der Setzung der Schicht zuzuschreiben ist, wird in den Diagrammen durch die - entsprechend der Böschung - geneigten Linien berücksichtigt.

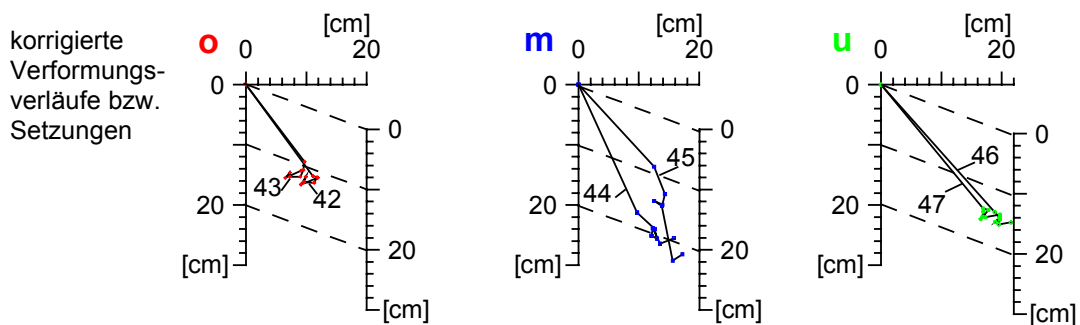


Abbildung 4-8: Verformungsmessungen – um die Setzungsanteile des Deponiekörpers korrigierte Ergebnisse der Vermarkungen

Die ermittelten Setzungen der Rekuschiicht betragen somit zwischen ca. 12 cm (oben) und ca. 20 cm (Mitte). Die geringeren Setzungen im oberen Bereich resultieren aus der verfahrens- bzw. herstellungsbedingten größeren Einbaudichte. Die dargestellten Verläufe zeigen noch deutlicher, dass die Verformungen im wesentlichen innerhalb des ersten Messintervalls eingetreten sind. Eine Ausnahme bilden hier allerdings die beiden mittleren Vermarkungen.

Unter der Annahme, dass im Zeitraum zwischen der Fertigstellung der Testfelder und der ersten Messung bereits 50 % der Verformungen eingetreten sind, ergeben sich nach 18-

monatiger Liegezeit für die Rekultivierungsschicht Setzungen in der Größenordnung von 10 % bis 15 % der Einbauhöhe. Für die Baupraxis ergibt sich hieraus - unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den großmaßstäblichen Laboruntersuchungen -, dass locker geschüttete Rekultivierungsschichten mit einer angestrebten Endmächtigkeit von 2 m mit einem Überprofil im Dezimeterbereich herzustellen sind.

4.1.3.3 Karlsruher Schertester

Zur Überprüfung der tatsächlichen Scherparameter in situ sind an verschiedenen Stellen und in unterschiedlicher Tiefenlage sogenannte „Karlsruher Schertester“ eingebaut worden, die am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik entwickelt und gebaut wurden (siehe Abbildung 2-3). Dabei handelt es sich um Stangen mit einer Anzahl von Scheiben, die mit einem Drahtseil durch den Boden gezogen werden (Bild 7) und dabei eine zylindrische Scherfuge erzeugen.



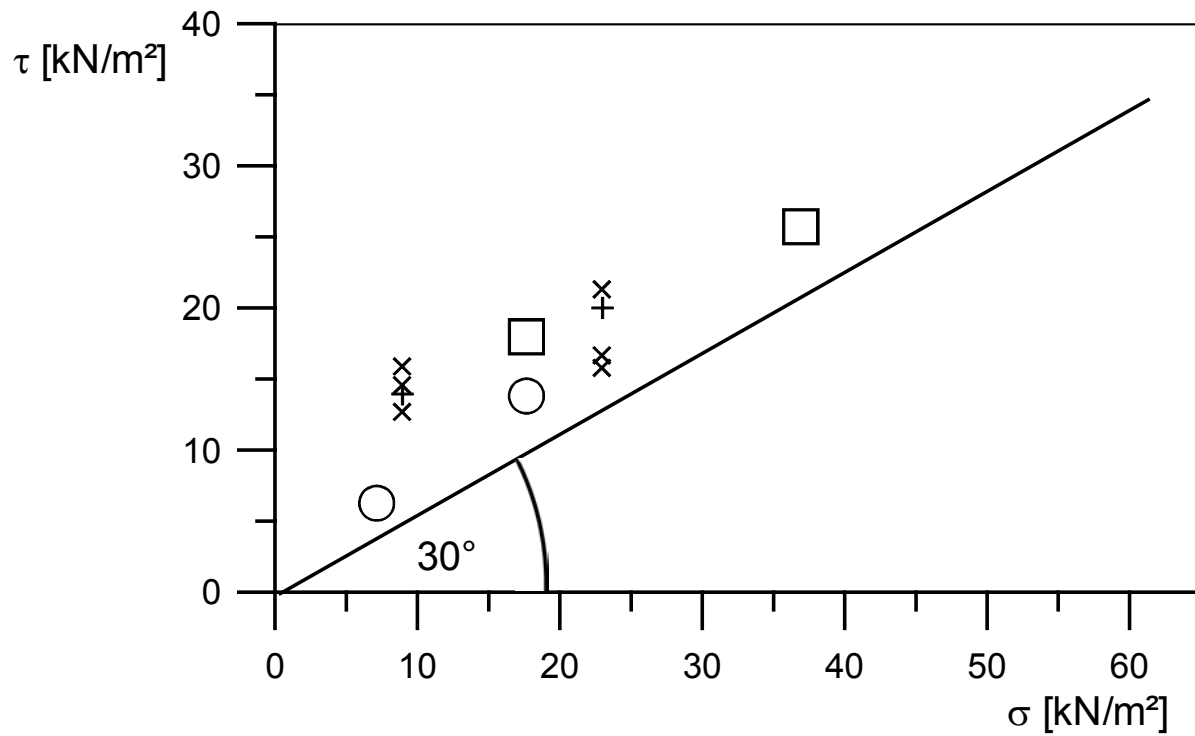
Bild 7: Karlsruher Schertester während des Einbaus in der Rekultivierungsschicht

Das Widerlager für das Durchziehen und Abscheren entlang einer \pm zylindrischen Scherfläche bildet ein verloren eingebetteter Stahlkasten, in dem die Zugseile um 90° in die Vertikale umgelenkt und durch Schutzrohre zur Geländeoberfläche geführt werden (Bild 7). Zum Messzeitpunkt, der nach Belieben in Abhängigkeit des Alters der Schüttung und auch der Feuchteverhältnisse gewählt werden kann, wird der in situ-Scherversuch unter Zuhilfenahme von Einrichtungen, wie sie auch für Ankerprüfungen verwendet werden, durchgeführt (Bild 8).



Bild 8: Durchführung eines in-situ-Scherversuches mit einem Karlsruher Schertester

Bislang wurden an zwei Terminen Versuche dieser Art durchgeführt. Die ermittelten Scherspannungen sind in Abhängigkeit vom Überlagerungsdruck in Abbildung 4-9 dargestellt. Wie ersichtlich, gibt es eine gewisse Streuung der Messwerte, wie dies unter den gegebenen Bedingungen auch zu erwarten ist. Gleichwohl fügen sich die Ergebnisse sinnvoll in das Scherverhalten gemäß den Scherversuchen im Labor, d.h. das Scherverhalten in situ bestätigt bislang die aus den Laborversuchen abgeleiteten Erkenntnisse; zukünftig sind weitere Messungen möglich und vorgesehen.



Legende

- + Werte durch in situ-Schertester ermittelt am 08.11.2001
 - x Werte durch in situ-Schertester ermittelt am 14.01.2002
 - \circ Scherfläche $120 \times 120 \text{ cm}^2$, ohne Wasserzugabe abgeschert ($\rho_d \sim 1,1 \text{ g/cm}^3$)
 - \square Scherfläche $120 \times 120 \text{ cm}^2$, nach Wässerung abgeschert ($\rho_d \sim 1,2 \text{ g/cm}^3$)
- > Laborversuche

Abbildung 4-9: Vergleichende Darstellung der Versuchsergebnisse aus Großscherversuchen im Labor und Ergebnissen aus Versuchen mit Karlsruher Schertestern im Testfeld Leonberg

Resümee (4.1):

Aus bodenmechanischer bzw. erdstatischer Sicht lassen sich aus den vorgestellten Untersuchungen für die Ausbildung locker geschütteter Rekultivierungsschichten folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Für locker geschüttete bindige Substrate können die maßgebenden Scherparameter durch klassische Scherversuche im Labor ermittelt werden; einen guten Orientierungswert gibt der Winkel der Gesamtscherfestigkeit ϕ'_s .
- Die Überprüfung der Scherparameter des einzubauenden Bodens ist im Einzelfall unerlässlich.
- Aus dem im Labor ermittelten Setzungsverhalten ergibt sich für Rekultivierungsschichten mit einer angestrebten Endmächtigkeit von zwei Metern ein Überprofil im Dezimeterbereich; dieses ist bei der erforderlichen Schütthöhe zu berücksichtigen.
- Der Tongehalt des Rekultivierungssubstrates sollte 25 Gew.-% nicht übersteigen.

Die für den Bau der Testfelder getroffenen Annahmen werden durch messtechnische Begleitmaßnahmen in situ überprüft. Die bislang vorliegenden Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Die mittels Karlsruher Schertestern ermittelten Scherparameter liegen in der erwarteten Größenordnung; sie bestätigen die Ergebnisse der Laboruntersuchungen.
- Die Setzungen der Rekultivierungsschicht sind nach etwa 18 Monaten noch nicht abgeklungen; die bislang erhaltenen Werte bestätigen die Erwartungen.
- Die Technik zur Messung der Feuchteverteilung ist installiert; um Aussagen zum Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht treffen zu können, sind längere Messreihen erforderlich.

Aufgrund der langfristigen Ausrichtung des Gesamtvorhabens sowie der zur Zeit im Testfeld noch beobachteten Veränderungen im Rekultivierungssubstrat, ist es unumgänglich, die im Testfeld installierten Messeinrichtungen in regelmäßigen zeitlichen Abständen zu aktivieren.

4.2 Bautechnik und Bauausführung

(O. EHRMANN, E. HAUBRICH, M. KOSER, P. WATTENDORF)

4.2.1 Bodenauswahl

Die physikalischen Eigenschaften eines Boden oder einer Rekultivierungsschicht werden wesentlich von der Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Bestandteile³ geprägt (siehe 3.2). Der Bodenauswahl kommt daher eine große Bedeutung für den Erfolg von Rekultivierungsmaßnahmen zu (z.B. BRAUNS et al. 1997, DGGT 2000). Das Spektrum geeigneter Bodenarten bzw. Bodengruppen nach DIN 18 915 ist in BÖNECKE (1997) oder BRAUNS et al. (1997) aufgeführt.

Gleichzeitig stellt die Beschaffung geeigneter Bodenarten die mit der praktischen Ausführung Betrauten vor eine Fülle von Problemen. So wurde in der Planungsphase der Versuchsfelder auf der Deponie Leonberg anfänglich die Verwendung von Böden der Bodengruppen 4 bis 7 (schwach bindiger Boden, bindiger Boden) gemäß DIN 18 915 angestrebt. Da in der Region jedoch fast ausschließlich stark bindiger Boden ansteht, wurden auch Böden der Gruppe 8 zugelassen. Für eine Aufnahme der ebenfalls bedingt geeigneten nichtbindigen Böden (Sande, Bodenartengruppe 2) bestand keine Veranlassung, da diese in der Region fast nicht vorkommen. Für alle Bodenarten wurde der Tonanteil auf ≤ 25 Gew.-%, der Steingehalt (≥ 63 mm \emptyset) auf ≤ 20 Gew.-% und das Größtkorn auf ≤ 100 mm begrenzt. Tongehalte über 25 Gew.-% sind wegen ungünstiger Standsicherheitseigenschaften der Böden nicht akzeptabel (siehe 4.1) und auch aus vegetationskundlicher Sicht nicht erwünscht. Zusätzlich zu dieser allgemeinen Vorgabe sollte für den Bau der Testfelder die Entnahme des Bodens aus Herkunftsstellen erfolgen, die die Lieferung einer möglichst großen, einheitlichen Menge erlauben, um die Vergleichbarkeit der beiden Lysimeterfelder zu gewährleisten. Vor der Anlieferung war eine kurzfristige Begutachtung der vorgesehenen Böden durch ein Mitglied der Arbeitsgruppe an der Entnahmestelle und die Freigabe zur Anlieferung vorgesehen.

Diese speziellen Qualitätsanforderungen ergaben bei der Ausschreibung erheblich höhere Preise für die Lieferung der Substrate als bei bisher mit geringeren Anforderungen an die Böden durchgeführten Rekultivierungsmaßnahmen. Aufgrund der hohen Preise wurde auf eine Bodenbeschaffung nach den oben genannten Kriterien verzichtet. Statt dessen wurde auf eine praxisnähere Alternative zurückgegriffen, die wesentlich geringere Anforderungen an die zu liefernden Böden stellte. Es wurde lediglich „unbelasteter, gemischt-körniger, standsicher verdichtbarer Boden mit einem Steingehalt ≤ 20 Gew.-%“ gefordert.

³ In der Bodenkunde wird diese als Bodenart bezeichnet (AG BODEN 1994), im Bauwesen wird von Bodengruppen gesprochen.

Zufällig ergab sich zum Zeitpunkt der Nachfrage die Verfügbarkeit von Lösslehm aus einer einzigen Baugrube, so dass die Rekultivierungsschicht der Testfelder aus homogenem Material in der ursprünglich angestrebten Qualität gebaut werden konnte.

Im speziellen Fall ergab sich eine Preisdifferenz in Höhe von ca. 6,50 €/m³ gegenüber einer Abnahme von Boden ohne Qualitätsanforderungen. Die Kosten für die Rekultivierungssubstrate können jedoch nicht verallgemeinert werden, da diese stark von der regionalen Verfügbarkeit, der aktuellen Bautätigkeit und der Konkurrenzsituation mit anderen Baumaßnahmen abhängig sind. Bei einer großtechnischen Maßnahme mit einem Bedarf von bis zu mehreren Hunderttausend m³ sind aufgrund einer Materialverknappung noch höhere Preise zu erwarten. Es wird deutlich, dass aufgrund höherer Qualitätsanforderungen an die Böden bei den benötigten Massen erhebliche Mehrkosten (im Bereich von 130.000 €/ha bei 2 m Schichtstärke) entstehen können.

Weiterhin zeigt die Praxis, dass nur in Ausnahmefällen die Entnahme der Substrate aus Herkunftsstellen mit einer großen einheitlichen Menge möglich ist. Im Regelfall wird das Bodenmaterial aus zahlreichen unterschiedlichen Herkunftsstellen stammen. Ebenso wird die Begutachtung der Materialien am Herkunftsort meist nicht möglich sein, da das Material praktisch immer ohne Zeitverzug abgefahren werden muss. Eine Behinderung der Baumaßnahme oder eine Zwischenlagerung des Materials am Aushubort ist für den Lieferanten der Böden nicht akzeptabel, da dies einen eventuellen Preisvorteil für ihn zunichte machen würde. Dadurch wird das Material im Regelfall vor Abschluss der Voruntersuchung auf anderem Weg entsorgt. Eine Möglichkeit zur Voruntersuchung auf Eignung ist jedoch dann gegeben, wenn sowohl der Beginn einer größeren Baumaßnahme als auch die Lage der Baustelle längere Zeit im Voraus bekannt sind, so dass vor Beginn der Aushubarbeiten eine Prüfung erfolgen kann.

Eine Zwischenlagerung der Substrate am Ort der zu erfolgenden Rekultivierungsmaßnahme ist prinzipiell möglich, sofern die erforderlichen Flächen zur Verfügung stehen. Der Kostenaufwand für eine Zwischenlagerung ist jedoch nicht unerheblich, da sie einerseits einen zusätzlichen Lade- und Transportvorgang verursacht, andererseits eine gezielte Bewirtschaftung des Lagers mit Maßnahmen zum Schutz der Böden gegen Vernässung bedingt. Zwischenlagerung sollte auch deshalb vermieden werden, weil sie meist mit zusätzlichen Verdichtungen und Strukturzerstörungen sowie einer starken Beeinträchtigung des Bodenlebens verbunden ist (siehe BRAUNS et al. 1997). Trotzdem kann sie im Einzelfall erwogen werden, wenn beispielsweise sehr gut geeignete Substrate in großer Menge zu günstigen Konditionen verfügbar sind.

Resümee (4.2.1):

Die Erfahrungen beim Bau der Testfelder zeigen, dass bei Rekultivierungsvorhaben objektspezifische Gegebenheiten die jeweilige Planung und Bauausführung erheblich beeinflussen. Hiervon ist insbesondere die Beschaffung geeigneter Rekultivierungs-substrate betroffen.

Hieraus ergibt sich die Aufgabe, bereits lange vor Ausführung größerer Rekultivierungsvorhaben Kriterien für fallweise Lösungsansätze zu entwickeln, beispielsweise zur

- Ermittlung der Verfügbarkeit geeigneter Substrate (abhängig von der Lage der Deponie),
- Ermittlung benötigter Substratmengen in Abhängigkeit von Baufortschritt und -umfang und der
- Optimierung von Betriebsabläufen (z.B. Möglichkeit der Zwischenlagerung von Substraten)

Aufgrund der Tatsache, dass die Herkunft des Bodenmaterials nur in Ausnahmefällen langfristig im Voraus feststehen wird, sind aufwändige Voruntersuchungen, z.B. Scherversuche, in der Rekultivierungspraxis meist nicht möglich. Im Bauablauf wird daher eine kurzfristige Prüfung der angedienten Böden und eine schnelle Freigabe zur Anlieferung gefordert sein. Hieraus ergeben sich Konsequenzen, wenn Rekultivierungsschichten mit definierten Bodeneigenschaften erstellt werden sollen. So sollten beispielsweise Versuche zur Ermittlung der Schereigenschaften für typische und in Baden-Württemberg verbreitete Substrate („Referenzböden“) im Voraus durchgeführt werden, um den Untersuchungsaufwand bei der Bauausführung zu minimieren.

4.2.2 Bodeneinbau, Oberbodenlockerung und Erosionsschutz

4.2.2.1 Bodeneinbau

Einbauverfahren

Das konventionelle Verfahren zur Herstellung von Rekultivierungsschichten ist das lagenweise Einschieben des Bodens von der Böschungsoberkante aus mit nachfolgender Verdichtung der Oberfläche einer jeden Lage (siehe Abbildung 4-12). Während dieses Verfahren wegen seiner Verbreitung in der Baupraxis auch für den Bau des K-Feldes die gewählt worden war, wurden in der Planungsphase der Versuchsfelder für die Variante *unverdichteter Einbau* (Feld U) mehrere Verfahren diskutiert (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Verfahren für den unverdichteten Einbau von Rekultivierungsschichten

	Aufwand	Verdichtung
Transportband / Absetzer	hoch	praktisch keine
Teleskopbagger	hoch	praktisch keine
Einschieben mit leichter Raupe	geringer	im Oberboden

Der Einbau mit einem Absetzer ist bei geeigneter Bodenfeuchte vermutlich das schonendste Verfahren der Bodenumlagerung und wird zum Beispiel im Rheinischen Braunkohletagebau mit Erfolg bei der Rekultivierung praktiziert (z.B. WOLF 2000). Dieses Verfahren scheidet im Deponiebau zur Zeit jedoch aus, da die hierfür notwendigen Spezialgeräte bei den meisten Bauvorhaben nicht verfügbar sind. Es wurde deshalb auch für den Bau der Testfelder nicht weiter berücksichtigt.

Statt dessen kam die Arbeitsgruppe überein, den unverdichteten Aufbau der Rekultivierungsschicht in den Feldern U, D und B ohne Befahren durch seitliches Einbringen mit einem Teleskopbagger herzustellen. Es wurde eine Trockenraumdichte (Rohdichte) von $1,3 \text{ g/cm}^3$ angestrebt (vergleiche BRAUNS et al. 1997), substratbedingt höhere Dichten waren zulässig. Bei der Ausschreibung dieser Einbauweise ergaben sich aufgrund der zusätzlich erforderlichen Zulieferung der Substrate zum Teleskopbagger in der Praxis nicht akzeptable Preise (im speziellen Fall $12,50 \text{ €/m}^3$).

Die Fragestellung des Vorhabens zielt darauf ab, nur praxisbezogene und umsetzungsorientierte Alternativen zu berücksichtigen. Deshalb wurde nach eingehender Beratung

und Abstimmung mit der ausführenden Baufirma der Einsatz eines Teleskopbaggers verworfen und für den unverdichteten Einbau folgendes Verfahren gewählt:

- Um dem großtechnischen Einsatz möglichst nahe zu kommen und Verdichtungen trotzdem auf ein unvermeidbares Maß zu reduzieren, wurde der Boden in einer Schicht „Vorkopf“ vom oberen Testfeldrand ausgehend mit einer leichten Raupe (D4) mit Moorkette eingeschoben (siehe Abbildung 4-12).
Die ausführende Baufirma versicherte, dass das Einschieben mit der leichten Raupe mit breiten Ketten zu keiner nennenswerten Verdichtung des Bodens führen würde.
- Die Rekultivierungsschicht sollte mit einer Überhöhung von mindestens 20 cm eingebaut werden, damit nach Abklingen von Setzungsvorgängen die gewünschte Schichtstärke erreicht wird (siehe 4.1).
- Der Einbaupreis für dieses Verfahren belief sich im speziellen Fall auf ca. 5,00 €/m³.
- Im Kontrollfeld K mit konventionell verdichtet eingebautem Substrat 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 ohne zusätzliche Verdichtung eingebaut.

Während des Einbaus in die Testfelder wurden wichtige Eigenschaften der angelieferten Substrate laufend überprüft. Die Böden waren in trocken-frischem bzw. überwiegend in frisch-feuchtem Zustand und entsprachen somit den Anforderungen an Umlagerungs- bzw. Befahrungseigenschaften von Böden (z.B. LAK 2000). Die Trockenraumdichte der angelieferten Böden im Entnahmezustand lag zwischen 1,44 und 1,77 g/cm³, im Mittel bei 1,57 g/cm³.

Das für alle Beteiligten ungewohnte Verfahren *unverdichteter Einbau* konnte gut bewältigt werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei Herstellung der Testfelder Zufahrt und Materialtransport unter optimalen räumlichen Verhältnissen erfolgten. Die Böschungslängen betragen nur ca. 40 m. Bei zukünftigen Großprojekten wird dies nicht grundsätzlich zu erreichen sein, vielmehr sind Böschungslängen von 60 – 100 m keine Seltenheit. Gegebenenfalls können dann für den Bodeneinbau Erschließungsbermen erforderlich werden, die u.U. Zusatzkosten verursachen. Weiterhin ist bei unverdichtetem Einbau von Rekultivierungsschichten zu beachten, dass durch Setzungen und Verschiebungen des locker eingebrachten Materials möglicherweise ein unzulässiger Erddruck auf Bauwerke und Installationen bewirkt werden kann. Die in der locker geschütteten Rekultivierungsschicht zu verlegenden Gassammelleitungen sind durch zusätzliche Maßnahmen zu schützen. Eine mögliche Lösung kann die Schaffung verdichteter Zonen im Bereich um Bauwerke und Trassen sein.

Oberbodenverdichtung beim Einbau

Nach dem Bodeneinbau zeigte sich, dass beim gewählten Einbauverfahren „Einschieben mit einer leichten Moorraupe“ entgegen den Versicherungen der Bauingenieure der Oberboden deutlich verdichtet wurde. Da die leichte Raupe wegen ihres geringen Eigengewichtes nur einen kleinen Teil des aufzutragenden Bodens auf einmal vor sich herschieben konnte, waren zahlreiche Überfahrungen der Bodenoberfläche notwendig. Aufgrabungen und Messungen nach dem Einbau des Bodens zeigten Verdichtungen mit folgendem Muster:

- Die Ausdehnung der Verdichtungen reichte von der Oberfläche bis in ca. 30 - 50 cm Bodentiefe.
- Sie waren im oberen Teil der Testfelder ausgeprägter als im unteren. Weil der Boden mit der Raupe vom oberen Rand her eingeschoben wurde, war die Anzahl der Überfahrten - und damit auch die Verdichtung - dort deutlich höher als am Böschungsfuß. So drang ein mit 100 kg belasteter Spaten am Oberhang nur wenige Zentimeter in den Boden ein, am kaum befahrenen Unterhang war die Eindringtiefe dagegen ca. 10x so groß (Abbildung 4-10). Die Verdichtungen sind eindeutig korreliert mit der Anzahl der Überfahrten (siehe auch Abbildung 4-15).
- Sie waren im U-Feld ausgeprägter als im K-Feld (Abbildung 4-11), denn dort wurde der Boden in vier Lagen eingebaut, im U-Feld aber in einer Lage. Das Befahren verteilte sich daher im K-Feld auf vier Lagen, im U-Feld konzentriert es sich auf den weitgehend in einem Zug eingebrachten Oberboden.

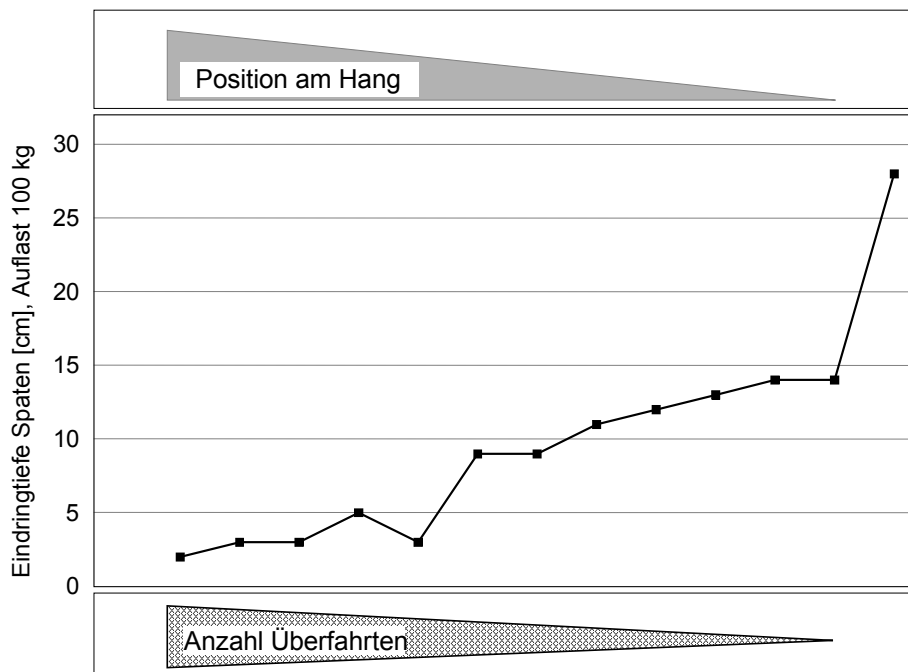


Abbildung 4-10: Verdichtung des Oberbodens in Abhängigkeit von der Zahl der Überfahrten. Die Messungen erfolgten im Böschungsverlauf in Falllinie von oben nach unten mit einem Abstand von jeweils 2 m.

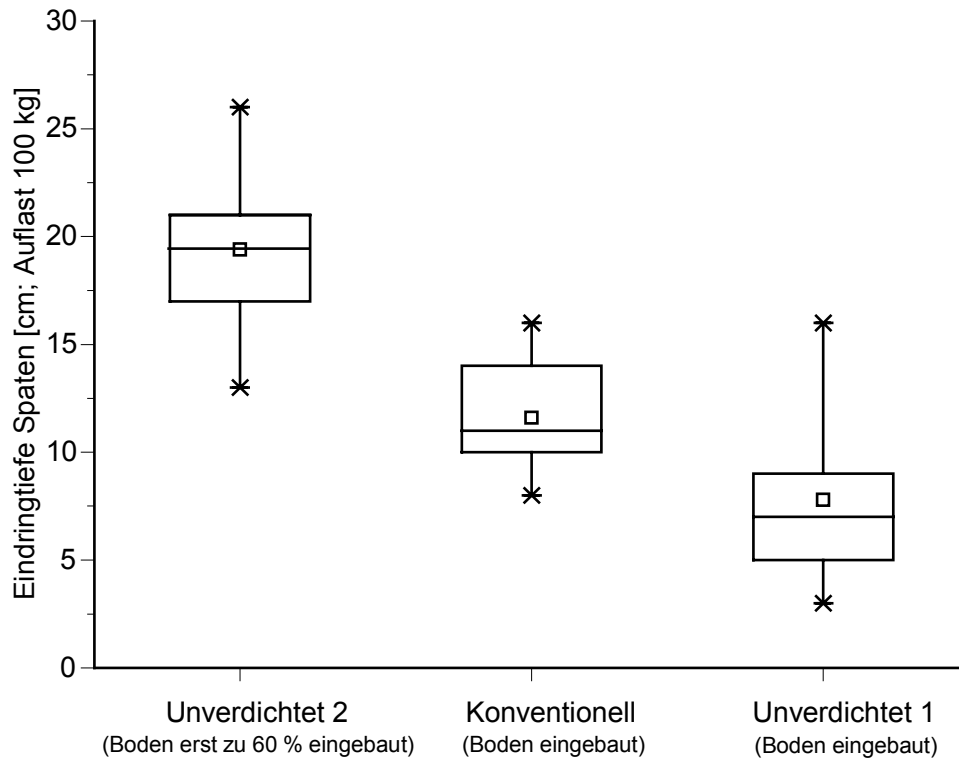


Abbildung 4-11: Verdichtung des Oberbodens bei unterschiedlichem Einbau. Bei Unverdichtet 2 ist die Anzahl der Befahrungen geringer, weil das Feld noch nicht fertiggestellt ist. Die Messungen ($n = 10$) erfolgten jeweils in der Hangmitte und höhenlinienparallel.

Obwohl eine Überfahrt der D4-Raupe aufgrund des niedrigen Eigengewichtes der Maschine und der breiten Ketten nur die obersten 10 - 20 cm des eingebauten Bodens verdichtete, kamen insgesamt 30 - 50 cm tief reichende Verdichtungen zustande. Vermutlich waren mehrere Faktoren an ihrer Entstehung beteiligt:

- Wiederholtes Befahren verstärkt die Verdichtungen. Weiterhin bedingt das Gewicht der Raupe eine Eintiefung des Bodens in der Raupenspur. Bei der nächsten Überfahrt wird in diese Eintiefung unverdichteter Boden eingeschoben und beim Verfahren nachverdichtet. Dieser Prozess wiederholt sich aufgrund der zahlreichen Überfahrten sehr oft⁴.
- Der Raupenfahrer konnte am Hang die Einbauhöhe nicht exakt einhalten. Wird anfangs zu wenig Boden eingeschoben, so entsteht durch die Befahrungen eine Verdichtungszone unterhalb der geplanten Endhöhe. Später wird Material aufgetragen, um die vorgeschriebene Endhöhe zu erreichen, so dass über der ersten eine zweite Verdichtungsschicht entsteht. Um dieses Problem zu vermeiden, empfiehlt es sich, von Anfang an vorsorglich geringfügig über die geplante Endhöhe einzubauen, später kann dann die verdichtete Oberfläche abgeschoben werden.

⁴ Daher wäre zu prüfen, ob nicht der Einsatz einer schweren Raupe mit einer geringeren Zahl von Überfahrten sinnvoller ist (siehe Resümee).

Die durch das Befahren verdichteten Schichten waren überwiegend horizontal orientiert (siehe Abbildung 4-12). Dies ist sehr ungünstig, weil die Verdichtungen in vertikale Richtung verlaufende Prozesse im Boden stark einschränken:

- Die Infiltration und Versickerung von Niederschlägen wird reduziert. So staute sich beispielsweise in einer 40 cm tiefen Testgrube Niederschlagswasser länger als zwei Tage nach einem Regen auf.
- Der Gasaustausch mit der Atmosphäre und damit die Durchlüftung des Bodens werden behindert.
- Das vertikale Wurzelwachstum wird sowohl direkt durch die Verdichtung als auch indirekt infolge Sauerstoffmangels stark behindert. Das Wurzelwachstum wird mithin sowohl mechanisch als auch physiologisch beeinträchtigt.

4.2.2.2 Oberbodenlockerung und Erosionsschutz

Oberbodenlockerung

Es war zu erwarten, dass die oberflächennahen Verdichtungen im Zeitraum mehrerer Jahre auf natürlichem Wege durch Regenwürmer, Wurzelentwicklung und Gefügebildung aufgelöst würden. Um jedoch günstige Bedingungen für die Vegetationsentwicklung auf den Versuchsfeldern zu schaffen und gleichzeitig die am unbewachsenen Hang mit geringer Infiltrationskapazität nicht unerhebliche Erosionsgefahr sofort zu verringern, musste die oberflächliche Bodenverdichtung direkt im Anschluss an den Bodeneinbau mit technischen Mitteln aufgehoben werden.

In Tabelle 4-3 sind einige Methoden der Oberbodenbearbeitung zusammengestellt. Die Verfahren 1 - 3 sind in der Rekultivierungspraxis üblich, 4 und 5 wurden als Alternativen diskutiert:

1. Fräsen hat den Vorteil, dass in einem Arbeitsgang der Boden gelockert und Kompost gleichmäßig eingearbeitet werden kann. Allerdings sollten nur relativ trockene Böden gefräst werden, sonst entsteht unterhalb der Arbeitstiefe eine Frässohle⁵ mit möglicherweise ungünstigerer Wirkung als die Verdichtungen durch das Befahren. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn zu feuchter Boden gefräst wird. Zudem ist die Bodenoberfläche nach dem Fräsen relativ eben und der Boden wird in kleine Aggregate zerschlagen und kann leicht verschlämmen.
2. Das Durchziehen des Bodens mit den Zähnen einer Baggerschaufel kann aufgrund der viel zu geringen Arbeitstiefe von maximal 15 cm tieferreichende Verdichtungen

⁵ Ausbildung einer Schicht an der unteren Bearbeitungsgrenze beim Fräsen. Durch die Auflast und die Drehbewegung der Fräsmesser kann der Boden verdichtet und Poren können verschlossen werden (= „Verschmieren“). Diese Prozesse sind u.a. abhängig von Bodenart und Bodenfeuchte.

nicht beseitigen. Es besteht weiterhin die Gefahr, dass die Bodenoberfläche verschmiert wird, wenn die Schaufel zu tief eingreift und mit ganzer Fläche über den Boden gezogen wird. Quer zur Falllinie mit der Baggerschaufel gezogene Rillen sind als oberflächliche Erosionsschutzmaßnahme unzureichend.

Tabelle 4-3: Technische Möglichkeiten zur Lockerung eines verdichteten Oberbodens

	ca. Arbeitstiefe [cm]	Neigung zum Verschmieren	Ansprüche an Bodenfeuchte	Erosionsgefahr	Zeitaufwand für ca. 400 m ² [min]	Bemerkungen
1. Fräse	< 20 (- 40)	xxx	xxx	xxx	30 - 60	Frässohle!
2. Bagger: Durchziehen mit Zähnen	< 15	xx	x	xx	30 - 60	in der Regel zu flach
3. Raupe mit Reißzähnen	< 30?	xx	xx	xx	30 - 60	Verschmieren, Verdichten
4. Pflug	< 30 (- ≥50)	x	x	xx	30 - 60	eventl. Spezialgerät notwendig, Förderung von Erosionsrinnen und Bildung einer Pflugsohle
5. Bagger: Umgraben	< 50	x	x	x	90	Die Art der Ausführung (Arbeitsrichtung) ist wichtig!
x = gering(er), xx = mittel, xxx = hoch						

- Der Einsatz einer Raupe mit Reißzähnen verdichtet die Bodenoberfläche zusätzlich, weil ein leistungsstarkes und somit schweres Gerät zum Einsatz kommen müsste. Die Gefahr von Quetschungen und Verschmieren des Bodens ist vor allem bei feuchtem Boden hoch.
- Pflügen kann auch bei feuchtem Boden durchgeführt werden, jedoch begrenzen Hangneigung und Bodenfeuchte den Einsatz radgetriebener Schlepper. Auch die Tiefenwirkung ist begrenzt, denn die in der Landwirtschaft eingesetzten Pflüge haben üblicherweise nur eine Arbeitstiefe von 30 cm. Eine Pflugsohle würde im Gegensatz zur Frässohle nicht flächenhaft auftreten.

Die Verfahren 1, 3 und 4 können an einer steilen Böschung nur in Falllinie eingesetzt werden. Bei den Verfahren 3 und 4 entstehen außerdem Rillenstrukturen senkrecht zu den Höhenlinien, die als bevorzugte Fließwege für den Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen die Erosionsgefahr deutlich erhöhen.

5. Das Umgraben des Oberbodens mit dem Bagger ist zwar zeitaufwendiger als die anderen Verfahren, aber gemessen am Gesamtaufwand einer Rekultivierung in vielen Fällen vermutlich durchaus vertretbar.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile schieden die üblichen Verfahren 1, 2 und 3 wegen zu hoher Erosionsgefahr, zu hohen Ansprüchen an die Bodenfeuchte (1 und 2) oder zu geringer Effektivität (2) aus. Da auch das Pflügen in Falllinie (4) eine beträchtliche Erosionsgefahr mit sich bringt, wurde das Verfahren *Umgraben mit dem Bagger* (5) an den Versuchsfeldern erprobt (Bild 9).

Bei diesem in der Rekultivierung neuen Verfahren ist die Art der Ausführung wichtig (siehe Abbildung 4-12): Nach Vorversuchen zeigte sich, dass die gewohnte Arbeitsrichtung des Baggers umgekehrt werden muss. Im Fall der Oberbodenlockerung wäre ein übliches Arbeiten „zum Bagger hin“ kontraproduktiv und würde den Boden quetschen und damit zusätzlich verdichten. Daher muss die Lockerung am Bagger beginnen und sich weg vom Bagger vorarbeiten. Vergleichbar dem Umgraben von Hand wird der verdichtete Boden hierdurch immer gegen den zuvor geschaffenen Hohlraum ausgehoben und kann so weder gequetscht noch verdichtet werden. Die Arbeit kann sowohl mit einem Teleskopbagger als auch mit einem konventionellen Löffelbagger erfolgen. Muss der Bagger wegen nicht ausreichender Ausladung die Rekultivierungsschicht befahren, so lockert er rückschreitend seine eigene Fahrspur.



Bild 9: Auflockern des Oberbodens mit dem Teleskopbagger

Diese Maßnahme hinterließ in den Testfeldern eine sehr raue Bodenoberfläche ohne Vorzugsorientierungen wie Rillen oder Rinnen (Bild 9). Die Oberfläche wirkte zwar unordentlich und die ausgeprägte Rauigkeit behinderte auch etwas das Begehen, sie war jedoch ein äußerst wirkungsvoller Erosionsschutz. Abiotische Prozesse, vor allem Frost, zerkleinerten die großen Aggregate im Verlauf des Winters und bis zum Auflaufen der Aussaat im Frühjahr hatte sich der Boden von selbst weitgehend eingeebnet.

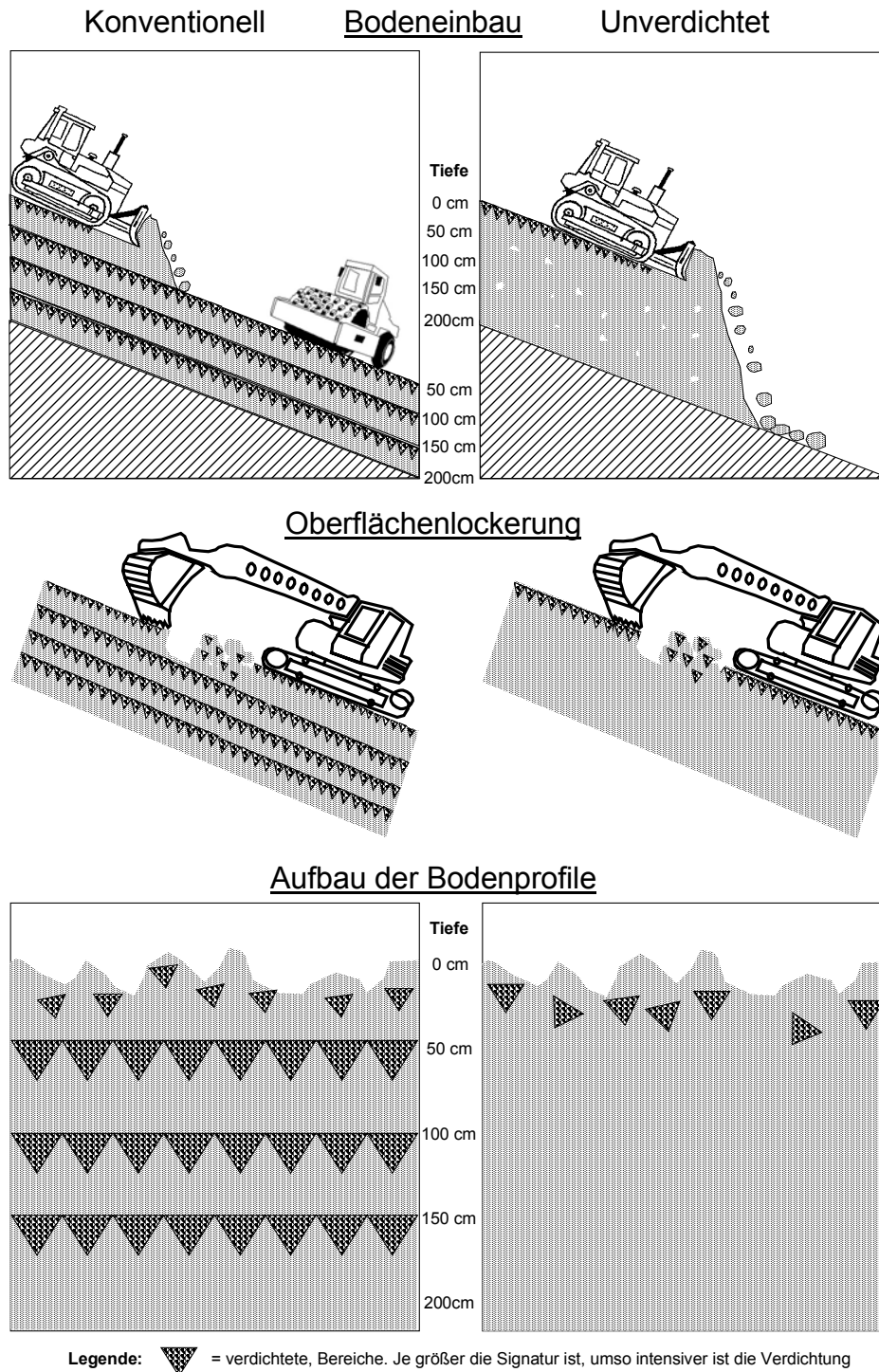


Abbildung 4-12: Bodeneinbau, Oberbodenlockerung und Entstehung der Bodenstruktur in den Testfeldern K (links) und U (rechts)

Erosionsschutz

Im Allgemeinen erfolgt direkt im Anschluss an den Bodenauftrag bei technischen Rekultivierungsmaßnahmen eine Einsaat mit bodenbedeckenden und erosionsmindernden Gras- und Krautmischungen, die sogenannte „Zwischenbegrünung“ (NEUMANN 1981, BÖNECKE 1994). Die Erdbauarbeiten an den Testfeldern wurden im Dezember 2000, also zu einem denkbar ungeeigneten Termin für eine schnelle Begrünung der Bodenoberfläche, abgeschlossen. Da in den Folgemonaten starke Niederschläge zu erwarten waren, musste kurzfristig ein effektiver Erosionsschutz hergestellt werden. Dies gelang durch die Kombination von zwei Maßnahmen:

1. Auf technischem Weg durch die Herstellung einer sehr rauhen Bodenoberfläche durch das Auflockern mit dem Bagger und
2. biologisch durch eine Ansaat mit Winterweizen (*Triticum aestivum*). Diese Pflanze ist frosthart und setzt auch im Winter ihr Wachstum fort, sobald die Temperaturen nur wenig über 0° C ansteigen. Weiterhin ist die Einsaat preiswert, die Saatgutkosten betragen bei einer Aussaatmenge von 200 kg/ha lediglich 20 €. Durch die frühe und schnelle Entwicklung des Weizens war die Fläche ab April vollständig begrünt (siehe Bild 10).



Bild 10: Ansicht der Versuchsfelder auf der Deponie Leonberg Anfang April 2001

Durch die Kombination dieser beiden Maßnahmen wurde der Oberflächenabfluss reduziert und Wassererosion, wie beispielsweise beim Starkregenereignis vom 27. Juni 2001, weitgehend unterbunden (Bild 11, siehe auch 4.5.3). Im Gegensatz dazu wiesen benachbarte, zur gleichen Zeit konventionell rekultivierte Flächen ohne die spezielle Oberbodenbearbeitung deutliche Rillen- und Flächenerosionsmerkmale auf (Bild 12).



Bild 11: Auch nach einem Starkregenereignis mit ca. 60 mm Niederschlag trat am unteren Testfeldrand keine Rillenerosion auf.



Bild 12: Im Gegensatz dazu tritt auf eingeebneten Flächen in der Umgebung der Testfelder deutliche Rillenerosion auf.

Resümee (4.2.2):

Ein echter lockerer Einbau des Bodens durch Einsetzen ohne Befahren mit Absetzer oder Teleskopbagger schied bei diesem Vorhaben aus und wird - leider - auch in der normalen Baupraxis aus Kostengründen nur in Ausnahmefällen Anwendung finden. Daher wurde das Verfahren *Vor-Kopf-Einschieben* in einer Schicht entwickelt und beim Bau der Testfelder erprobt.

Durch dieses Verfahren entstehen zwar trotz Einsatz einer leichten Raupe mit Moorkette Verdichtungen, sie beschränken sich aber auf den Oberboden der Rekultivierungsschicht. Oberbodenverdichtungen sind weniger schädlich als solche im Unterboden, denn sie können sowohl auf natürlichem Weg als auch technisch relativ leicht aufgebrochen werden. Die verdichtete Bodenoberfläche der Versuchsfelder wurde mit dem neu entwickelten Verfahren *Umgraben mit dem Bagger* gelockert. Dadurch entsteht eine sehr rauhe Oberfläche, die sehr effektiv Erosion in der vegetationsfreien Zeit unterbinden konnte.

4.3 Bodenphysik

(O. EHRMANN, P. WATTENDORF)

4.3.1 Trockenraumdichte

Ein wesentliches Merkmal zur Beurteilung des schonenden Bodeneinbaus ist die Trockenraumdichte (ρ_d) eines Substrates, bodenkundlich oft auch als Lagerungsdichte bezeichnet. Sie hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt des Bodens (siehe 3.1). Es ist deshalb interessant, zu vergleichen, wie sich die beiden Einbauverfahren *unverdichtet* und *konventionell verdichtet* in ihrer Wirkung auf diesen Parameter unterscheiden.

Die Trockenraumdichte wird üblicherweise mit Hilfe von Stechzylinderproben (HARTGE & HORN 1992, SCHLICHTING et al. 1995) bestimmt. Ein definiertes Bodenvolumen von meist 100 cm^3 wird ungestört entnommen, getrocknet, um das Bodenwasser zu entfernen und anschliessend gewogen.

Ebenso wie alle konventionellen Einbauverfahren ist auch das in Leonberg praktizierte Verfahren „Vor-Kopf-Verschieben“ des Substrates vom oberen Testfeldrand aus mit einer im Böschungsverlauf abnehmenden Zahl von unvermeidbaren Befahrungen und somit einer Oberbodenverdichtung verbunden (siehe 4.2.2). Abbildung 4-13 zeigt die Tiefenabstufung der Trockenraumdichten beispielhaft in je zwei Profilen im Januar 2001, zwei Monate nach dem Bodeneinbau und der Lockerung des Oberbodens. Die Lagerungsdichten der Rekultivierungssubstrate beim unverdichteten Einbau (U-Feld) sind mit einer Ausnahme als *mittel* ($\rho_d = 1,45 - 1,65 \text{ g/cm}^3$), die im verdichteten Kontrollfeld K durchweg als *hoch* ($1,65 - 1,85 \text{ g/cm}^3$) einzustufen⁶. Die relativ hohe Dichte der Substrate im U-Feld ist darauf zurückzuführen, dass der Boden auch ursprünglich sehr kompakt gelagert war, so betrug ρ_d im Entnahmezustand ca. $1,56 - 1,58 \text{ g/cm}^3$.

Es ist erkennbar, dass im unverdichteten Einbau die Trockenraumdichte mit der Tiefe nicht zu-, sondern eher abnimmt. In allen Tiefen sind die unverdichtet eingebauten Substrate lockerer gelagert als die Kontrollvariante. Die im unteren Bereich der Böschung situierten Profile Ua und Ka weisen aufgrund der geringeren Befahrungshäufigkeit meist auch absolut niedrigere Dichten auf als das im oberen Drittel gelegene Vergleichspaar Uc/Kc. Die Dichte des Substrates der U-Variante liegt mit Ausnahme einer Tiefenstufe durchweg unterhalb der Materialdichte im Entnahmezustand, d.h. es wurde im Zuge des Einbaues eher aufgelockert als verdichtet. Dies gilt vor allem für den Unterboden.

⁶ nach AG BODEN (1994)

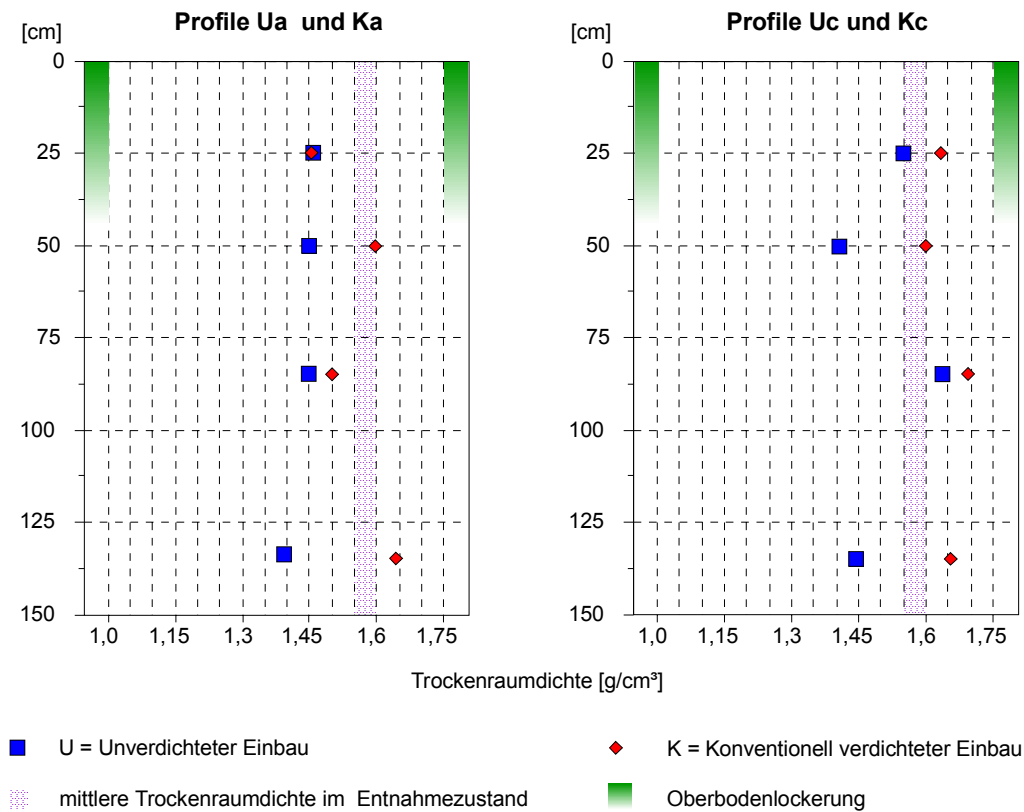


Abbildung 4-13: Trockenraumdichten in je zwei Profilen in den Testfeldern U und K (Lage der Profile siehe Abbildung 2-3)

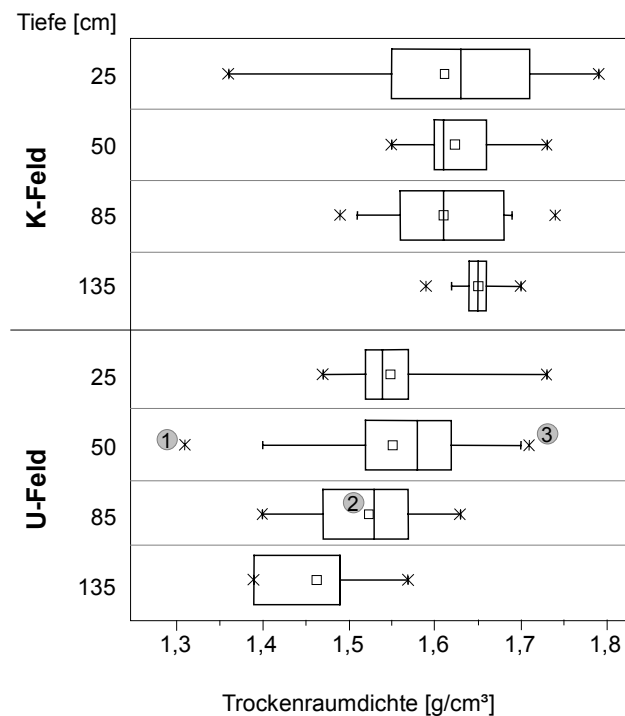


Abbildung 4-14: Trockenraumdichten der Testfelder U = unverdichteter und K = (Kontrolle) konventionell verdichteter Einbau in vier Tiefenstufen (n_{K25} = 6 Messungen, alle übrigen n ≥ 8 Messungen/Tiefenstufe/Testfeld)
 Boxplots = 25/75 %-Intervall mit Median, Linien = 5/95 %-Intervall, 1 = Minimum-, 2 = Mittel-, 3 = Maximumwert

Die im einzelnen Profil dargestellte Tendenz lässt sich auf die Fläche der Testfelder übertragen. In Abbildung 4-14 sind die Trockenraumdichten der vier Tiefenstufen, ermittelt aus allen in der Versuchslaufzeit gewonnenen Proben der beiden Testfelder, dargestellt. Die Tendenz der Werte entspricht dem Einbauverfahren: Die maximale Dichte wird beim mehrlagigen Einbau im Unterboden und beim einlagigen Einbau ohne zusätzliche Verdichtung im oberen Bereich (50 cm) gemessen. Insgesamt erzielte das Verfahren ohne Verdichtung etwas niedrigere Werte. Auch der Erfolg der Oberbodenlockerung (Tiefe 25 cm) ist gut zu erkennen. Hier weisen die Werte die größte Streuung auf (vergleiche Abbildung 4-12). Bei einem Tonanteil von 35 % sind Trockenraumdichten von unter $1,4 \text{ g/cm}^3$ der effektiven Lagerungsdichte *mittel* (Ld3), von über 1,6 als *sehr dicht* (Ld5) einzustufen; dazwischen liegt die Stufe *dicht* (nach AG BODEN 1994).

Die Trockenraumdichte ist keine statische Größe. Sie ist, zumindest im Testfeld mit unverdichtetem Einbau, Entwicklungen unterworfen. In Abbildung 4-15 sind mittlere Trockenraumdichten des Ober- und Unterbodens aus jeweils vier Profilen pro Lysimeterfeld aufgezeichnet. Die Dichten in den Profilen Ua/Ka und Uc/Kc wurden im Januar 2001, also direkt im Anschluss an den Einbau der Rekultivierungsschichten, bestimmt (siehe auch Abbildung 4-13). Die Werte der Profile Ub/Kb und Ud/Kd stammen vom Juli 2001. Die Ergebnisse lassen folgendes erkennen:

- Die Dichten unterscheiden sich aufgrund des Einbauverfahrens:
Es ist zu erkennen, dass die mittleren Trockenraumdichten des Unterbodens im Testfeld mit unverdichtetem Einbau (U) immer deutlich niedriger sind als im Kontrollfeld (K). Mit Ausnahme der am intensivsten befahrenen Probestelle Ud (s.o.) sind die Dichten auch geringer als im Entnahmezustand des Substrates.
- Die Tendenz der im Böschungsverlauf von unten nach oben zunehmenden Dichte ist für beide Testfelder sowohl im Ober- als auch Unterboden klar erkennbar, besonders ausgeprägt ist sie im Kontrollfeld K.
- Weiterhin sind - im Rahmen dieser Tendenz - die im Juni 2001 ermittelten Trockenraumdichten der Profile Ub/Kb und Ud/Kd stets höher als die Dichten unmittelbar nach Einbau der Rekultivierungsschichten (Profile Ua/Ka und Uc/Kc). Wie zuvor beschrieben, war die unverdichtete Rekultivierungsschicht des Testfeldes U nach dem Einbau Setzungen unterworfen. Diese Setzungen verändern auch die Lagerungsdichte, die sich mit der Zeit dem (quasi natürlichen) Entnahmezustand der Substrate annähert. Die Dichte des Entnahmezustandes wird jedoch, insbesondere in den Unterböden, bisher meist nicht erreicht. Dies kann als Erfolg des praktizierten Einbauverfahrens ohne zusätzliche Verdichtung gewertet werden.

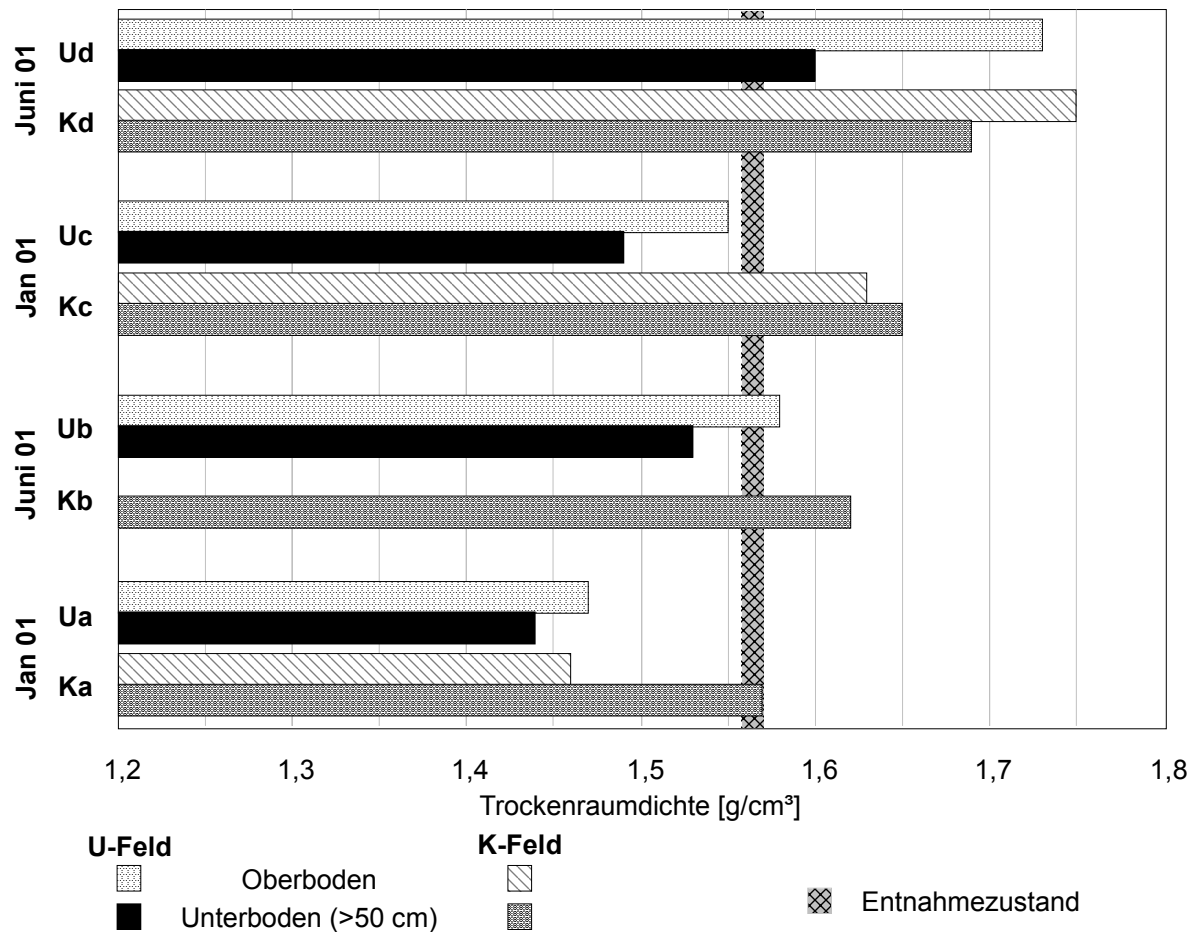


Abbildung 4-15: Trockenraumdicthe im Ober- (25 cm Tiefe) und Unterboden (\emptyset der Tiefen 50, 85 und 135 cm) der Testfelder U und K. Die Lage der Messpunkte a bis d ist aus Abbildung 2-3 ersichtlich. Probetermine: a und c: Januar 2001, b und d: Juni 2001

4.3.2 Eindringwiderstand

Mit der Messung des Eindringwiderstandes können verdichtete Zonen im Boden charakterisiert werden, weiterhin erlaubt dieser Parameter Aussagen über die Durchwurzelbarkeit eines Bodens. Die Aussagekraft ist jedoch mit Einschränkungen versehen, weil Wurzelspitzen einen viel kleineren Durchmesser als Penetrometerspitzen aufweisen und auch gezielt in kleine Risse und Hohlräume zwischen Körnern oder Aggregaten einwachsen können. Weiterhin ist die Durchwurzelung von einer Reihe anderer Faktoren, wie z.B. der Sauerstoffversorgung, abhängig (vergleiche hierzu 3.3).

Methode

Die Bestimmung des Eindringwiderstandes erfolgte mit einem Handpenetrometer (Proctornadel) an Bodenprofilen senkrecht zur Profilwand in Tiefenstufen von 5 cm und

jeweils acht Einzelmessungen pro Tiefenstufe. Es wurden Spitzen von 1,6 oder 2,5 cm² Fläche verwendet. Die Messungen wurden während der Aufgrabungen in den Testfeldern Ende Dezember 2000/Anfang Januar 2001 (Profile a und c) und Ende Mai/Anfang Juni 2001 (Profile b und d) durchgeführt, allerdings nicht mit dem selben Penetrometer, sondern mit ähnlichen Geräten und Messspitzen.

Die Ergebnisse werden als relative Werte dargestellt. Der höchste gemessene Wert einer Messperiode ist mit 100 % angesetzt. Absolutwerte sind auch bei Verwendung ein und desselben Gerätes nicht in jedem Fall vergleichbar, da das Messergebnis nicht nur von Geräteeigenschaften (z.B. der Federspannung) und vom spezifischen Eindringwiderstand des jeweiligen Bodens sondern unter anderem auch von der Bodenfeuchte abhängig ist. Ein Vergleich zwischen zwei Varianten unter ansonsten gleichen Bedingungen ist bei Berücksichtigung dieser Einschränkungen aber unproblematisch. Um den Einfluss der Bodenfeuchte berücksichtigen zu können, wurde sie bei jeder Messung in jeder Tiefenstufe mit der Fingerprobe (nach AG BODEN 1994) ermittelt.

Ergebnisse

Bei der Messung im Januar 2001 (Profile a und c) war der Boden in beiden Feldern in der gesamten Profiltiefe nahezu gleichmäßig durchfeuchtet (pF 2,5). Im Juni 2001 (Profile b und d) war der Boden von oben her so stark ausgetrocknet, dass nahe der Bodenoberfläche bis ca. 20 cm Tiefe keine Messung durchgeführt werden konnte. Bis in 70 (K-Feld) bzw. 80 cm (U-Feld) Tiefe lag die Bodenfeuchte unter der Feldkapazität, darunter war der Boden feuchter. Die im Oberboden der Profile b und d (in Abbildung 4-16 rechts) festgestellten höheren Eindringwiderstände sind also nicht zwangsläufig die Folge von Verdichtung sondern eher Folgen der Austrocknung⁷. Hierdurch erscheinen die Werte im Unterboden relativ niedriger als dies ihrer tatsächlichen Dichte entspricht.

Die in Abbildung 4-16 dargestellten Ergebnisse zeigen trotz der erwartungsgemäß hohen Streuung der Einzelmessungen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Einbauvarianten:

- Im Unterboden (>75 cm) sind die Eindringwiderstände im K-Feld immer größer als im U-Feld. Im Oberboden sind dagegen die Unterschiede geringer. Gründe hierfür sind die in beiden Feldern gleiche Oberbodenlockerung (siehe 4.2.2.2) und - bei der Messung im Juni - die oberflächliche Austrocknung der Böden.
- Verdichtete Zonen sind im U-Feld nicht zu erkennen. Im K-Feld treten sie aber deutlich bei der ersten Messserie (22.12. u. 9.1.) und weniger deutlich bei den späteren zweiten Messungen hervor. Ob diese Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Mess-

⁷ Der Oberboden im U-Feld war etwas stärker ausgetrocknet, vermutlich eine Folge der intensiveren Durchwurzelung (siehe 4.7.3). Bei gleicher Verdichtung wären die Eindringwiderstände somit etwas höher.

termin die Folge einer Bodenentwicklung im K-Feld sind oder als Ursache eher kleinräumige Heterogenitäten in Frage kommen, kann zur Zeit nicht beantwortet werden.

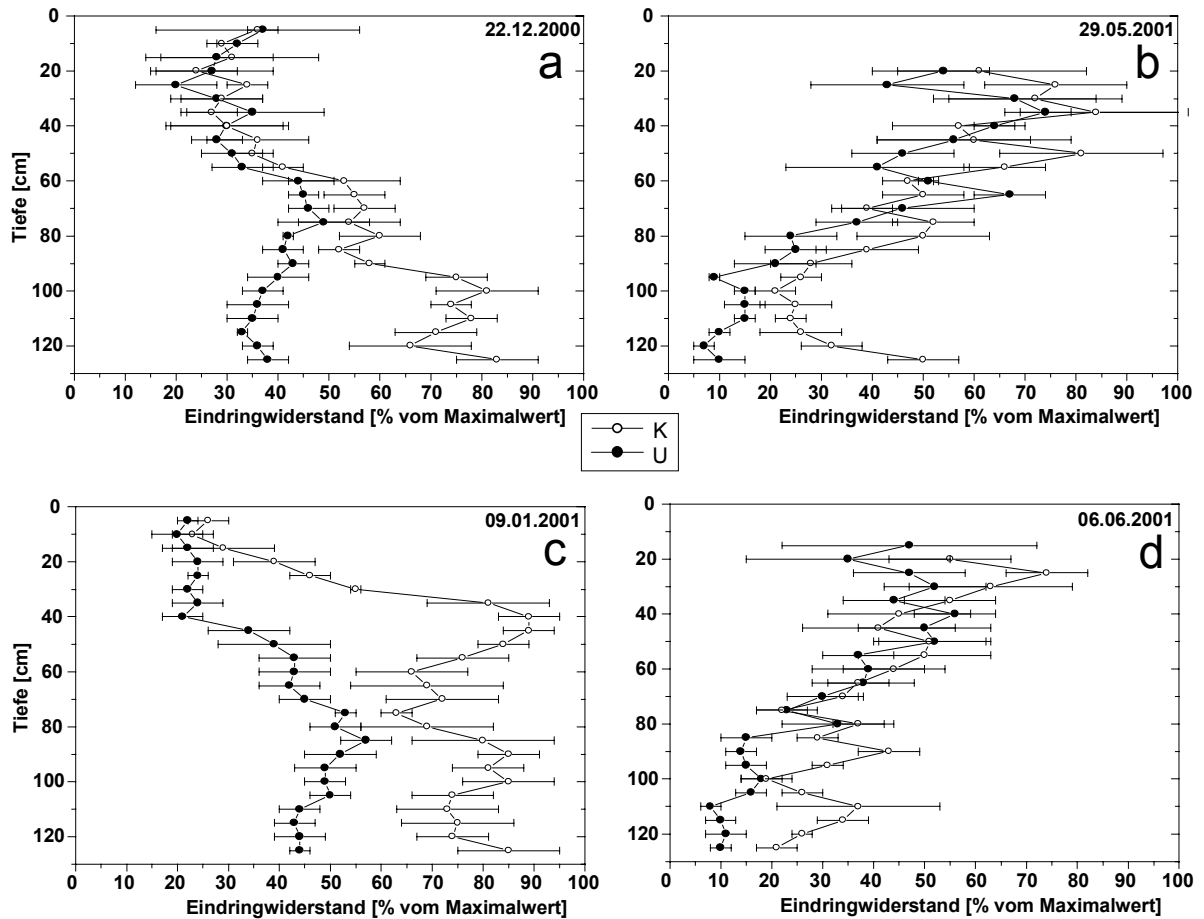


Abbildung 4-16: Eindringwiderstände im Vergleich. in jeder Tiefe sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung dargestellt (n = 8). Die Messungen a/c sowie b/d wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten und nicht mit dem selben Gerät durchgeführt.

4.3.3 Infiltrationseigenschaften

Ziel dieses Versuches war das Markieren der bevorzugten Fließwege bei schnellem Wasserfluss im Boden, wie er beispielsweise nach ausgiebigen Niederschlägen stattfindet, um so die Porenstruktur der Substrate im U- und K-Feld und ihre Auswirkungen auf Infiltration und Durchlüftung beurteilen zu können.

Methode

Zur Markierung des wasserführenden Hohlraumsystems im Boden der Versuchsfelder wurde eine aus 5 g/m² des Farbtracers *Brilliant Blue*⁸ in einer Wassermenge von 40 l/m² bestehende Färbelösung ausgebracht. Der gelöste Farbstoff wird im Boden praktisch nicht sorbiert und ist daher geeignet, die Fließwege des Wassers zu charakterisieren. Die Farblösung wurde innerhalb einer Stunde mit der Gießkanne in höchstmöglicher Intensität auf die Bodenoberfläche gegossen, ohne jedoch Oberflächenabfluss zu verursachen. Mit diesem Verfahren wird ein Starkregen simuliert. Insgesamt wurde eine Fläche von 2,2 m² (160 x 140 cm) beregnet, die Auswertung der Ergebnisse beschränkt sich jedoch auf einen Bereich von 0,4 m² (80 x 53 cm) im Zentrum der behandelten Fläche. Dieser Bereich ist frei von Randeffekten.

Die Versuche wurden im Frühjahr 2002 durchgeführt. Der Oberboden wies aufgrund einer vorausgegangenen Trockenperiode leichte Schrumpfrisse auf. Zwei Stunden nach Aufbringen der Farblösung wurden die beregneten Flächen aufgegraben und horizontale Schnittflächen in drei Tiefenstufen (ca. 32, 65 und 90 cm) angelegt (siehe Abbildung 4-17). Die Tiefenabstufung orientierte sich an der Lage der verdichteten Zone im K-Feld. Der erste Horizontalschnitt wurde im oberen Bereich dieser Zone (intensivste Verdichtung) angelegt, die beiden folgenden in Abständen von jeweils 25 - 30 cm senkrecht darunter. Damit liegen die Schnitte 2 und 3 im K-Feld im lockeren Boden zwischen der ersten und zweiten verdichteten Schicht (vergleiche hierzu Abbildung 4-12). In der zweiten Verdichtungsschicht wurde kein Horizontalschnitt mehr präpariert, weil nicht genügend Farblösung für eine sinnvolle Auswertung dieser Schicht erreicht hat. Die Horizontalschnitte im U-Feld liegen alle in Bereichen mit unverdichtetem Boden.

Die Horizontalschnitte wurden nach dem Aufgraben und Präparieren der Schnittfläche mit einem rechteckigen Rahmen markiert und senkrecht von oben mit einer Mittelformatkamera (6 x 4,5 cm) fotografiert. Die Dias wurden gescannt, bei Bedarf farbkorrigiert und

⁸ *Brilliant Blue* ist ein Lebensmittelfarbstoff und daher auch in höheren Konzentrationen nicht sehr toxisch (FLURY & FLÜHLER 1994). Das Fließverhalten von *Brilliant Blue* ist bei FLURY & FLÜHLER (1995) beschrieben.

entzerrt. Anschließend wurden alle blaugefärbten Flächen am PC mit einer dunklen Signatur unterlegt, um sie deutlicher hervorzuheben.

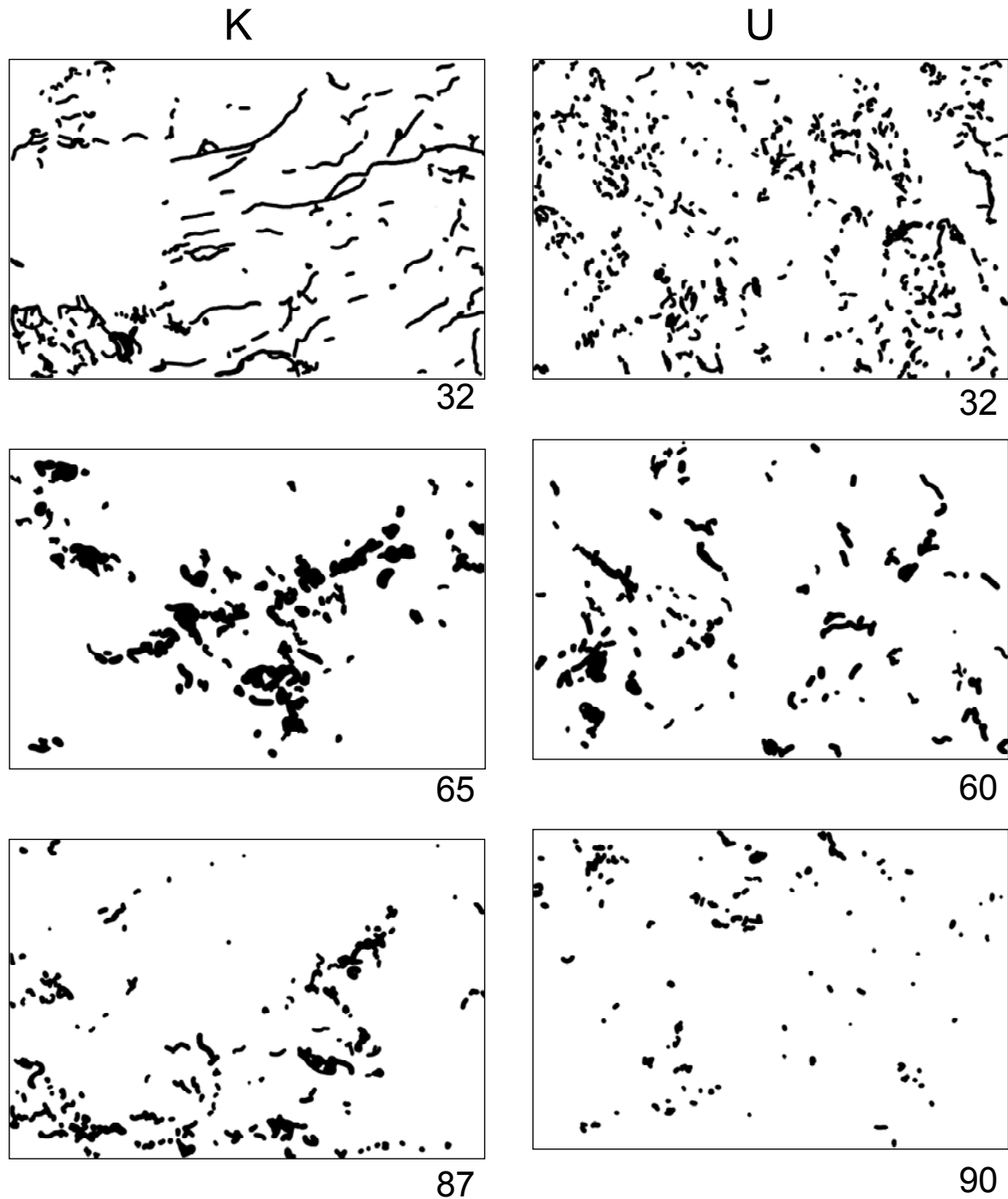


Abbildung 4-17: Verteilung des Farbstoffes Brilliant Blue in jeweils drei Tiefen im K- und U-Feld. Die Zahlen rechts unter dem Bild sind an der hangabwärtsgewandten Seite der Horizontalschnittfläche positioniert und geben ihre mittlere Tiefe an.

Ergebnisse

In beiden Feldern war das Ausbringen großer Wassermengen innerhalb einer Stunde überraschend unproblematisch. Aufgrund der Oberbodenlockerung und einiger Trockenrisse wurde die Lösung in beiden Testfeldern vollständig vom Boden aufgenommen und es trat kein Oberflächenabfluss auf. Trotzdem sind Unterschiede zwischen den Versuchsfeldern zu verzeichnen:

- Im Horizontalschnitt der ersten Tiefenstufe (32 cm) sind im U-Feld viele einzelne kleine Farbflecken erkennbar. Die Infiltration erfolgt demnach an vielen Punkten und somit relativ gleichmäßig. Im K-Feld benetzte die Farblösung dagegen fast ausschließlich linienartige Strukturen. Es handelt sich hierbei eindeutig um hangparallel orientierte Risse. An einer Stelle (links, Mitte) fand keine Blaufärbung, also auch keine Sickerung statt, hangabwärts liegt ein Mäusebau. Dort war die Sickerung höher als im Durchschnitt⁹.
- In der zweiten Tiefenstufe (60 bzw. 65 cm) sind die Unterschiede zwischen den Versuchsfeldern nur gering.
- In der dritten Tiefenstufe (cm) nehmen die Anteile gefärbter Stellen in beiden Feldern ab, aber im U-Feld sind sie deutlich geringer als im K-Feld.

Die unterschiedliche Bodenstruktur der Einbauvarianten zeichnet sich deutlich im Infiltrationsverhalten ab. Die erste Verdichtungsschicht im K-Feld lässt eine Sickerung nur in Rissen zu, die sich infolge der vorausgegangen Trockenheit aufgeweitet haben. Bei feuchtem Boden ohne offene Schrumpfrisse wäre die Infiltration langsamer und an weniger Stellen erfolgt.

Erwartet wurde im K-Feld eigentlich ein Rissbild mit überwiegend senkrecht zueinander stehenden Rissen, denn normalerweise entstehen bei Austrocknung senkrecht zu den Rissen 1. Ordnung weitere Risse 2. Ordnung. Im K-Feld liegt aber offensichtlich eine Vorzugsorientierung des Bodens vor, daher haben sich überwiegend hangparallele Risse gebildet. Diese Vorzugsorientierung könnte eine Folge der Verdichtung mit dem Falllinie fahrenden Verdichter sein. Eine weitere, jedoch sehr unwahrscheinliche Erklärung wären kleine Rutschungen, die hangparallele Risse hinterlassen haben.

Die in der Fläche und im Raum gleichmäßige(re) Infiltration im U-Feld ermöglicht bei gleicher Wasserspeicherkapazität aufgrund der besseren Befeuchtung eine höhere Wasserspeicherung im Oberboden. Dadurch wird die Absickerung in tiefere Bodenschichten verringert. Dies ist die wahrscheinlichste Erklärung für die geringere Färbung in der untersten Fläche im U-Feld.

⁹ Vermutlich bewirkte die besonders gute Infiltration durch die Mäuseröhren eine geringere Infiltration in der benachbarten Fläche.

4.3.4 Mikromorphologie der Verdichtungen

Mit mikromorphologischen Methoden kann der Boden mit einer wesentlich stärkeren Vergrößerung als im Gelände betrachtet werden. Außerdem können echte Schnitte angefertigt werden, während im Geländeprofil der Boden eher an Aggregatoberflächen bricht. Durch unterschiedliche Beleuchtungstechniken wie Auflicht, Durchlicht und Polarisation können zusätzliche Information erhalten werden.

Der Nachteil von mikromorphologischen Methoden ist die aufwändige Präparation. Der Boden muss zunächst mit Kunstharz fixiert werden. Die Untersuchung erfolgt entweder an ca. 5 mm dicken Anschliffen oder an ca. 0,03 mm „dicken“ Dünnschliffen. Letztere sind wesentlich aufwändiger in der Herstellung, ermöglichen jedoch aufgrund ihrer geringen Stärke auch die Betrachtung im Durchlicht und lassen so am Lichtmikroskop eine stärkere Vergrößerung zu.

Methode

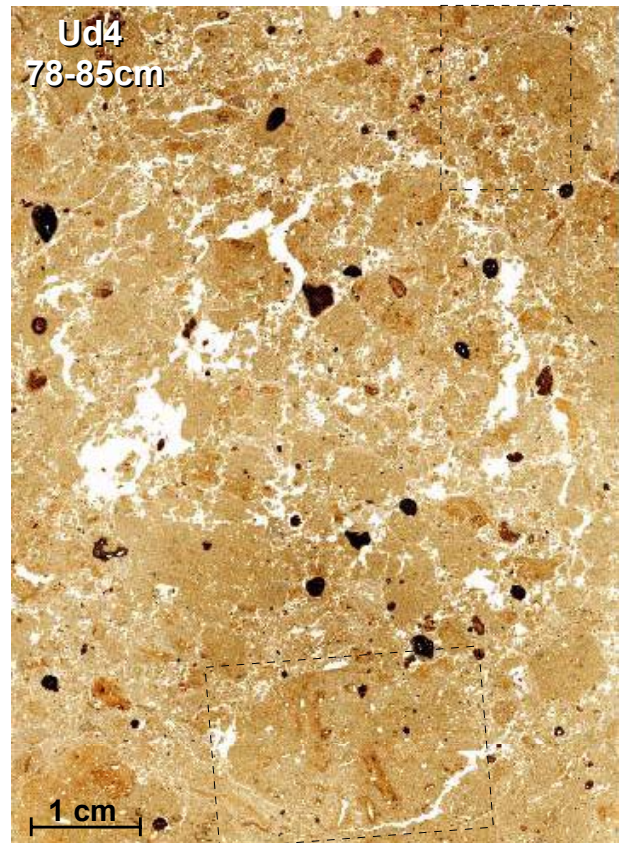
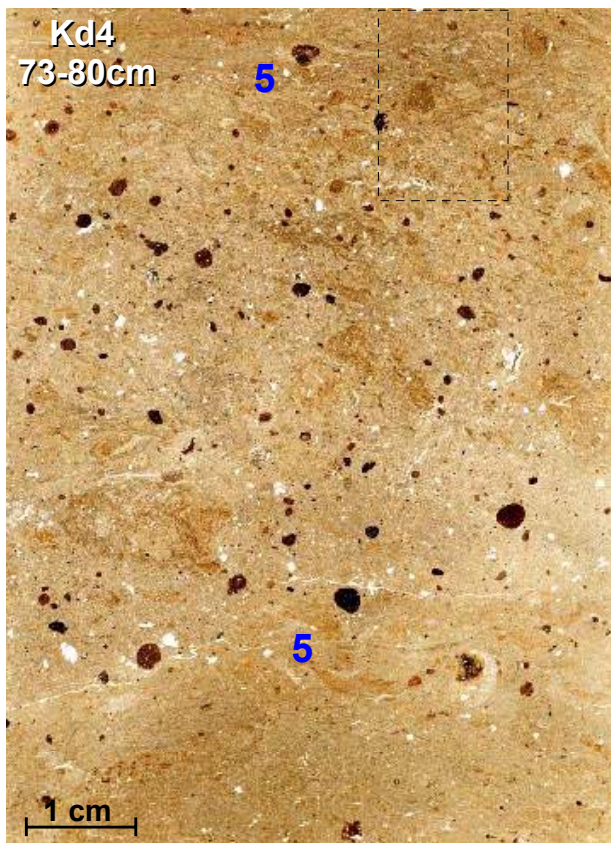
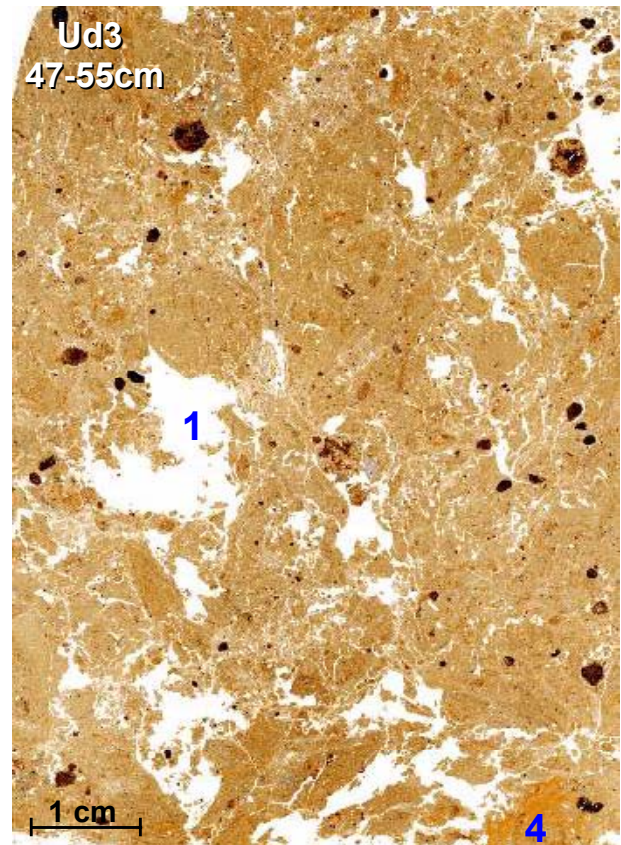
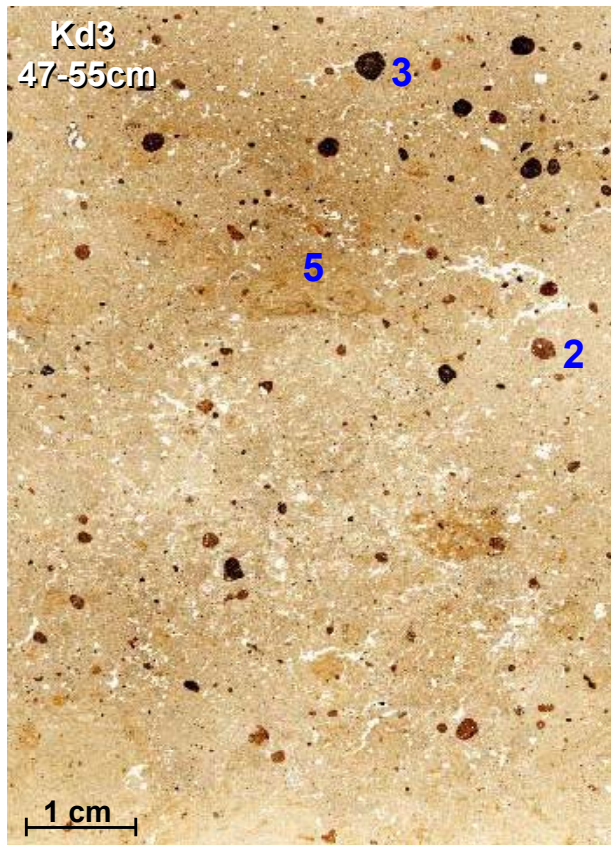
Um die Bodenstruktur bei der Probenahme aus den Versuchsfeldern nicht zu verändern, wurden während der Aufgrabungen Proben aus den Bodenprofilwänden mittels Blechrahmen¹⁰ entnommen. Dabei wurde der Rahmen durch behutsames Vorschneiden an den Seiten über die Bodenprobe geschoben.

Im Labor erfolgte eine Entwässerung des Bodens mittels Acetonaustausch und anschließend die Fixierung in Kunstharz (Vestopal). Nach dem Aushärten des Kunstharzes wurden die Proben in Scheiben geschnitten. Die ausgewählte Scheibe wurde angeschliffen, auf eine Glasplatte aufgeklebt und bis zu einer Dicke von ca. 30 µm abgeschliffen. Nach dem Polieren wurde die Oberfläche mit einem Deckglas abgedeckt¹¹. Damit ist der sogenannte Bodendünnschliff fertiggestellt.

Die Proben wurden jeweils aus den verdichteten Zonen des K-Feldes und den entsprechenden Tiefen des U-Feldes entnommen. Auch im K-Feld finden sich aufgrund des lagenweisen Einbaues zwischen den verdichteten Schichten lockere Bereiche, deren Eigenschaften mit dem Boden im U-Feld vergleichbar sind (siehe 4.2.2.1). Entscheidend für die Durchlüftung, Entwässerung und Durchwurzelung des Bodens sind aber die horizontal ausgerichteten verdichteten Bereiche. Daher wurden diese gezielt beprobt.

¹⁰ sogenannte Kubienakästen mit den Abmessungen H: 8 cm, B: 6 cm, T: 4 cm

¹¹ Eine ausführliche Methodenbeschreibung ist bei KREBS (1995) zu finden.

Bildtafel A: Übersichtsfotos von Bodendünnschliffen zur Mikromorphologie

Ergebnisse

1. Allgemeine Bemerkungen zu den Dünnschliffotos

Alle Fotos wurden bei normalem Durchlicht aufgenommen. Hohlräume [1 → die Zahl steht in den Bildtafeln bei den entsprechenden Objekten] erscheinen daher weiss. In der gelbbraunen Bodenmatrix sind fast keine einzelnen Mineralkörner¹² zu sehen. Auffallend sind aber die zahlreichen rotbraunen [2] bis opaken [3] Objekte unterschiedlicher Größe von meist abgerundeter Form. Es handelt sich dabei um Eisen- oder Mangankonkretionen, typische Bestandteile von Filderböden aus umgelagertem Lösslehm. Weniger deutlich, aber ebenso typisch sind die schlierenförmigen Tonbeläge [4], Spuren alter Tonverlagerung.

2. Beschreibung der Übersichtsaufnahmen [→ Bildtafel A]

Gemeinsam ist den Dünnschliffen aus dem U- und K-Feld:

- eine ähnliche Farbe,
- eine ähnliche Korngröße (Schluff/Ton)
- das Vorkommen von Eisen-Manganoxiden und von Tonbelägen.

Diese Parameter weisen darauf hin, dass der Boden im U- und K-Feld die gleiche Herkunft hat. Die K und U-Dünnschliffe **unterscheiden** sich aber auch deutlich:

- Die Proben aus dem K-Feld sind viel dichter, große Hohlräume fehlen fast vollständig. Dies war an den Geländeprofilwänden nicht zu sehen, weil dort keine echten Schnitte hergestellt werden konnten, sondern nur Oberflächen betrachtet wurden.
- Vor allem bei Dünnschliff Kd4 und weniger deutlich auch bei Kd3 sind Bodenbestandteile an einigen Stellen horizontal eingeregelt [5].

Zwischen den **Tiefenstufen** einer Variante (also z.B. beim Vergleich von Ud3 mit Ud4) gibt es ebenfalls Unterschiede:

- Die untere Stufe ist grundsätzlich etwas dichter, also ärmer an Hohlräumen. Dies könnte eine Folge der höheren Bodenauflast sein.
- Dünnschliff Kd4 wurde aus der zweiten verdichteten Schicht des K-Feldes entnommen (siehe Abbildung 4-12) Er weist deutlich mehr horizontal eingeregelt Bereiche auf als der Dünnschliff aus der darüberliegenden verdichteten Schicht (Kd3). Dies ist jedoch keine Folge einer höheren Bodenauflast, sondern dort war die Verdichtung durch das Einbauverfahren intensiver.

¹² Der eingebaute Boden setzt sich vorwiegend aus Schluff [Ø2 - 63 µm] und Ton [<2 µm] zusammen. Daher sind einzelne Mineralkörner bei dieser Vergrößerung noch nicht sichtbar.

3. Veränderung der Bodenstruktur durch den Einbau [→ Bildtafel B, Detailfotos]

Um die Auswirkungen der Verdichtung auf den Boden deutlicher zu zeigen, sind in Bildtafel B Ausschnittvergrößerungen aus den Dünnschliffen des stärker verdichteten Horizontes des K-Feldes (Kd4) sowie der vergleichbaren Tiefe des U-Feldes (Ud4) angefertigt. Die Lage der Vergrößerungen ist in den Aufnahmen (Bildtafel A) verzeichnet.

Auf Bildtafel B ist unten (großes Bild) zum Vergleich ein Bereich aus Ud4 zu sehen, in dem die Originalstruktur des Bodens vor der Umlagerung teilweise erhalten blieb. Der ungestörte Teil ist umrandet. Oben links ist ein verdichteter Bereich aus Kd4 und oben rechts ein etwas dichter Bereich aus Ud4 dargestellt.

- Gefüge des ungestörten Bodens [Bildtafel B, großes Bild unten]

Im ungestörten Gefüge sind zahlreiche Hohlräume [6] ähnlichen Durchmessers (ca. 200 - 400 μm) zu erkennen. Es handelt sich dabei um ehemalige Wurzelröhren. Diese potenziell kontinuierlichen Hohlräume mit Anschluss an die Bodenoberfläche sind bevorzugte Transportwege für Gase, Flüssigkeiten und in Flüssigkeiten suspendierte Stoffe. Dies kann man auch indirekt zeigen: Um einige Hohlräume haben sich Säume von Eisenoxiden [7] gebildet - eine Folge des höheren Sauerstoffgehaltes im Hohlraum. Manche Hohlräume weisen Tonbeläge auf [8] - hier wurde suspendierter Ton aus dem Oberboden eingewaschen. Tonbeläge ohne Bezug zu einem aktuellem Hohlraumsystem [9] sind Relikte älterer Tonverlagerung, die dazugehörigen Hohlräume sind nicht mehr existent. Die Hohlräume sind relativ stabil, ihre Wandungen wurden durch Wurzeldruck, Eisenoxide oder Tonbeläge verfestigt. Manchmal tragen alle drei Faktoren zu einer stabileren Wand bei.

- Gefügeveränderung im U-Feld nur durch Umlagerung [Bildtafel B, oben rechts]

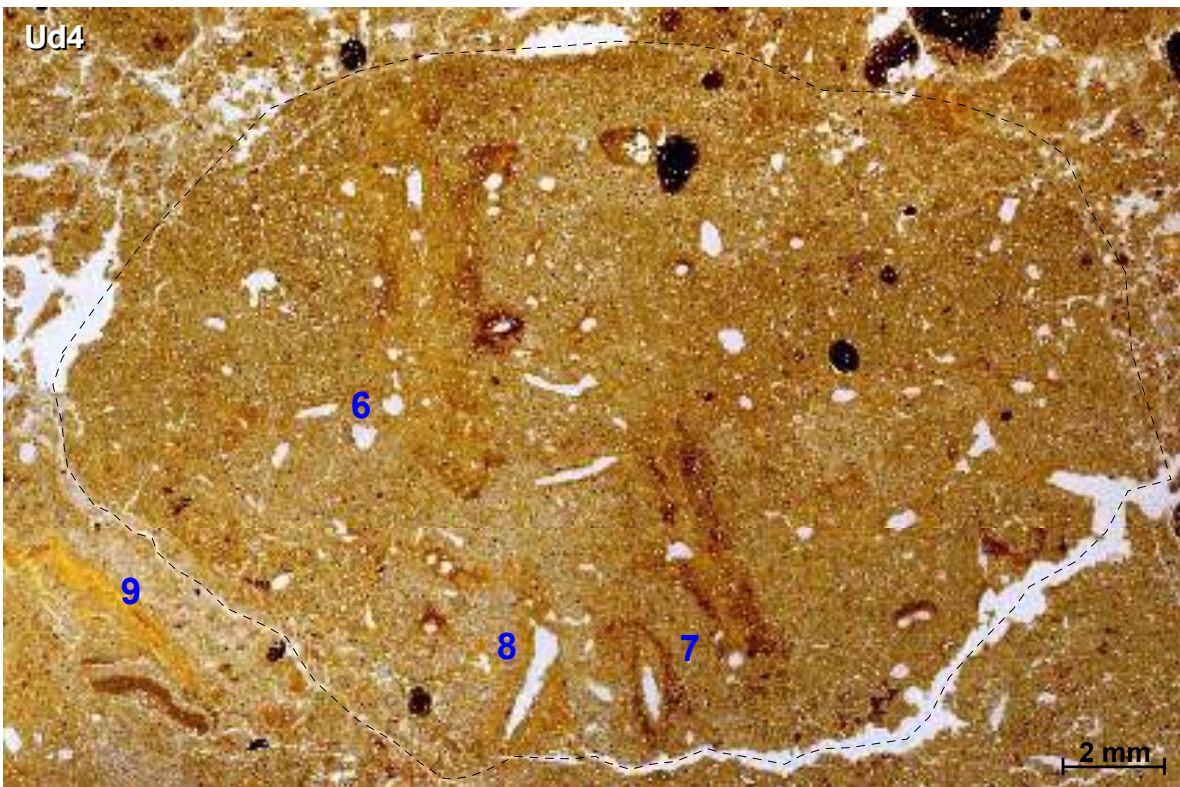
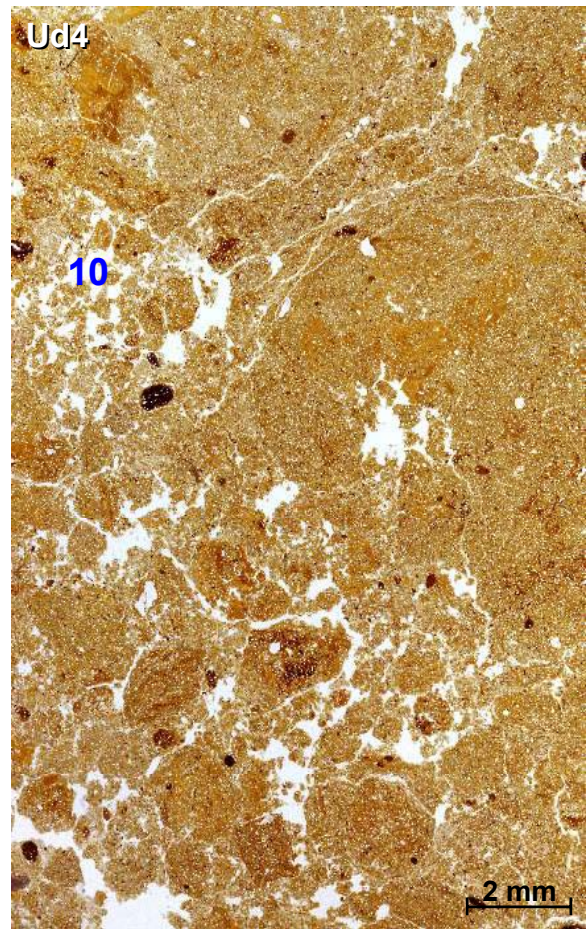
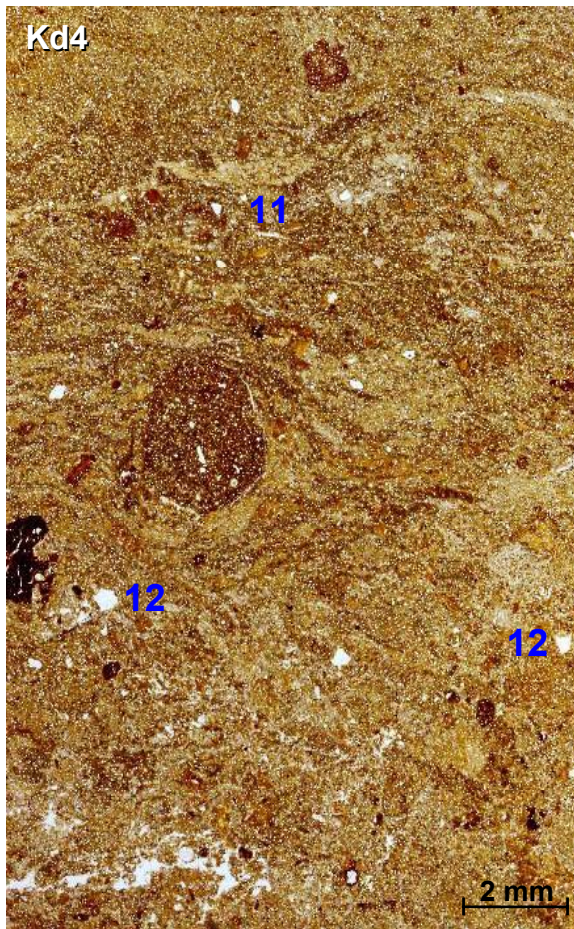
Durch die Umlagerung ohne Verdichtung sind zahlreiche neue Hohlräume zwischen den Bodenaggregaten [10] entstanden. Daher ist der umgelagerte Boden lockerer als der Boden im Entnahmestadium vor der Umlagerung. Diese künstlichen Hohlräume sind aber - aufgrund anderer Entstehungsursachen - nicht durch Wandbeläge verfestigt. Daher sind sie wesentlich weniger stabil und haben eine viel kürzere Lebensdauer als die Hohlräume im natürlich gewachsenen Unterboden.

- Gefügeveränderung im K-Feld durch Umlagerung und Verdichtung [Bildtafel B, oben links]

Durch den hohen Druck beim Verdichten wurden die Bestandteile des Bodens horizontal eingeregelt [11]. Größere Hohlräume fehlen fast vollständig, sie wurden zerstört. Die hellen Objekte mit eckigen Rändern [12] sind keine Hohlräume sondern transparente Quarzkörner.

Die Kontinuität der Poren wurde im U-Feld und im K-Feld bei der Umlagerung zerstört, dies kann allerdings in Dünnschliffen nicht gezeigt werden. Dieser Sachverhalt zeigt sich aber deutlich beim Färbeversuch (siehe 4.3.3).

Bildtafel B: Ausschnittvergrößerungen (Lage siehe Bildtafel A)



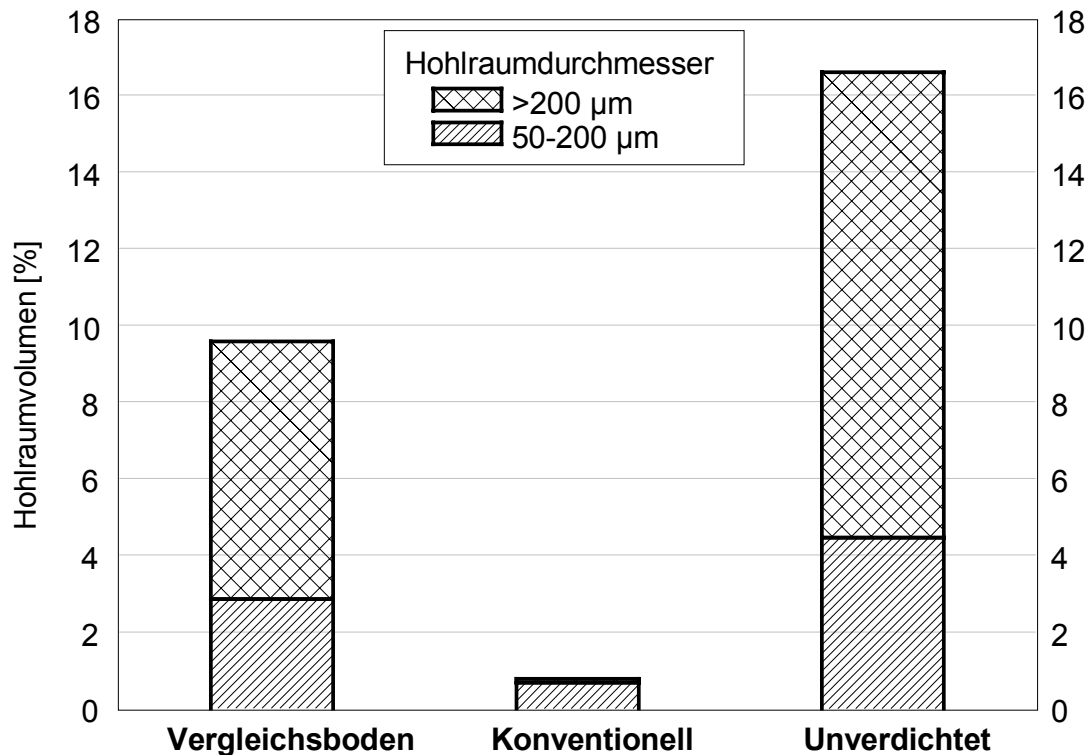


Abbildung 4-18: Hohlraumvolumen [Vol-%] in Proben aus den Testfeldern Leonberg (K und U) sowie einem im Gefüge ungestörten Vergleichsboden

4. Messungen des Hohlraumvolumens von K und U an Dünnschliffen

Am Lichtmikroskop wurden die Anteile der Hohlräume getrennt nach den Größenklassen 50 - 200 µm und > 200 µm sichtbaren Durchmessers gemessen (nach MAIER-KÜHNE 1988). Beide Porenklassen zählen zu den Grobporen und haben entscheidenden Einfluss auf die Durchlüftung des Bodens und die Infiltration von Niederschlägen. Die Messung erfolgte mittels eines 10 x 10 Strichgitters bei 50-facher Vergrößerung (Messfeld 4 x 4 mm) und wurde an jedem Dünnschliff 42-fach wiederholt. Neben den Proben aus dem K- und U-Feld in Leonberg wurden auch Dünnschliffe aus dem Unterboden eines vergleichbaren Bodens aus Filderlehm mit ungestörtem Gefüge ausgewertet.

Die Ergebnisse der Messung (Abbildung 4-18) zeigen beim unverdichteten Einbau einen Anstieg des Porenvolumens gegenüber dem Vergleichsboden um den Faktor 1,6 in der Klasse 50 - 200 µm \varnothing bzw. 1,8 ($\varnothing > 200 \mu\text{m}$). Beim verdichteten Einbau finden sich hingegen nur noch 1/4 ($\varnothing 50 - 200 \mu\text{m}$) bzw. 1/50 ($\varnothing > 200 \mu\text{m}$) der Hohlräume des Vergleichsbodens wieder. Vor allem die großen und damit für Transportprozesse effektiven Poren wurden durch das Verdichten beim Einbau nahezu vollständig zerdrückt.

Resümee (4.3):

Mit dem praktizierten Einbauverfahren für unverdichtete Böden konnten insgesamt tolerierbare Trockenraumdichten überwiegend unterhalb der Ausgangsdichte des Substrates erzielt werden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Einbauverfahrens liegt darin, dass keine tiefreichenden Verdichtungen entstehen, die mit technischen Mitteln später praktisch nicht mehr rückgängig gemacht werden können.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen nach dem Bodeneinbau belegen folgende Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Versuchsfeldern:

- In beiden Feldern ist die ursprüngliche Porenkontinuität durch die Bodenumlagerung aufgehoben.
- Das Substrat des K-Feldes weist eine höhere Trockenraumdichte auf, dies ist vor allem im Unterboden der Fall.
- Durch die lagenweise Verdichtung beim konventionellen Einbau entstehen laterale Sperrschichten in ca. 50, 100 und 150 cm Tiefe. Dort sind die Grobporenanteile drastisch reduziert.
- In den verdichteten Zonen des K-Feldes wurden deutlich höhere Eindringwiderstände festgestellt.
- Die Versuchsfelder haben unterschiedliche Infiltrationseigenschaften; im K-Feld erfolgt Infiltration vorwiegend in Rissen, im U-Feld dagegen eher flächig.

Auswirkungen auf die Vegetation

Als Konsequenz aus den unterschiedlichen Einbauverfahren ist das K-Feld ein ungünstigerer Pflanzenstandort als das U-Feld:

- Aufgrund des geringeren Porenvolumens und der Unterbrechung der Porenkontinuität ist im K-Feld die Durchlüftung schlechter. Da zudem die Eindringwiderstände höher sind, ist dieses Feld für Pflanzenwurzeln schwerer zu erschließen. Die Durchwurzelung ist folgerichtig auch wesentlich weniger tief und findet wie die Sickerung vorwiegend in Rissen statt. Das gesamte Bodenvolumen wird selbst im Oberboden nicht erschlossen.
- Aufgrund der unterschiedlichen Infiltrationseigenschaften wird die Wasserspeicherkapazität (nicht -kapazität) im K-Feld außerdem etwas geringer sein.

In beiden Feldern wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit hochwertiger Löss mit einer sehr hohen Wasserspeicherkapazität eingebaut. Daher sind die Auswirkungen auf den Pflanzenwuchs insgesamt weniger drastisch als dies in konventionellen Rekultivierungen der Fall wäre, wenn - wie üblich - Böden mit hohen Stein-, Sand- und/oder Tonanteilen eingebaut werden.

4.4 Bodenluft

(H. SCHACK-KIRCHNER)

Einführung

Die Schlüsselfunktion der nutzbaren Wasserspeicherkapazität für die Funktion einer Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht wurde bereits ausführlich in den Kapiteln 3.1 und 3.2 dargestellt. Der Bodenwasserspeicher wird erst durch die Erschließung des Unterbodens mit Wurzeln verfügbar gemacht und die Durchwurzelung hängt neben dem artspezifischen Durchwurzelungsverhalten unter anderem wesentlich vom Bodengashaushalt ab.

Als Bodenbelüftung bezeichnet man die Gesamtheit der Vorgänge der Versorgung der Wurzeln und Bodenorganismen mit Sauerstoff und der Entsorgung des respiratorischen Kohlendioxids. Sie kann als ökologisches Bindeglied zwischen Bodenstruktur und Wurzelwachstum angesehen werden (SCHACK-KIRCHNER 1996). MURACH et al. (1993) konnten durch künstliche Einblasung von Außenluft die typische Abnahme der Feinwurzelichte mit der Bodentiefe bei Fichte völlig aufheben. GAERTIG et al. (2002) zeigt einen engen Zusammenhang zwischen Bodenbelüftung und Tiefendurchwurzelung bei Eichenarten. QI et al. (1994) konnten im Laborexperiment einen exponentiellen Rückgang der Wurzelatmung mit zunehmendem CO₂-Partialdruck bereits bei atmosphärennahen Konzentrationen feststellen. Den Wachstumsrückgang von *Pinus radiata* auf vergrasteten Flächen konnten SANDS et al. (2000) hauptsächlich mit der Belüftungskonkurrenz im Boden erklären. In vielen Fällen wird demnach die Aussage zutreffen, dass nur gut belüftete Böden auch tief durch Wurzeln erschlossen werden.

Mit drei Kriterien kann die Belüftung eines Bodenhorizontes beschrieben werden:

1. **Bodentiefe:** Wie weit müssen die Gase von der Bodenoberfläche transportiert werden?
2. **Transportkapazität:** Ist die Gasdurchlässigkeit bis zur Bodenoberfläche ausreichend?
3. **luftgefülltes Porenvolumen:** Besitzt der Horizont selbst einen ausreichenden, von Wurzeln erschließbaren Makroporenraum?

Transportkapazität und luftgefülltes Porenvolumen sind keine statischen Bodenparameter, sondern stehen in unmittelbarer Konkurrenz zur Wassersättigung. Böden mit sehr hohen Wassersättigungen sind unabhängig von der Bodenstruktur (Porosität, Porenkontinuität) schlecht belüftet. Wenn man beim Einbau einer Rekultivierungsschicht den Faktor Bodenbelüftung berücksichtigen will, muss Folgendes beachtet werden:

- Starke Verdichtung beim Einbau vermeiden, Trockenraumdichten sollten 1,2 (tonreiche Substrate) und 1,5 g/cm³ (Sande) auf keinen Fall übersteigen¹³.
- Drainage des Unterbodens sicherstellen.
- Keine organische Substanz im Unterboden vergraben (wirkt als Sauerstoffsinke).
- Gefügebildende Prozesse fördern (Wurzelausbreitung, Regenwürmer).
- Verschlämmung (Splash) vermeiden und unbedeckten Boden vor Niederschlag schützen, z.B. durch Mulchschicht.

Neben den klassischen Gastransportparametern in Böden wie Luftkapazität, Luftleitfähigkeit oder Gasdiffusionskoeffizienten hat sich die CO₂-Konzentration in der Bodenluft während der Vegetationszeit als aussagekräftiges, für das Bodenprofil integrierendes und relativ leicht erfassbares Maß erwiesen (SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND 1998, GAERTIG 2002). Es hat sich gezeigt, dass CO₂-Konzentrationen von mehr als 1 - 2 Vol-% nur bei starker Einschränkung der Gastransportfähigkeit, von mehr als 5 % nur bei dominierender Anaerobie auftreten (SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND 1998).

Methoden

Tiefenprofile mit Mittelwerten der Trockenraumdichte sind in Abbildung 4-14 dargestellt. Aus der Trockenraumdichte kann nach folgender Formel die Porosität berechnet werden (HARTGE & HORN 1992):

$$\text{Porosität} = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Total}}} = \frac{D_{\text{B}}}{D_{\text{Festsubstanz}}}$$

Darin ist V das Volumen mit den Indizes „Poren“ für Porenraum, „Total“ für das Gesamtvolumen, D_B die Trockenraumdichte und D_{Festsubstanz} die Dichte der festen Bestandteile. Aufgrund des Humusgehaltes von unter 1% kann als Dichte der Festsubstanz 2,65 g/cm³ eingesetzt werden.

Aufgrund der gleichen Primärporosität, die sich aus der Homogenität des Schüttmaterials ergibt, können die Unterschiede in der Porosität fast ausschließlich dem für die Belüftung entscheidenden Makroporenraum zugeordnet werden. Daher ist ein Porositätsunterschied von fast 10 Prozentpunkten (Tabelle 4-4) als sehr erheblich anzusehen (vergleiche dazu die pF-Feuchte-Charakteristik, Abbildung 4-20).

¹³ Dies entspricht einer mittleren effektiven Lagerungsdichte Ld3 nach AG BODEN (1994).

Tabelle 4-4: Mittlere Trockenraumdichten nach Einbau der Rekultivierungsschicht und Porosität der Substrate in den beiden Testfeldern U und K

Variante	Tiefenstufe [cm]		D_B [g/cm ³]	Porosität [Vol-%]
K = Kontrolle	1	25	1,55	41,5
	2	50	1,60	39,6
	3	85	1,59	40,0
	4	135	1,63	38,5
U = unverdichtet	1	25	1,51	43,0
	2	50	1,44	45,7
	3	85	1,55	41,5
	4	135	1,39	47,5

Seit Frühjahr 2001 sind die Versuchsfelder außer mit Tensiometern, TDR-Sonden und Temperatursensoren für die Bodentemperatur auch mit Sammeleinrichtungen für Bodenluft in 4 Tiefenstufen instrumentiert (Tabelle 4-5). Die Bodengassammlung erfolgt konvektionsfrei durch Diffusion. Dieses Sammelprinzip erlaubt auch die Gewinnung von Gasproben in dichten Böden bei hoher Bodenfeuchte. Der Aufbau der Messröhren und das Messprinzip sind bei SCHACK-KIRCHNER et al. (1993) beschrieben. Die Ampullen mit Bodengleichgewichtsatmosphäre wurden im Labor gaschromatografisch auf CO₂ untersucht¹⁴. Die Gassammlung erfolgte mit dem in Tabelle 4-5 gezeigten Design.

Tabelle 4-5: Bodengas-Probenahmestellen in den Lysimeterfeldern in Leonberg

Variante	Tiefe [cm]	Anzahl Gaslysimeter
K = Kontrolle	25	2
	50	2
	85	2
	135	1
U = unverdichtet	25	2
	50	2
	85	2
	135	1

¹⁴ Messausrüstung: Chrompack CP2002 Mikro-GC mit Haye-Sep-A Säule und Wärmeleitfähigkeitsdetektor; Bei Abweichung zwischen den Wiederholungsmessungen von mehr als Faktor 1,1 bzw. bei Absolutabweichungen > 0,1% Vol-% CO₂ erfolgte eine weitere Kontrollmessung.

Die Gassammelfläschchen wurden frühestens nach 14 Tagen gewechselt. Durch diesen zeitlichen Abstand ist sichergestellt, dass auch bei sehr gasundurchlässigen Böden die Atmosphäre im Fläschchen einer Bodengleichgewichtsatmosphäre entspricht. Es konnte daher auf die Helium-Spülung der Gassammelgefäße verzichtet werden.

Die an den ersten 3 Terminen gemessenen Konzentrationen zeigten im Laufe der Messreihe eine drastische, durch ökologische Zusammenhänge nicht plausibel zu erklärende negative Abweichung von den Messungen der Folgezeit, sodass eine gemeinsame Auswertung nicht sinnvoll ist. Ursache der Abweichung ist mit großer Wahrscheinlichkeit ein unsachgemäßes Verschließen der Bördekkappen der Gasampullen mit der Folge, dass Fehlluft eindringen konnte und die Bodenatmosphäre verdünnte. Die Auswertungen im Folgenden beziehen sich daher nur auf den Zeitraum Mai 2001 bis März 2002 (9 Sammeltermine).

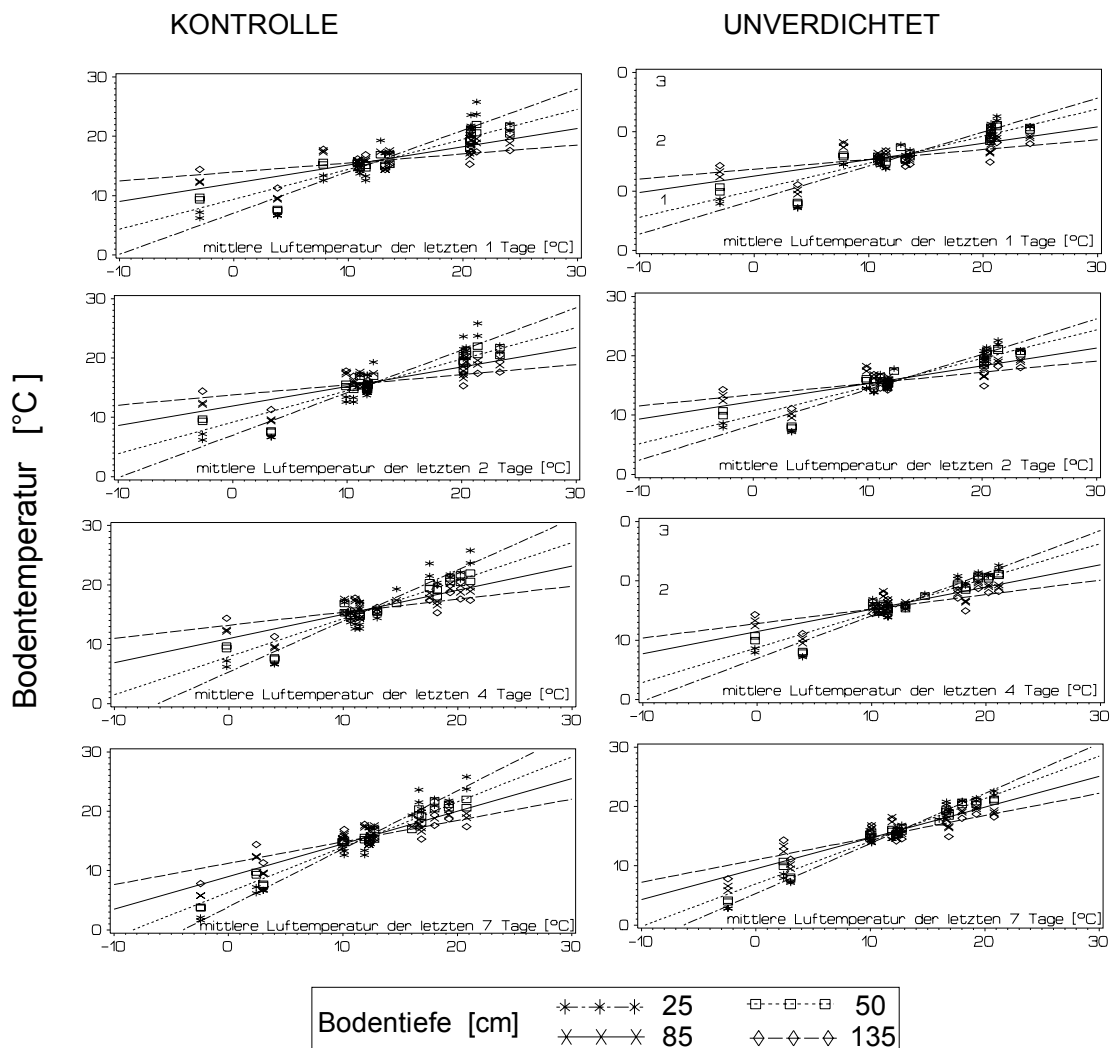


Abbildung 4-19: Abhängigkeit der Bodentemperatur von der mittleren Lufttemperatur der vergangenen Tage

Zur Darstellung des Einflusses von Bodenfeuchte und -temperatur auf die Gaskonzentration sind wir mit zwei Schwierigkeiten konfrontiert: Die Gasmessungen integrieren über einen Zeitraum von 72 Stunden und mehr, Bodenfeuchte, -temperatur und -wasserspannungsmessungen sind Punktmessungen, die darüber hinaus nicht in allen Fällen mit den Gassammelterminen synchronisiert sind. Daher erschien es empfehlenswert, die mit höherer zeitlicher Auflösung erfassten Größen Lufttemperatur und Niederschlag integrierte Größen zu berechnen. In Abbildung 4-19 ist die Abhängigkeit der Bodentemperatur (punktförmige Messung) mit der mittleren Lufttemperatur der vorher gehenden Tage für Zeiträume von 1 bis 7 Tagen dargestellt. Man erkennt die relativ enge Beziehung und die typische Abnahme der Sensitivität der Bodentemperatur gegenüber der Lufttemperatur mit zunehmender Tiefe, d.h. je tiefer im Boden, desto flacher die Regressionslinie. Wir verwenden bei den folgenden Auswertungen die mittlere Temperatur der letzten 4 Tage als relatives Schätzmaß für die Bodentemperatur¹⁵.

Problematischer gestaltet sich die Schätzung der Wasserversorgung aus den Globalvariablen, da die Niederschlagsmenge in Abhängigkeit von der Witterung, der Jahreszeit und der Vorgeschichte (ausgetrockneter bzw. bereits gesättigter Boden) unterschiedlich auf den Sättigungsgrad des Bodens wirkt. Daher wird beim Vergleich der Bodenwasserparameter auf die einzelnen Punktmessungen zurückgegriffen. Alternativ könnte mit Hilfe eines Speichermodells aus den Niederschlagsdaten und Bodenparametern eine lückenlose Zeitreihe der Bodenfeuchte berechnet werden.

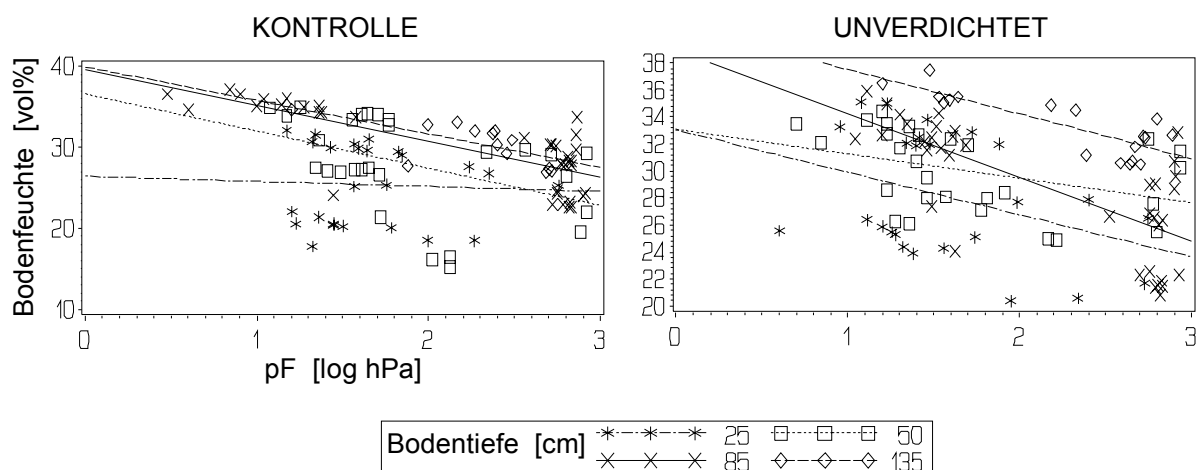


Abbildung 4-20: Feld-pF-Kurven als lineare Beziehung zwischen Bodenfeuchte (TDR-Messung) und Wasserspannung (Tensiometrie)

¹⁵ Eine Schätzung der tiefenspezifischen Bodentemperatur könnte relativ zuverlässig mit linearen Regressionen erfolgen, für die hier vorliegende Auswertung reicht aber das Relativmaß.

Im Allgemeinen ist die Bodenfeuchte, d.h. der Volumenanteil des Wassers im Boden ein Schlüsselparameter des Gashaushaltes, da sich sowohl die Gasdurchlässigkeit als auch die biologische Aktivität (letztere zusammen mit der Bodentemperatur) oft gut durch die Bodenfeuchte vorhersagen lassen (vergleiche LINN & DORAN 1984, GLINSKI & STEPNIIEWSKI 1985). Abbildung 4-20 zeigt den Zusammenhang zwischen Wasserspannung und Bodenfeuchte für die Versuchsvarianten ("Feld-pF-Kurven"). Die Beziehung ist in einigen Fällen, insbesondere im Oberboden sowie in 85 cm Tiefe auf der unverdichteten Variante, sehr wenig ausgeprägt.

Ergebnisse

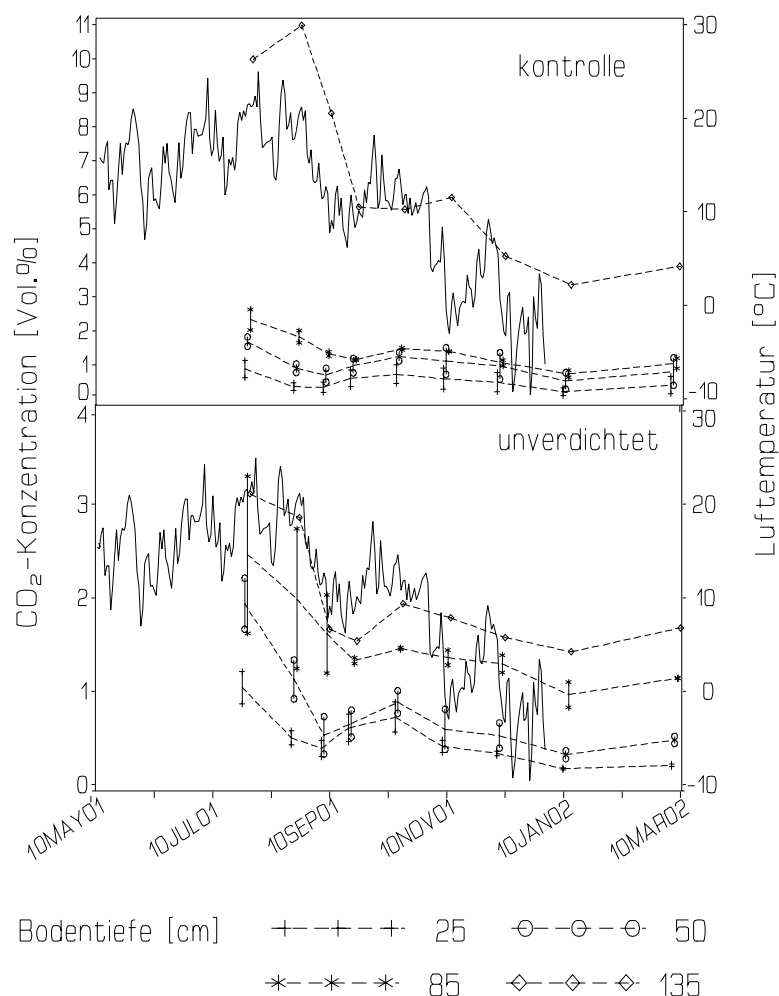


Abbildung 4-21: Zeitreihen der CO_2 -Konzentration in der Bodenluft getrennt für die Varianten. Bei den Bodentiefen mit Wiederholungsmessung symbolisiert die Verbindungslinie die Mittelwerte, die beiden Messwerte sind durch eine senkrechte Linie verbunden. (Zur Vermeidung von Informationsüberdeckung sind die die Messpunkte auf der x-Achse leicht verschoben, tatsächlich wurden die Gasproben alle am gleichen Tag gezogen!). Als durchgezogene Linie sind zur Orientierung die Lufttemperaturen dargestellt.

In Abbildung 4-21 sind die Zeitreihen der CO₂-Konzentrationen in den verschiedenen Entnahmetiefen getrennt für die Behandlungen dargestellt. Zur Orientierung ist zusätzlich die Lufttemperatur eingezeichnet. Man erkennt die grundsätzliche Abhängigkeit der CO₂-Konzentration von der Temperatur. Auf beiden Flächen ist an allen Terminen eine stetige Zunahme der CO₂-Konzentration mit der Tiefe gegeben. Dies zeigt, dass bis unter 85 cm Bodentiefe respiratorische Aktivität stattfindet.

In Abbildung 4-22 sind die Gesamtmittelwerte der Messungen dargestellt. Behandlungsunterschiede treten vor allem in der Tiefe 135 cm auf, mit deutlich höheren Werten bei der Kontrollvariante. Die beobachteten Unterschiede können jedoch in dieser Tiefe wegen fehlender Wiederholungsmessung nicht statistisch überprüft werden. Die klarste Differenzierung, jedoch mit dem Wilcoxon Test ebenfalls nicht sicherbar, zeigt die Tiefe 85 cm; hier liegen die CO₂-Werte der unverdichteten Variante an beiden Entnahmepunkten höher als bei der Kontrolle.

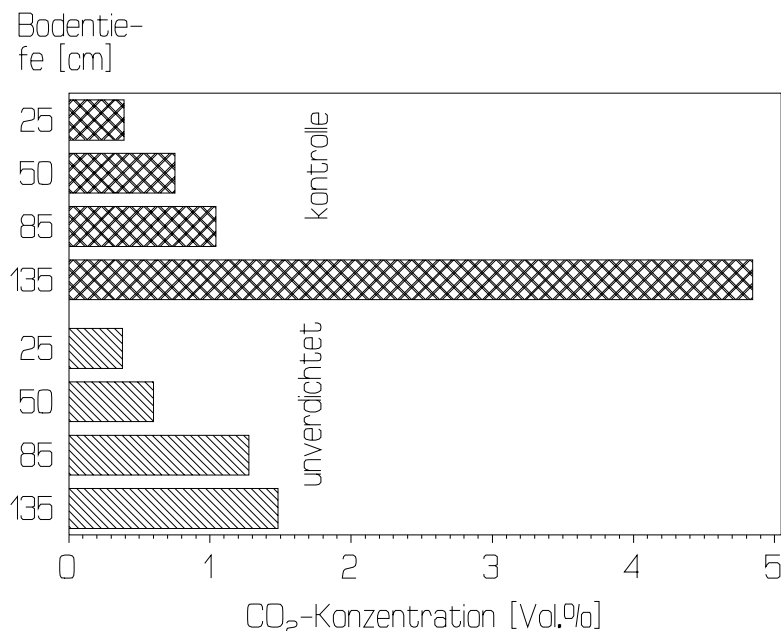


Abbildung 4-22 CO₂-Konzentration getrennt nach Variante und Bodentiefe gemittelt über Entnahmedatum und ggf. Wiederholung

Abbildung 4-23 und Tabelle 4-6 zeigen, dass die Temperaturabhängigkeit der CO₂-Konzentrationen überwiegend recht straff ist. Die Zunahme der Sensitivität mit der Tiefe erklärt sich daraus, dass bei niedrigen Temperaturen die CO₂-Konzentrationen im Profil weitgehend nivelliert sind, bei höheren Temperaturen aber die Konzentrationsunterschiede mit der Tiefe stark zunehmen.

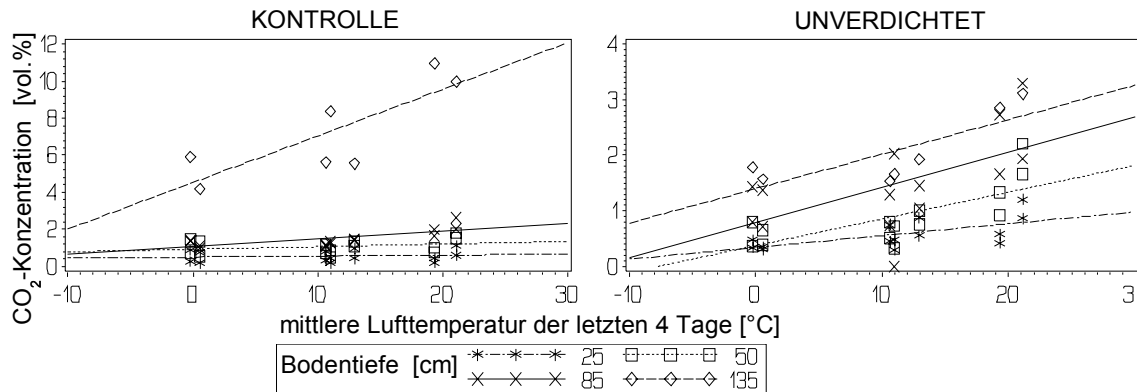


Abbildung 4-23 CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von der Temperatur
Die Linien repräsentieren lineare Regressionen der Beobachtungspaare.

Tabelle 4-6: Bestimmtheitsmaß und Signifikanzniveau der linearen Regressionen zwischen CO₂-Konzentration und mittlerer Lufttemperatur der 4 Tage vor der Gasprobenahme (vergleiche Abbildung 4-19)

Lysimeterfeld	Tiefe	r ² [%]	p>F
K = Kontrolle	25	1,9	n.s.
	50	7,8	n.s.
	85	55	< 1%
	135	66	<5%
U = Unverdichtet	25	40	<5%
	50	52	<1%
	85	34	<5%
	135	63	<5%

Bei zunehmender Austrocknung des Bodens nimmt die CO₂-Konzentration zu. Dieses Ergebnis überrascht, da mit abnehmendem Wassergehalt die Bodenbelüftung stets verbessert wird (und damit die Abfuhrgeschwindigkeit des respiratorischen CO₂) und außerdem durch hohe Wasserspannungen insbesondere die mikrobielle Aktivität gehemmt werden kann. Die Erklärung ergibt sich aus Abbildung 4-25, welche die starke Kovarianz zwischen Bodentemperatur und Bodenwasserspannung zeigt: Bei höheren Temperaturen liegen die pF-Wert fast durchweg nahe 3, bei niedrigen durchweg nahe 1. Diese typische saisonale Kopplung von Wasserverbrauch und biologischer Aktivität erschwert in vielen Studien die Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen Wassersättigung und CO₂-Produktion (z.B. SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND 1998).

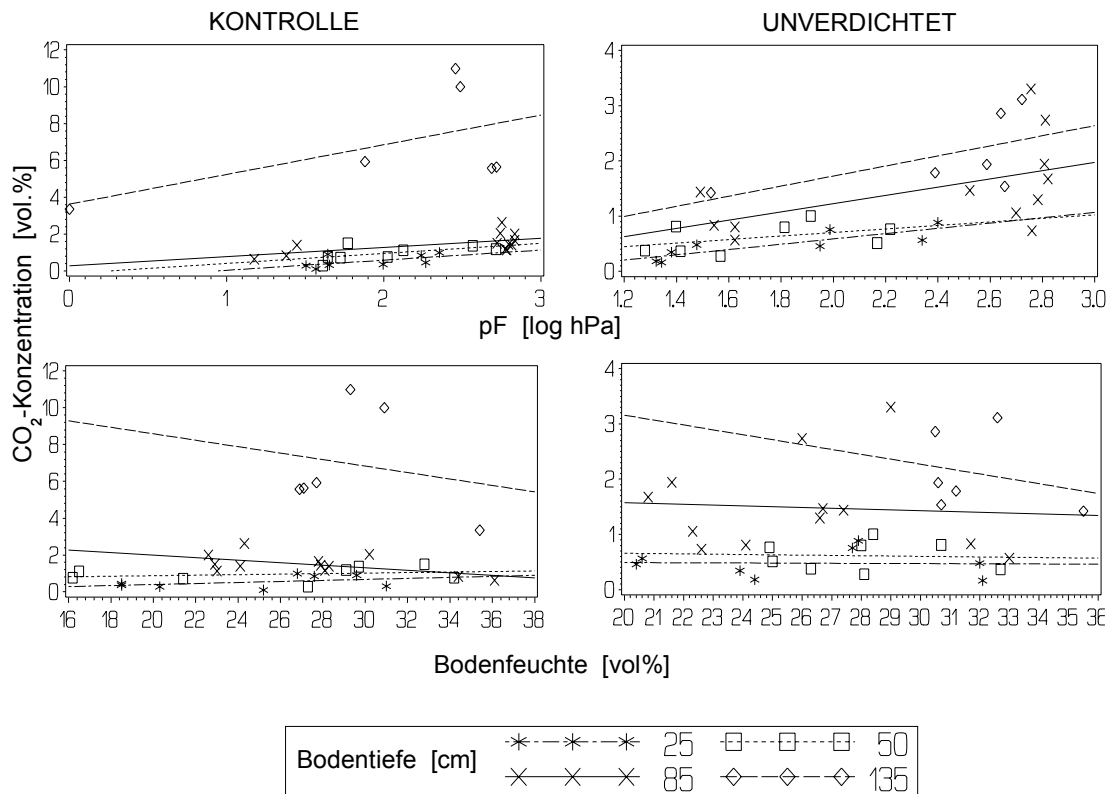


Abbildung 4-24 CO₂-Konzentration in Abhängigkeit von Parametern des Bodenwasserhaushaltes, die Linien repräsentieren lineare Regressionen der Beobachtungspaare.

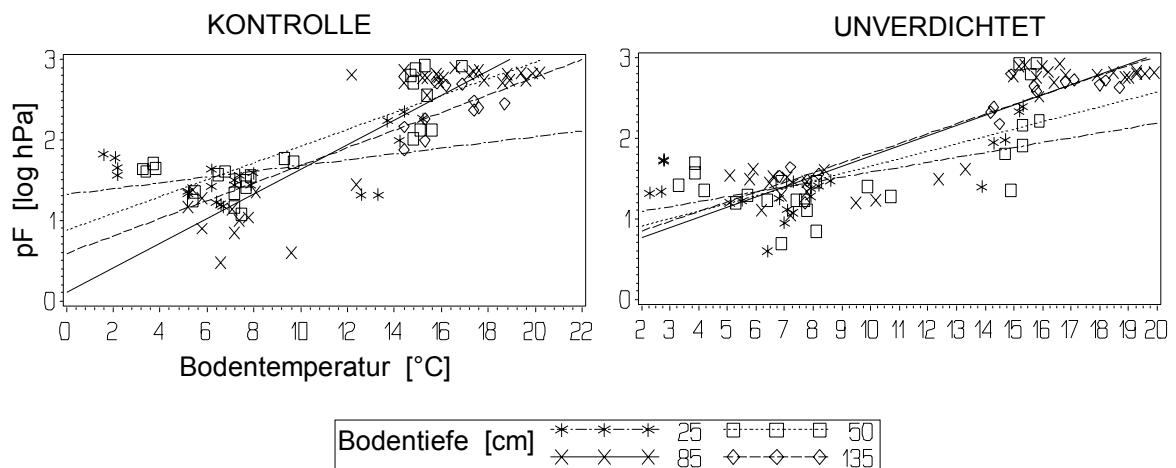


Abbildung 4-25 Zusammenhang zwischen Wasserspannung und Bodentemperatur.

Es ist möglich, anhand der CO₂-Konzentrationen den Bodengashaushalt zu charakterisieren (SCHACK-KIRCHNER & HILDEBRAND 1998). Eine ungehemmte Belüftung kann bei CO₂-Werten unter 1 - 2 Vol-% angenommen werden. Bei Werten bis 5 Vol-% ist im allgemeinen von einer Störung des Gastransportes auszugehen, jedoch ohne dominierende

anaerobe Prozesse. Liegen die CO_2 -Konzentrationen über 5 Vol-%, kann man nach Beobachtungen in Waldböden von dominierender Anaerobie ausgehen, d.h. Prozesse wie Methanproduktion (anstatt CH_4 -Verbrauch), Denitrifizierung bis zum N_2 sowie ansteigende respiratorische Quotienten (d.h. es wird mehr CO_2 freigesetzt als O_2 verbraucht) bestimmen den Gasaustausch.

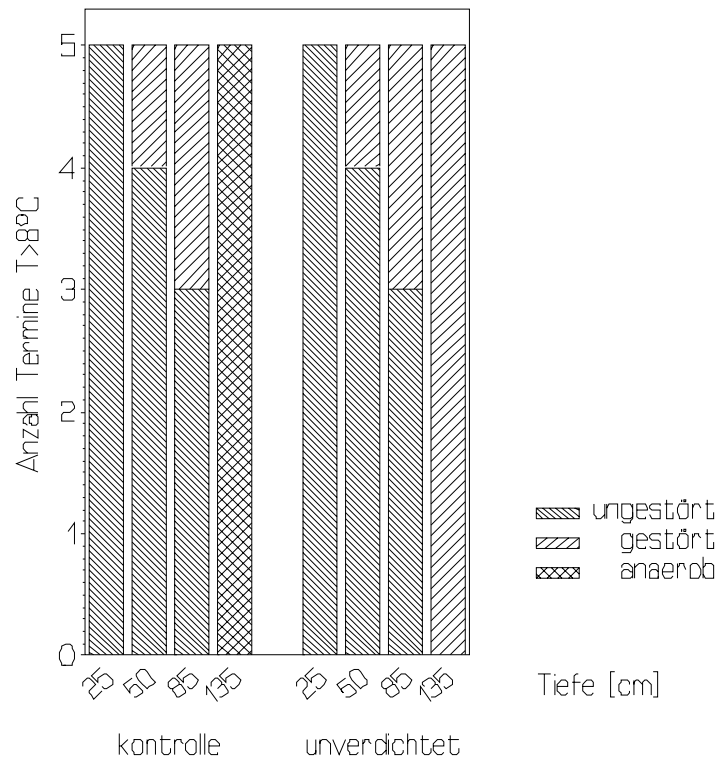


Abbildung 4-26 Zuordnung der beobachteten CO_2 -Konzentrationen zu den Klassen "ungestörte Belüftung", "gestörte Belüftung" und "Anaerobie". Berücksichtigt wurden nur die Termine mit mittleren Lufttemperaturen über 8°C , da die CO_2 -Konzentration nur bei ausreichender Wärme einen entsprechenden Indikatorwert besitzt.

Diskussion

Die evapotranspirative Abdichtungswirkung einer Rekultivierungsschicht ist sehr eng mit der Bodenfunktion als Wurzelraum verbunden; je tiefer der Bodenraum durchwurzelbar ist, desto besser die Wirkung. Weiterhin gilt: je besser die Bodenbelüftung, desto tiefer ist ein Boden durchwurzelbar.

Die Ergebnisse zur Bodenbelüftung zeigen, dass es beim Einbau der Rekultivierungsschicht gelungen ist, Verhältnisse zu schaffen, wie sie auch in natürlichen Waldböden anzutreffen sind. Die Abdeckungen sind bis unter 85 cm Bodentiefe belebt, denn sonst könnte kein stetiger Anstieg der CO_2 -Konzentration beobachtet werden. Das gemessene

CO₂ stammt aus respiratorischen Prozessen. Darauf deutet die enge Korrelation der Konzentration mit der Lufttemperatur und das Paradox zunehmender CO₂-Konzentration bei abnehmendem Wassergehalt hin. Die CO₂-Konzentrationen zeigen den typischen jahreszeitlichen Gang natürlicher Böden.

Ohne Kenntnis der Gasdiffusionskoeffizienten können aufgrund der CO₂-Konzentrationen keinerlei Rückschlüsse auf die tatsächlichen Respirationsraten getroffen werden. Trotz Ausbildung einer geschlossenen Vegetationsdecke ist jedoch im Oberboden bei den sehr geringen Humusgehalten im Boden (< 1 %) mit gegenüber natürlichen Waldböden deutlich reduzierten Atmungsraten (also Produktion von CO₂ pro Zeit) auszugehen. Durch den Einbau homogenen Materials bei nicht unerheblicher Strukturstörung und Durchmischung kann es dagegen im Unterboden zu gegenüber natürlichen Böden erhöhten Respirationsraten gekommen sein. Die beobachteten Konzentrationsgradienten könnten sich also nach längerer ungestörter Bodenentwicklung auf den Deponieabdeckungen noch ändern, wahrscheinlich eher in Richtung stärkerer Anreicherung im Oberboden und etwas geringerer Anreicherung im Untergrund.

Wesentliche Grundlage der folgenden Interpretationen ist die integrierende Darstellung der Belüftungsklassen. Danach kann festgestellt werden, dass bis 25 cm Tiefe die Belüftung auf beiden Varianten als ungestört angesehen werden kann. Dies ist z.B. in lössreichen, heute meist durch versauerungsbedingte geringe Bioturbation und häufige Bodenverformung geprägten natürlichen Waldböden heutzutage nicht mehr regelmäßig der Fall. In 50 und 85 cm Tiefe treten auf beiden Behandlungsvarianten in (durch die geringe Wiederholungszahl schwerlich statistisch zu sichernde) deutlicher Tendenz gestörte Belüftungsverhältnisse auf. Die freie Diffusion durch das luftgefüllte Porensystem ist so stark behindert, dass ein messbarer Anteil des CO₂ durch den wassergefüllten Porenanteil mit seiner ca. 10.000-fach schlechteren spezifischen Gasdurchlässigkeit weggeführt wird. Bei gestörter Belüftung kann im Gegensatz zu ungestörter Belüftung nur ein Bruchteil der Respirationsleistung im Boden abgewickelt werden. Tritt dieser Zustand nicht nur sporadisch auf, muss mit erheblichen Durchwurzelungsstörungen bei den meisten unserer Waldbaumarten gerechnet werden (GAERTIG et al. 2002, EPPINGER et al. 2002).

Auf der lagenweise verdichteten Variante wird der Unterboden in 135 cm als durchweg als "anaerob" klassifiziert. Dieser Zustand tritt auf bei nahezu vollständiger Wassersättigung. Es wird CO₂ freigesetzt ohne äquivalenten O₂-Verbrauch (Gärung); oxidierte Eisen-, Mangan- und Schwefelverbindungen werden als Elektronenakzeptoren verwendet. Bei diesem Prozess wird Eisen und Mangan mobilisiert. Wurzelerschließung ist beschränkt auf spezialisierte Pflanzen wie Schilf (*Phragmites communis*) oder Schwarzerle (*Alnus glutinosa*), die den für die Wurzelatmung erforderlichen Sauerstoff durch das Aerenchym transportieren und z.T. die unmittelbare Wurzelumgebung aufoxidieren können. Dieser Zustand ist typisch für Gr-Horizonte von Gleyen, für den Sd-Horizont von Pseudogleyen im Frühjahr und für stark verdichtete Oberböden, die bei entsprechendem organischen Anteil einen deutlich wahrnehmbaren Schwefelwasserstoffgeruch emittieren.

Im Allgemeinen geht man davon aus, dass der Hauptwurzelraum bei 100 cm Bodentiefe endet. Dies findet auch Niederschlag in den üblichen standortkundlichen Verfahren zur Berechnung der nutzbaren Wasserspeicherkapazität. So zeigen POLOMSKI & KUHN (1998) für Kiefern auf „übermäßig“ drainierten sandigen Böden in verschiedenen Gebieten Europas bereits in 80 cm Tiefe einen Rückgang der Feinwurzel-dichte auf kaum mehr messbare Werte. Andererseits findet man auf Sandböden, auf Rendzinen u.ä. immer wieder einzelne Grobwurzelstränge, die in tiefere Bereiche reichen und dort sicherlich zur Wasseraufnahme befähigt sind. Betrachtet man daher die Bodenbelüftung aus der „standortkundlichen Sicht“, unterscheiden sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Einbauvarianten nicht. Die Bedeutung des tieferen Unterbodens verringert sich darüber hinaus bereits dadurch, dass schon unterhalb von 25 bis 50 cm Tiefe sichtbare Belüftungseinschränkungen auftreten die eine Tiefendurchwurzelung anspruchsvollerer Arten ohnehin erschweren. Ob und wie stark die sporadische Tiefendurchwurzelung durch Unterbodenverdichtung verhindert wird und welche Bedeutung diese Tiefendurchwurzelung für die Wasseraufnahme besitzt, ist schwer quantifizierbar. Eine positiver Zusammenhang ist aber sehr plausibel. Daher ist (wenn die Tiefendurchwurzelung bis zur Dichtschicht überhaupt erwünscht ist) das unverdichtete Einbauverfahren zu bevorzugen.

Resümee (4.4):

Mit Hilfe der CO₂-Konzentrationen der Bodenluft kann der Bodengashaushalt charakterisiert werden. In den Versuchsfeldern wurden beim Einbau der Rekultivierungsschichten Bedingungen geschaffen, die natürlichen Waldböden entsprechen.

In beiden Lysimeterfeldern ist nur Belüftung der Oberböden (bis 25 cm Tiefe) als ungestört anzusehen, in größerer Tiefe (> 50 cm) ist die Belüftung durchgehend gestört, d.h. der Gasaustausch ist reduziert. Nur in Feld K herrschen jedoch bei nahezu vollständiger Wassersättigung des Unterbodens in 135 cm Tiefe ständig anaerobe Bedingungen, d.h. ausgeprägter Sauerstoffmangel. Die Tiefendurchwurzelung wird hierdurch massiv behindert. Im U-Feld ist dies nicht der Fall.

Für die meisten Pflanzen wird dies jedoch keine Rolle spielen, denn aufgrund der günstigen Bodeneigenschaften der Rekultivierungsschichten kann der Wasser- und Nährstoffbedarf in der Regel aus geringerer Bodentiefe gedeckt werden.

4.5 Bodenwasserhaushalt und Bodentemperatur

(P. WATTENDORF, O. EHRMANN)

Die Betrachtung des Bodenwasserhaushaltes der Lysimeterfelder umfasst den Zeitraum vom Einbau der ersten Messeinrichtungen im April 2001 bis zum Ende der Projektlaufzeit im März 2002. Sie beinhaltet die Darstellung und Auswertung

1. der Veränderungen von Bodenwassergehalt [in Vol-%] und Bodenwasserspannung [in hPa oder als pF-Wert] sowie
2. der Abflussraten (Absickerung und Oberflächenabfluss) aus den Lysimeterfeldern

in Abhängigkeit von Jahreszeit und Witterungsverlauf im Betrachtungszeitraum.

4.5.1 Bodenwassergehalt und Bodenwasserspannung

Der Bodenwassergehalt in den Versuchsfeldern wird mit der TDR-Methode (*Time Domain Reflectometry*) mit einem Messgerätesystem TRASE Model 6050X1¹⁶ gemessen. Das System besteht aus fest im Boden installierbaren Messfühlern, die mit einer Steckverbindung an der Bodenoberfläche mit dem Messgerät verbunden und abgelesen werden können. Die Messfühler (Dreistabsonden) besitzen 20 cm lange Edelstahl-Wellenleiter. Die Messung erfasst vorrangig einen ringförmig um den zentralen Wellenleiter angeordneten Bereich von ca. 13 mm Durchmesser (v. WILPERT et al. 1998). Bei einer Länge von 200 mm ergibt sich ein Bodenvolumen von nur 26 cm³. Die Messgenauigkeit hängt somit entscheidend vom guten Kontakt zwischen Wellenleiter und umgebenden Boden ab. Bodenverdichtungen durch das Einstechen der Sonden, aber auch die Bildung von Luftspalten beim Austrocknen des Bodens führen zu Ungenauigkeiten. Laut Herstellerangaben (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. 1996) beträgt die Messgenauigkeit ± 2 Vol-%. Während unter Optimalbedingungen Messgenauigkeiten von ca. 1 % erreicht werden, stellten v. WILPERT et al. (1998) bei in-situ-Messungen in steinigem Böden Abweichungen von bis zu 14 Vol-% fest. Die Wellenleiter in Leonberg wurden bei ausreichender Bodenfeuchte in das plastische, weitgehend steinfreie Substrat horizontal in Profilwände eingeschoben, sodass größere Messfehler nicht zu erwarten sind. Lediglich im Oberboden kann es durch Austrocknung zur Spaltenbildung im Umfeld der Wellenleiter kommen.

Der mit dem TDR-Verfahren gemessene volumetrische Wassergehalt kann nur indirekt den aktuellen Zustand der Wasserverfügbarkeit abbilden, da gleiche Wassergehalte in unterschiedlichen Böden abhängig von Bodenart, Lagerungsdichte und Gefüge unter-

¹⁶ Hersteller: Soilmoisture Equipment Corp., Goleta (USA)

schiedlich fest gebunden sind. Tensiometer messen im Gegensatz hierzu direkt die kapillare Anbindung des Wassers an den Boden, die sogenannte Saugspannung oder das Matrixpotential [in cm Wassersäule, mbar oder hPa], die als Summe der Bindungskräfte zwischen Boden und Wasser verstanden werden können. Die Saugspannung muss aktiv von der Pflanzenwurzel überwunden werden, um einem Boden Wasser zu entziehen.

Zusätzlich zu den TDR-Messfühlern wurden deshalb in den Testfeldern konventionelle Einstichtensiometer in den gleichen Bodentiefenstufen eingebaut. Diese Tensiometer bestehen im Wesentlichen aus einer oben verschlossenen wassergefüllten Röhre mit einem porösen Keramikkörper in der Messtiefe, der mit dem Bodenwasser in kapillarer Verbindung steht. Je nach Bodenwassergehalt entzieht der Boden dem Tensiometer mit unterschiedlicher Saugkraft Wasser. Im oberen Teil der Röhre baut sich ein Unterdruck auf, der mit einem Manometer abgelesen werden kann. Der Messbereich der Tensiometer reicht von 0 hPa bis ca. 850 hPa Wasserspannung (HARTGE & HORN 1999).

Die Kombination der Messwerte von Wasserspannung und Wassergehalt erlaubt die Berechnung von Wasserspannungskurven für einen konkreten Boden. Hieraus lassen sich die wichtigsten Zustände des Bodenwasserhaushaltes ableiten, die konventionell an bestimmte Wasserspannungen gekoppelt sind:

1. Die **Feldkapazität** (Wasserspeicherkapazität) bezeichnet den Wassergehalt, der vom Boden über längere Zeit gegen die Schwerkrafteinwirkung festgehalten werden kann. Sie ist auf 60 hPa (pF 1,8) festgelegt¹⁷.
2. Der **permanente Welkepunkt** (PWP) bei 15.000 hPa (pF 4,2) markiert die obere Grenze der Wasserverfügbarkeit. Allgemein können Pflanzen größere Saugspannungen nicht überwinden, d.h. das in diesem Zustand noch im Boden vorhandene Wasser („Totwasser“) kann nicht mehr von den Pflanzen aufgenommen werden.
3. Die **nutzbare Feldkapazität** (nutzbare Wasserspeicherkapazität) ist als Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt definiert. Sie bezeichnet den Wasserspannungsbereich bzw. Wassergehalt, den die Pflanzen für ihre Versorgung zu nutzen vermögen.

Die Lage und Anordnung der TDR-Messfühler und Tensiometer ist in Kapitel 2.3.1 (siehe auch Abbildung 2-3) dargestellt.

¹⁷ In den USA wird als Field Capacity der Wassergehalt bei 330 hPa (pF 2,5) verstanden.

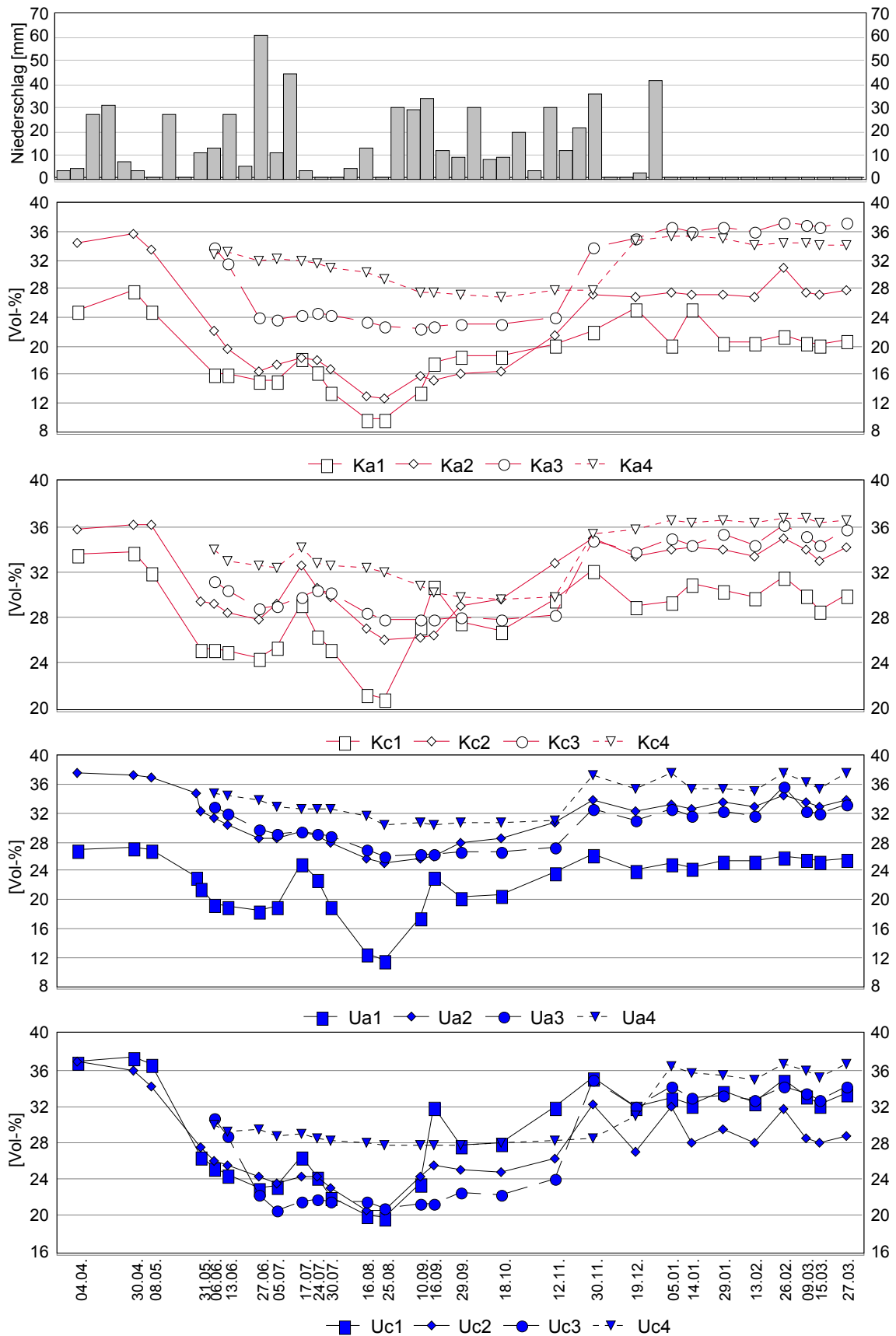


Abbildung 4-27: Bodenwassergehalte [Vol-%] in den Lysimeterfeldern, Messstellen Ua/Ka und Uc/Kc; Tiefenstufen: 1 = 25 cm, 2 = 50 cm, 3 = 85 cm, 4 = 135 cm

In Abbildung 4-27 und Abbildung 4-28 sind die Ganglinien der Bodenwassergehalte und Bodenwasserspannung seit Beginn der Messungen im April 2001 dargestellt. In beiden Lysimeterfeldern ist an allen Messstellen ein jahreszeitlich bedingter grundsätzlich ähnlicher Kurvenverlauf der Wassergehalte festzustellen:

- Zu Beginn der Messreihe bis ca. Mitte Mai sind überwiegend hohe Wassergehalte im Bereich der Feldkapazität (um 35 Vol-%) zu verzeichnen,
- danach nehmen die Wassergehalte ab und erreichen ihr Minimum im August.
- Mit dem Nachlassen der Evapotranspiration bei anhaltenden gleichmäßigen Herbstniederschlägen steigen ab Ende Oktober die Wassergehalte rasch an,
- so dass bis Ende November Werte um die Feldkapazität (Wasserspeicherkapazität) erreicht bzw. überschritten und bis im März beibehalten werden.

Die Niederschlagsverteilung am Standort Leonberg ist im langjährigen Mittel durch einen relativ hohen Anteil von Sommerniederschlägen gekennzeichnet (siehe 4.9.1). Dies trifft auch auf den betrachteten Zeitraum im Jahr 2001 zu. Selbst im Sommer wurde der Bodenwasserspeicher durch regelmäßige starke Niederschlagsereignisse (vergleiche auch Abbildung 4-32) immer wieder aufgefüllt, z.B. am 27.6. (59 mm), danach am 14./15.7. (38 mm). Die längste Trockenphase des Sommers 2001 war in der Zeit vom 17.7. bis 18.8. mit insgesamt 6,1 mm Niederschlag zu verzeichnen. Die Austrocknung der Oberböden (25 cm Tiefe) erreichte deshalb nur an den Messstellen Ka1, Kd1 und Ud1 in der Zeit von Ende Mai bis Mitte September Wassergehalte unter dem Permanenten Welkepunkt (PWP) von ca. 19 Vol-% (nach AG BODEN 1994). In 50 cm Tiefe wurde der PWP nur noch an Messstelle Ka2 unterschritten, hier allerdings durchgehend von Mitte Juni bis Ende Oktober. Hier liegt die Vermutung nahe, dass der Messfühler durch die Bildung eines Schrumpfrisses zu niedrige Wassergehalte ermittelte. In den tiefer gelegenen Messstellen sinken die Wassergehalte im Jahr 2001 zu keiner Zeit unter 20 Vol-% (Tiefenstufe 3 - 85 cm) bzw. 26 Vol-% (Tiefenstufe 4 - 135 cm).

Oberböden

Naturgemäß belegen die Oberbodenmessstellen, vor allem der Tiefe 25 cm (Tiefenstufe 1) die schnellste und stärkste Austrocknung. Die Kurven weisen auch größere Amplituden, d.h. Wassergehaltsunterschiede zwischen zwei Messterminen und die deutlichsten Unterschiede zwischen den Messstellen auf. Die Wassergehalte im Oberboden schwanken absolut zwischen 6 Vol-% (Kd1, 16.08.) und 37 Vol-% (Uc1, 30.04.). Allerdings trocknet der Oberboden nur an einem Teil der Messstellen (Ua1, Ka1, Kb1 und Kd1) in der Zeit von Anfang Juni bis Anfang/Mitte September auf Wassergehalte unter 20 Vol-% aus und erreicht damit den permanenten Welkepunkt (PWP). Bei Wassergehalten unter PWP können Pflanzen theoretisch kein Wasser mehr aus dem Boden aufnehmen. Ihre Wasserversorgung ist jedoch bereits bei Bodenwassergehalten von ca. 50 % der Feldkapazität eingeschränkt.

Unterböden

In beiden Lysimeterfeldern trocknen die Substrate in Tiefenstufe 3 (85 cm) während des Sommers deutlich weiter aus als in 135 cm Tiefe. Der Wasserentzug im Oberboden verursacht einen Feuchtgradienten, der als treibende Kraft für den kapillaren Aufstieg fungiert. Weiterhin entnehmen zumindest einzelne Wurzeln Bodenwasser direkt aus dieser Tiefe (siehe 4.7.3). Die Differenz der Wassergehalte zwischen den beiden Tiefenstufen beträgt meist ca. 5 - 6 Vol.%. Ungefähr ab Mitte November wird der Bodenwasserspeicher wieder aufgefüllt und die Unterschiede zwischen den beiden Tiefenstufen werden geringer, weil die Transpiration und damit der Entzug durch die Pflanzenwurzeln nachlässt. Charakteristischerweise sind die Ganglinien der Tiefenstufe 135 cm stark gedämpft, die Wassergehalte in dieser Tiefe werden nicht mehr von Einzelereignissen, sondern nur noch von länger andauernden Witterungsbedingungen beeinflusst.

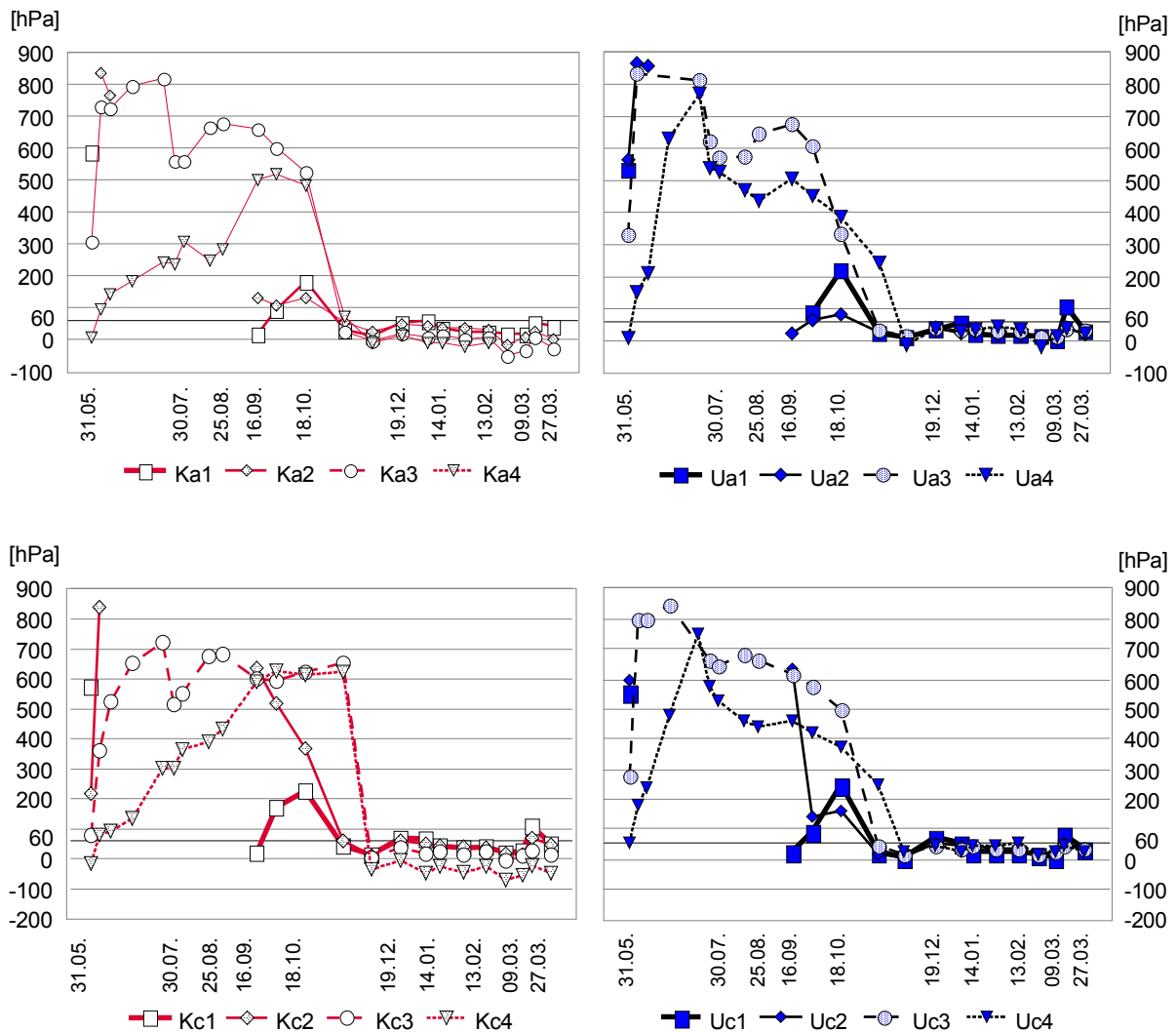


Abbildung 4-28: Bodenwasserspannung [hPa] in den Lysimeterfeldern, Messstellen Ua/Ka und Uc/Kc; Tiefenstufen: 1 = 25 cm, 2 = 50 cm, 3 = 85 cm, 4 = 135 cm

Im November 2001 stiegen die Wassergehalte deutlich an; mit Werten im K-Feld zwischen 34 - 38 Vol-% und im U-Feld 32 - 38 Vol-% wurde die Feldkapazität (60 hPa, siehe Abbildung 4-28) erreicht und überschritten. Trotzdem waren in diesem Monat ähnlich geringe Absickerungsraten aus den Lysimeterfeldern wie in den Vormonaten zu verzeichnen (siehe 4.5.3). Es ist anzunehmen, dass erst am 29. Dezember auch der Boden unterhalb 135 cm Tiefe vollständig aufgesättigt war, denn zu diesem Zeitpunkt stiegen die Abflüsse aus den Lysimeterfeldern schlagartig auf das Zehnfache an (siehe Abbildung 4-32).

Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern

Insgesamt sind die Ganglinien der Wassergehalte und Wasserspannungen der beiden Lysimeterfelder sehr ähnlich. Unterschiede zwischen den Messstellen treten meist deutlicher zutage als Unterschiede zwischen den beiden Varianten. Beide Lysimeterfelder bestehen aus Boden mit äusserst hoher nutzbarer Wasserspeicherkapazität. Deshalb fallen die bisherigen - im Hinblick auf den Wasserhaushalt eher geringen - Unterschiede im Vegetationsaufbau und in der Durchwurzelung (siehe 4.7) nicht ins Gewicht. So fehlen beispielsweise entwickelte Bäume mit tiefreichendem Wurzelsystem und - zusätzlich zur Gras-/Krautschicht - hoher Verdunstungsleistung.

Ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Bodeneigenschaften wird jedoch aus den Wasserspannungskurven der Abbildung 4-28 deutlich: An beiden Messstellen des K-Feldes zeigen die Tensiometer in 135 cm Tiefe und bei Messstelle Ka auch in 85 cm Tiefe im Winter 2001/02 Wasserspannungen < 0 hPa an. Ein negatives Matrixpotential signalisiert, dass auf das Tensiometer ein Druck einwirkt, der durch eine über der Mess-tiefe aufgebaute Wassersäule entsteht. Diese negativen Wasserspannungen legen somit den Schluss nahe, dass sich im Testfeld K während Zeiten hoher Wassersättigung bzw. geringen Wasserverbrauchs Stauwasser auf den verdichteten Lagen ausbilden kann.

4.5.2 Bodentemperatur

In jedem Lysimeterfeld wurden zwei Messpunkte mit eingrabbaren Thermosensoren in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe ausgestattet (vergleiche 2.3.1). Es zeigt sich, dass Unterschiede im Wasserhaushalt der beiden Testfelder auch durch den Temperaturverlauf dokumentiert werden können.

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen seit Juni 2001 zeigen sehr ähnlich verlaufende Temperaturganglinien mit folgenden Merkmalen:

- Die Maximum-Temperaturen wurden jeweils im Juni, die Minimum-Temperaturen im Januar registriert. Die Temperaturextreme wurden jeweils nahe der Bodenoberfläche gemessen, die Kurven der Messungen in 25 cm Tiefe weisen die größte Amplitude auf.
- Es wurden zu keinem Zeitpunkt Minustemperaturen gemessen.

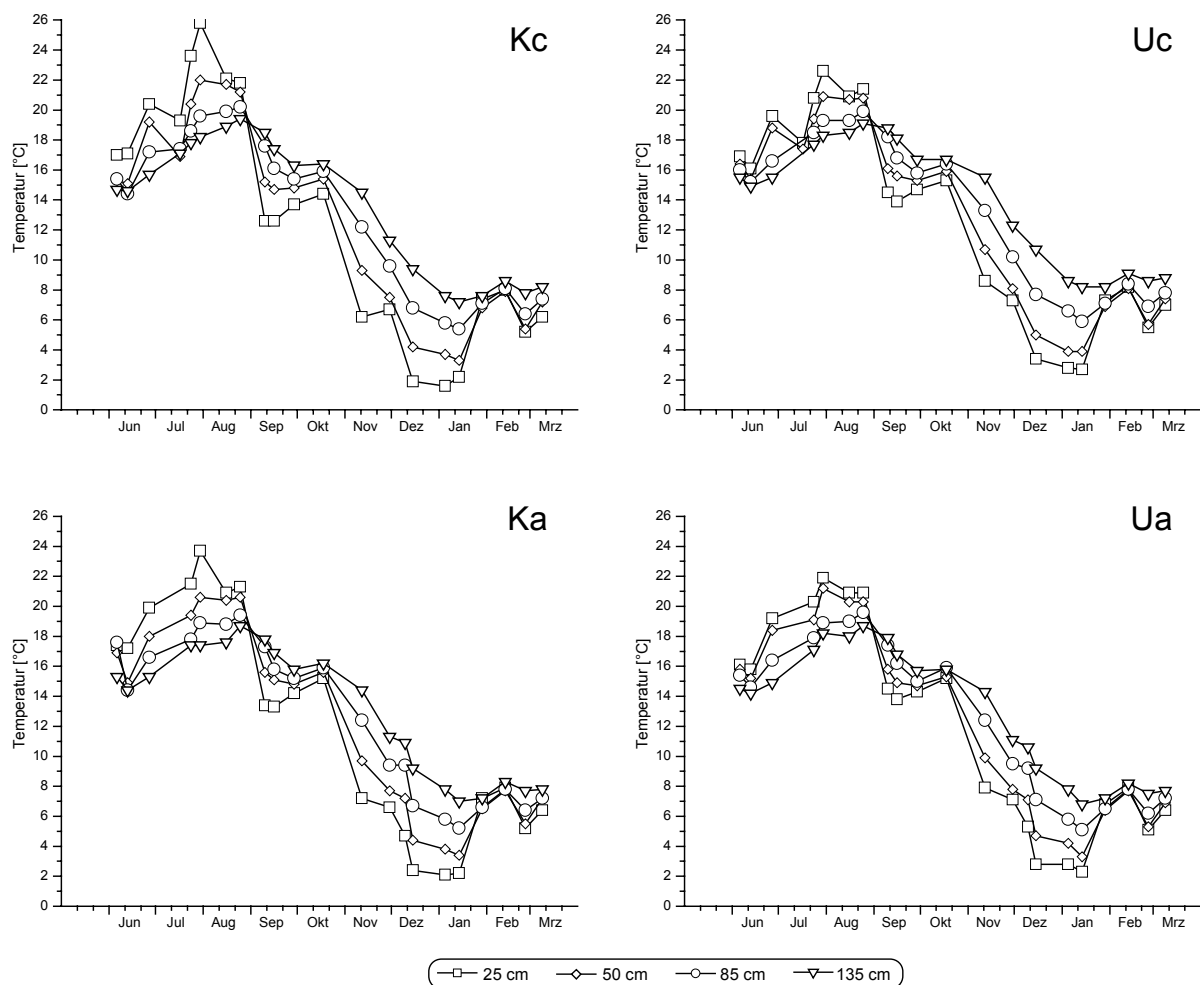


Abbildung 4-29: Temperaturverlauf in den Lysimeterfeldern von Juni 2001 bis März 2002; zur Lage der Messpunkte siehe Abbildung 2-3

Im Vergleich zu einer Messstelle der Universität Hohenheim (18 km südöstlich von Leonberg, 100 Höhenmeter tiefer gelegen) sind die Bodentemperaturen in den Lysimeterfeldern auf der Deponie Leonberg etwas niedriger (Tabelle 4-7); dies erklärt sich durch den Höhenunterschied. Eine deutliche Erwärmung des Bodens aufgrund der Umsetzungsprozesse im Müllkörper war somit nicht festzustellen.

Tabelle 4-7: Vergleich der Bodentemperatur von Leonberg und Hohenheim

	Ø Lysimeterfelder [500 m ü NN]*				Hohenheim [400 m ü NN]		
Tiefe [cm]	25	55	85	135	20	50	100
Temperatur [°C]*	12,3	12,5	12,9	13,4	13,7	13,5	13,7
* Durchschnitt der Messtage von Juni – Dezember 2002							

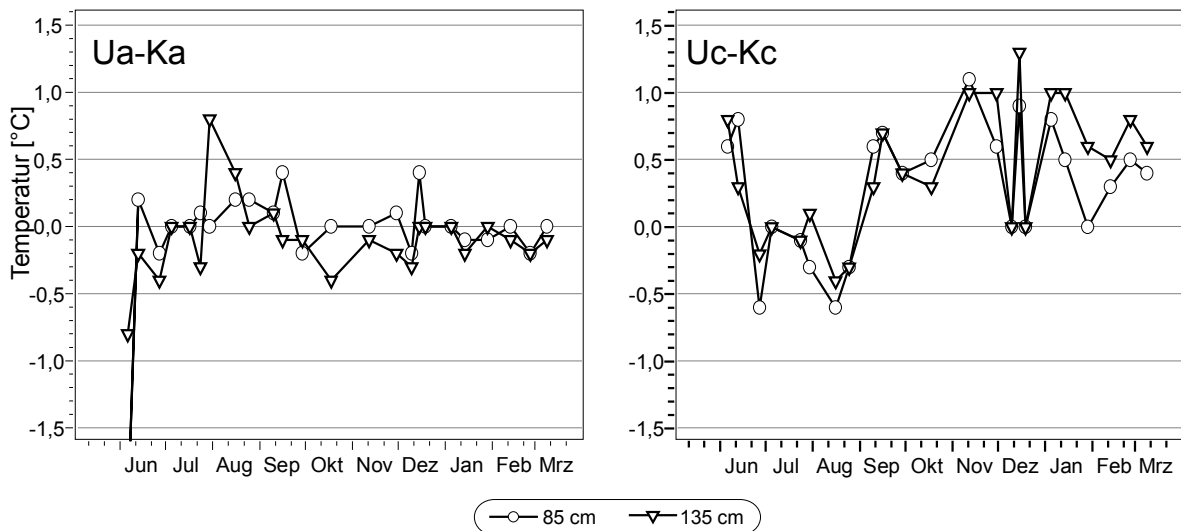


Abbildung 4-30: Temperaturdifferenz zwischen U- und K-Feld

Um Unterschiede zwischen den Messstellen deutlicher hervorzuheben, können Ganglinien der Temperaturdifferenzen herangezogen werden. In Abbildung 4-30 sind die Temperaturdifferenzen der Unterböden zwischen den Messstellenpaaren der beiden Lysimeterfelder aufgetragen. Es zeigen sich folgende Tendenzen:

- Am Oberhang (Messstellenpaar Kc/Uc) ist es im Sommer im K-Feld wärmer, im Winter im U-Feld.
- An den Messstellen Ka und Ua im unteren Hangbereich ist die Tendenz nicht eindeutig: im Sommer ist es im U-Feld geringfügig wärmer, im Winter dagegen ist es im K-Feld etwas wärmer.

Ursachen hierfür könnten entweder eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit in den Testfeldern sein, indem sich das weniger dichte Substrat im U-Feld langsamer erwärmt, aber auch langsamer abkühlt oder ein anderes Fließverhalten des Niederschlagswassers sein.

Wenn nur die erste Ursache zuträfe, müssten beide Messstellen gleichsinnig reagieren. Da dies nicht zutrifft, ist anzunehmen, dass im K-Feld durch lateralen Wassertransport die Wärmebilanz der Unterböden verändert wird: Bodenwasser fließt vom oberen Böschungsschnitt auf den verdichteten Horizonten vorbei an Messpunkt Ka nach unten.

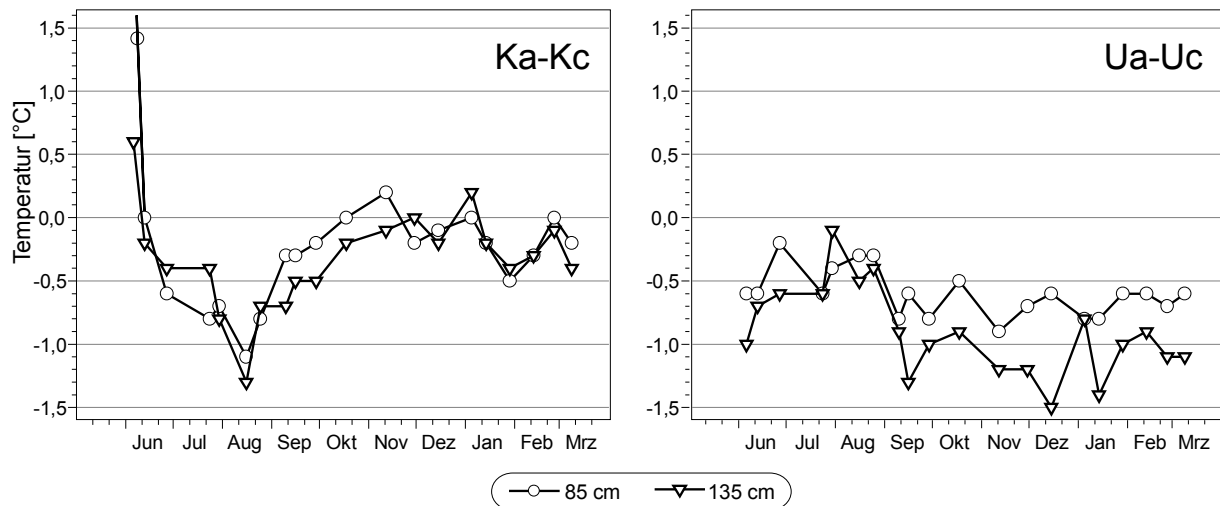


Abbildung 4-31: Temperaturdifferenz zwischen den unteren und oberen Messpunkten jedes Feldes

Zwischen den beiden Messpunkten eines Lysimeterfeldes (Ka/Kc bzw. Ua/Uc) gibt es ebenfalls Unterschiede (Abbildung 4-31):

- Im U-Feld ist der Boden der im unteren Teil der Böschung gelegenen Messstelle Ua immer kühler als der von Uc im oberen Drittel des Lysimeterfeldes. Dies lässt sich leicht erklären, denn der Unterhang wird durch südlich und östlich liegende Hindernisse (Hügel, hohe Bäume) stärker beschattet und erhält eine geringere Sonneneinstrahlung als der Oberhang.
- Auch im K-Feld ist der Unterboden der unteren Messstelle Ka im Sommer deutlich kühler als der von Kc. Im Winter weist sie jedoch ähnliche Temperaturen wie die Messstelle am Oberhang auf.

Vermutlich wird im K-Feld die Wärmebilanz durch lateralen Wassertransport verändert. Im Sommer wird durch kühleres Hangzugwasser - dies wurde durch die laterale Bodenpassage abgekühlt - vom Oberhang aus der Unterboden des unteren Messpunkt abgekühlt. Im Winter - der Boden ist in 85 und 135 cm Tiefe jetzt relativ zur Luft wärmer - erwärmt das Hangzugwasser den Unterboden des unteren Messpunktes Ka.

4.5.3 Abflüsse aus den Lysimeterfeldern

Unterhalb der Versuchsanlage in Leonberg wurde eine Messeinrichtung installiert, die eine kontinuierliche Erfassung der Abflüsse aus den Lysimeterfeldern mit hoher zeitlicher Auflösung erlaubt. Sie arbeitet nach folgendem Prinzip (siehe Bild 13):

- Die Abflüsse aus den Lysimeterfeldern (s.u.) werden in jeweils einen separaten zylindrischen Messbehälter mit ca. 45 l Inhalt eingeleitet.
- In den Behältern hängt eine Drucksonde, die die Höhe der über ihr stehenden Wassersäule auf 1 cm (= 0,46 l) genau ermittelt. Die Wasserstände der Messbehälter werden zur Zeit in 10-Minuten-Intervallen geloggt, kürzere oder längere Loggintervalle sind möglich.
- Bei Erreichen eines oberen Grenzwertes wird ein Magnetventil am Behälterboden geöffnet und der Behälter schlagartig entleert, bis ein unterer Grenzwert erreicht ist. Das Magnetventil schliesst sich und der Messzyklus beginnt von neuem.
- Aus den zehnminütigen Wasserständen in den Messbehältern können die Abflussraten berechnet werden.

Ein Durchflussmesser (IDM) am gemeinsamen Abflussrohr aller Messbehälter erfasst nochmals die Gesamtabflüsse, so dass auch bei Ausfall einer Sonde exakte Messungen möglich sind.



Bild 13: Anlage zur Messung der Abflüsse aus den Lysimeterfeldern

Entsprechend DVWK (1980) werden aus den Zehnminutenwerten Tagesraten der Absickerung berechnet. Da der Fluss aus den Lysimeterfeldern gleichmäßig erfolgt, reicht es im Normalfall aus, mit Tageswerten zu arbeiten. Auch die Klimastationen des DWD bieten keine Messwerte mit höherer zeitlicher Auflösung, jedoch kann die Messstation auf der Deponie Leonberg bei Bedarf alle zehn Minuten Niederschlagswerte liefern. Folgende Abflüsse werden mit der Messeinrichtung der Lysimeterfelder erfasst:

1. Testfeld U: unverdichteter Einbau der Rekultivierungsschicht
 - Oberflächenabfluss (A_0)
 - Absickerung aus der Rekultivierungsschicht (Dränabfluss, A_S)

2. Testfeld K: Kontrolle, konventionell verdichteter Einbau
 - Absickerung aus der Rekultivierungsschicht (Dränabfluss, A_S)

Aufgrund von Erfahrungen bei anderen Großlysimeterversuchen (z.B. DVWK (1980), siehe auch ZISCHAK 1997) konnte 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 Abflussdaten liefern. Gründe hierfür sind vor allem:

- 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 bzw. das zwei- bis dreifache der potentiellen jährlichen Absickerungsrate erreicht. Daher dauert die Angleichung unterschiedlicher Ausgangswassergehalte besonders lange.
- 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.
- Im Laufe des Jahres 2001 mussten die Messeinrichtungen an die vorhandenen Gegebenheiten angepasst werden (z.B. Messintervalle). Durch Ausschwemmungen aus Rekultivierungs-, Dränschicht und Rohrleitungen waren die Filtersysteme häufig überlastet.

Absickerung aus der Rekultivierungsschicht (Dränabfluss)

Aufgrund von Ausfallzeiten der Messeinrichtung liegen für das Jahr 2001 noch keine lückenlosen Datenreihen für beide Lysimeterfelder vor. Ein Vergleich der Felder anhand von Monatssummen ist deshalb nicht sinnvoll. Statt dessen wird auf Grundlage der Tageswerte die durchschnittliche tägliche Absickerung für jeden Monat berechnet (Tabelle 4-8). Es zeigt sich, dass die Absickerungsraten aus den Testfeldern im Sommer 2001 durchweg sehr niedrig waren. Erst gegen Ende Dezember stiegen sie sprunghaft an und erreichten Spitzenwerte > 4 mm/d im U- bzw. > 1 mm im K-Feld (Abbildung 4-32).

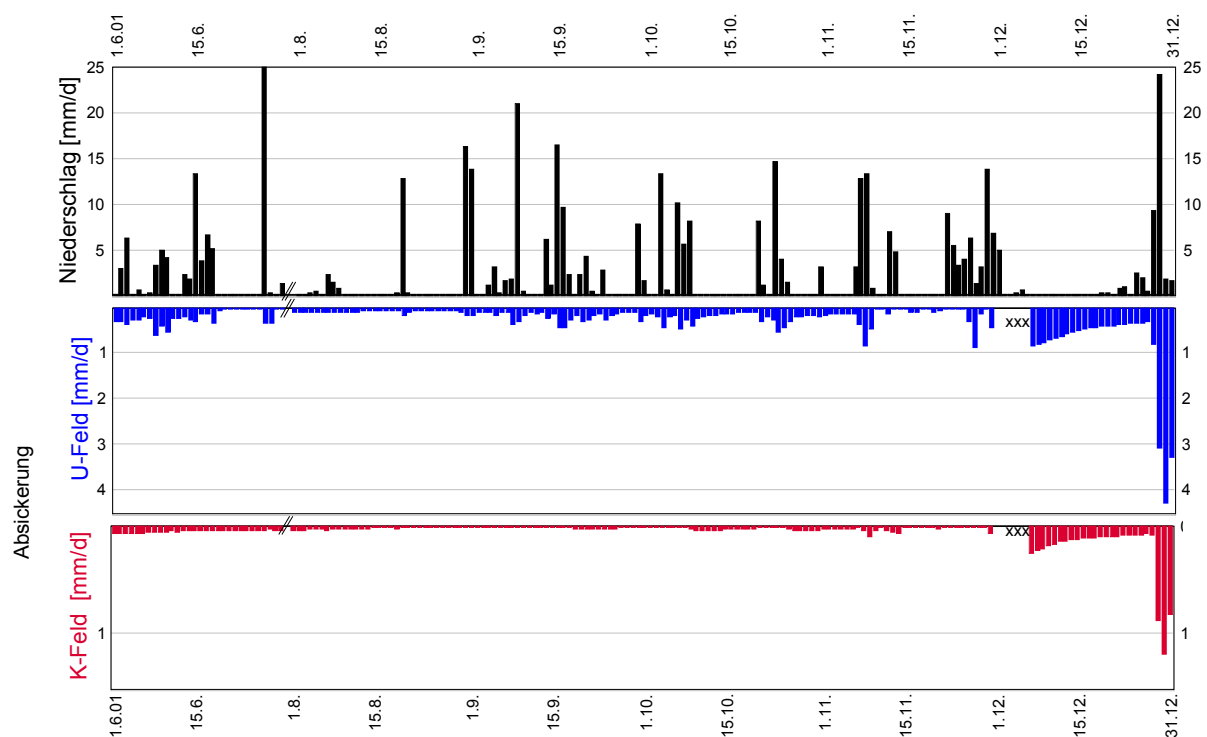


Abbildung 4-32: Niederschlagsmengen und Absickerung [mm/d] aus den Lysimeterfeldern U und K von Juni bis Dezember 2001, x = keine Messwerte, Monat Juli fehlt, Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.

Seit Beginn der Messungen wurden aus Lysimeterfeld U erheblich höhere Dränabflüsse als aus dem Kontrollfeld mit verdichteter Rekultivierungsschicht verzeichnet (Tabelle 4-8). Diese deutlichen Unterschiede waren mit den Testfeldeigenschaften nicht zu begründen. Vielmehr waren gleiche oder aufgrund der wüchsigeren Vegetation (siehe 4.7 und 4.9.3) geringfügig niedrigere Absickerungsraten aus Testfeld U zu erwarten. Die Absickerung aus Testfeld U lag jedoch in Abhängigkeit von der Gesamt-Absickerungsmenge um den Faktor 1,8 bis 16,5 höher (Tabelle 4-8). Diese Unterschiede waren jedoch wenig aussagekräftig, solange die vollständige Wassersättigung der Rekultivierungsschicht in den Lysimeterfeldern nicht erreicht wurde (vergleiche 4.5.1). Nachdem Untersuchungen der Dichtungs- und Entwässerungseinrichtungen keine Fehlstellen erkennen liessen,

konnte im Winter 2001 bei hohen Bodenwassergehalten mit Hilfe eines Tracerversuchs ein kapillarer Fluss aus dem K-Feld in den unteren Randdamm als vermutliche Ursache der Unterschiede nachgewiesen werden. Im Frühjahr 2002 wurde dieser Fließweg durch eine Kunststoffdichtungsbahn verschlossen.

Tabelle 4-8: Mittlere tägliche Absickerungsraten [mm] aus den beiden Lysimeterfeldern der Versuchsanlage Leonberg von Juni 2001 bis März 2002

Jahr	Monat	$A_s \text{ } \emptyset/d$ [mm]		U / K
		U-Feld	K-Feld	
2001	Juni	0,21	0,04	4,9
	Juli	-	-	-
	August	0,07	0,02	4,4
	September	0,18	0,01	16,5
	Oktober	0,21	0,02	10,5
	November	0,15	0,02	8,4
	Dezember	1,01	0,22	4,6
2002	Januar	1,07	0,42	2,5
	Februar	1,40	0,65	2,1
	März	1,24	0,68	1,8

Der Vergleich der täglichen Abflüsse aus dem Testfeld mit unverdichteter Rekultivierungsschicht (Feld U) mit den Tagessummen der Niederschläge zeigt, dass hohe Niederschlagsmengen meist mit kurzer zeitlicher Verzögerung von ungefähr einem Tag abgeleitet wurden. Der Anstieg der Abflüsse erfolgte jedoch während der Vegetationszeit stark gedämpft; selbst nach Starkniederschlägen blieben die Abflussraten unter 1 mm/d. Der Bodenwasserspeicher der Rekultivierungsschicht wurde erst im Dezember 2001 vollständig aufgefüllt und die Feldkapazität überschritten (siehe Abbildung 4-28). Es ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt erstmals ein vollständig gesättigter Fluss durch die Rekultivierungsschichten erfolgte. Der Anteil der Versickerung am Niederschlag stieg im Dezember ebenfalls sprunghaft auf 52,5 % an, er blieb jedoch mit einer Monatssumme von 26,2 mm insgesamt relativ niedrig (Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9: Monatssummen der Niederschläge und Dränabflüsse aus Lysimeterfeld U (unverdichteter Einbau), Juni bis Dezember 2001, Monat Juli fehlt

	Juni		August		September		Oktober		November		Dezember	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Niederschlag	115,8		48,9		84,3		70,4		94,7		49,9	
Abfluss	5,8	5,0	2,3	4,7	5,3	6,3	6,6	9,4	4,5	4,8	26,2	52,5

Oberflächenabfluss aus Lysimeterfeld U

Oberflächenabfluss bildet sich in der Regel nur bei intensiven Niederschlägen, wenn das auftreffende Regenwasser nicht schnell genug in den Boden infiltrieren kann.

Dies ist bei Infiltrationsüberschuss unabhängig von der Wassersättigung des Bodens möglich, weil die Niederschlagsmenge größer ist als die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche (ZUIDEMA 1985). In diesem Fall können alle tieferen Bodenschichten wasserungesättigt bleiben.

Nach langanhaltenden Niederschlägen kann die Infiltrationskapazität infolge Wassersättigung des Bodens stark reduziert sein. In diesem Fall ist auch bei niedrigeren Niederschlagsintensitäten Oberflächenabfluss möglich.

Um den Wasserhaushalt des Lysimeterfeldes U vollständig bilanzieren zu können, wurde unterhalb des Feldes eine Messeinrichtung für Oberflächenabflüsse eingerichtet (siehe 2.3.1). Mit diesem Oberflächenabfluss-Sammler des Lysimeterfeldes U wird lediglich der Anteil des Niederschlags gemessen, der am unteren Ende des Testfeldes auf der Bodenoberfläche abfließt. Oberflächenabflüsse am Hang, die innerhalb des Feldes an anderer Stelle, z.B. in Schrupfrissen, wieder in den Boden infiltrieren, können nicht erfasst werden.

Trotz der Hangneigung von ca. 1:2,7 fließt praktisch kein Wasser an der Oberfläche aus dem Lysimeterfeld U ab. Wenn geringe Oberflächenabflüsse (ca. 0,2 mm/Monat) von der Messeinrichtung registriert werden, so stammen diese aus dem oberhalb der Auffangrinne liegenden 50 cm breiten Bereich des Testfeldes, der wegen einer Folienabdeckung praktisch vegetationsfrei ist¹⁸. Nur im Juni 2001 waren bei einem Starkniederschlag vermutlich höhere Oberflächenabflüsse zu verzeichnen. Während eines Gewitters mit 59,6 mm Niederschlag am Abend des 27. Juni 2001 wurde Feinboden abgeschwemmt, so dass die Filter der Messeinrichtung verstopften und schliesslich eine Rohrverbindung brach. Der abgeschwemmte Feinboden stammte jedoch überwiegend ebenfalls nicht aus dem Testfeld selbst, sondern aus dem Bereich oberhalb der Sammelrinne. Von diesem außergewöhnlichen Ereignis liegen somit keine verwertbaren Daten zum Oberflächenabfluss vor. Die Wasserhaushaltsmodellierung berechnete für den 27. Juni 2001 18,8 mm Oberflächenabfluss (siehe 4.9). Aufgrund der besonderen Oberflächenstruktur der Versuchsfelder durch das Auflockern mit dem Schaufelbagger (siehe 4.2.2.2), die das Wasserhaushaltsmodell nicht abbilden kann, muss jedoch von einem deutlich geringeren Betrag ausgegangen werden.

Diese Ergebnisse decken sich mit Hinweisen in der Literatur, wonach der Oberflächenabfluss keine wesentliche Rolle im Wasserhaushalt einer Rekultivierungsschicht spielt. Beispielsweise ermittelten MELCHIOR et al. (2002) in zwei Testfeldern auf der Deponie

¹⁸ Diese Abdeckung wurde zwischenzeitlich entfernt.

Georgswerder (Hamburg) Abflüsse von durchschnittlich 2,2 bzw. 3,2 mm/a. In Georgswerder verminderten sich die anfangs gemessenen jährlichen Abflussraten von 5,5 bzw. 19,6 mm im Verlauf von sieben Jahren auf Werte von 1,0 bzw. 0,2 mm/a. Selbst auf der mit einer Böschungsneigung von ca. 1:2,3 sehr steilen Deponie Karlsruhe West ermittelten BREH et al. (2002) in den Jahren 1994 bis 2000 nur einen durchschnittlichen Oberflächenabfluss von 12,5 mm/a (0,2 % des Niederschlags).

Eine rauhe Oberfläche, dichter Bewuchs, aber auch Schrumpfrisse tragen dazu bei, Oberflächenabflüsse zu reduzieren (siehe 3.1). Im Gegensatz dazu setzen Befahren oder Walzen der Böden die Infiltrationskapazität der Oberfläche stark herab. Hierdurch wird nicht nur der Oberflächenabfluss, sondern auch die Bodenerosion gefördert (siehe WOHLRAB et al. 1992). Die im Zuge der Erdbauarbeiten durchgeführte Oberbodenlockerung mit dem Bagger, hinterließ eine sehr rauhe Oberflächenstruktur mit einer hohen Infiltrations- und Zwischenspeicherkapazität, die gemeinsam mit der sich im Lauf des Jahres 2001 gut entwickelnden Vegetationsdecke Abflüsse wirkungsvoll zurückhalten konnte. Die rauhe Bodenoberfläche verhinderte jedoch bereits in der Zeit nach dem Abschluss der Baumaßnahmen im Winter 2000/2001 bis zum Beginn der Vegetationszeit Oberflächenabflüsse weitgehend. So war auf den Versuchsflächen keine Bodenerosion festzustellen, obwohl das eingesetzte Rekultivierungssubstrat sehr erosionsanfällig ist¹⁹.

¹⁹ Nach AG BODEN (1994) ist die Erodierbarkeit von schluffigem Lehm *hoch* und von Schluffen *sehr hoch*.

Resümee (4.5):

Die Ergebnisse der laufenden Überwachung des Bodenwasserhaushalts belegen messbare und aussagekräftige Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern bislang nur dahingehend, dass zu Zeiten mit hoher Wassersättigung im K-Feld Stauwasser im Unterboden nachgewiesen werden konnte. Aufgrund der in beiden Lysimeterfeldern gleichen Rekultivierungssubstrate und ähnlicher Bodenmerkmale (z.B. sehr hohe Wasserspeicherkapazität) verhalten sich Wassergehalte und Wasserspannung im Jahresverlauf sehr ähnlich.

Zukünftig wird der Wasserhaushalt in den Testfeldern vor allem durch eine unterschiedliche Vegetationsentwicklung beeinflusst werden. Dies ist jedoch erst dann zu erwarten, wenn auch Gehölze einen messbaren Anteil am Wasserverbrauch haben werden.

Die Absickerungsraten aus den Lysimeterfeldern sind insgesamt sehr gering und von großer Gleichmäßigkeit. Die maximale tägliche Absickerungsmenge im Jahr 2001 betrug 4,27 mm bzw. l/m². Weitergehende Aussagen werden erst in Zukunft nach Vorliegen längerer Messreihen möglich. Es ist davon auszugehen, dass die Vegetationsdecke zunehmenden Einfluss auf den Wasserhaushalt gewinnt, die Evapotranspiration zunimmt und die Absickerungsmengen weiter zurückgehen.

4.6 Bodenleben

(O. EHRMANN)

4.6.1 Regenwürmer

4.6.1.1 Einführung

Innerhalb der in Europa etwa 50.000 Arten umfassenden Gruppe der Bodentiere nehmen die Regenwürmer mit mehreren 100 Arten hinsichtlich der Artenzahl nur einen kleinen Anteil ein. Eine herausragende Stellung innerhalb der Bodentiere haben sie aufgrund ihrer Biomasse und Funktion. In vielen Böden Mitteleuropas sind sie die Tiergruppe mit der höchsten Biomasse (DUNGER 1983). Durch ihre Lebensweise beeinflussen die Regenwürmer sowohl Bodenstruktur als auch Stoffumsätze im Boden wesentlich:

- Manche Arten können bis über 1 m tief graben und dadurch neue Hohlräume auch im Unterboden bilden. Dabei legen sie erhebliche Mengen mineralische Substanz auf die Bodenoberfläche und mischen organische Substanz als Auskleidung ihrer Wohnröhren in den Unterboden ein (GRAFF 1971). In diesen Röhren können Stofftransporte erfolgen. So ist z.B. die Infiltrationsrate von Wasser deutlich höher, wenn zahlreiche Regenwurmröhren vorhanden sind (EHLERS 1975).
- Der Streuabbau wird durch die Regenwürmer in großen Umfang beeinflusst. So kann fast die gesamte Laubstreu eines Buchenwaldes nach mikrobieller Vorzersetzung von Regenwürmern gefressen werden (SATCHELL 1967). Im Regenwurmdarm erfolgt dann eine Feinvermischung von organischer und mineralischer Substanz. Durch die dabei stattfindende Bildung von Ton-Humus-Komplexen wird die organische Substanz stabilisiert und so vor schneller Mineralisierung geschützt (MARTIN 1991). Ohne Regenwürmer wird die Streu langsamer abgebaut und die in der Streu gebundenen Nährstoffe stehen der Vegetation nur verzögert zur Verfügung.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, einerseits prinzipiell die Auswirkungen der Rekultivierung auf Regenwurmpopulationen und andererseits speziell mögliche Unterschiede zwischen konventionellem und unverdichtetem Einbau zu untersuchen. Zudem sollte der Einfluss der Regenwürmer auf die Bodenstruktur der unterschiedlichen Rekultivierungsschichten erfasst werden. Da überraschenderweise die Regenwürmer im Zuge der Rekultivierung praktisch vollständig getötet wurden (s.u.), konnte diese Untersuchung nicht durchgeführt werden. Es erschien jedoch sinnvoll, statt dessen eine grundlegende Untersuchung über die Auswirkung der Rekultivierung auf das Vorkommen von Regenwürmern am Beispiel der Kreismülldeponie Leonberg durchzuführen.

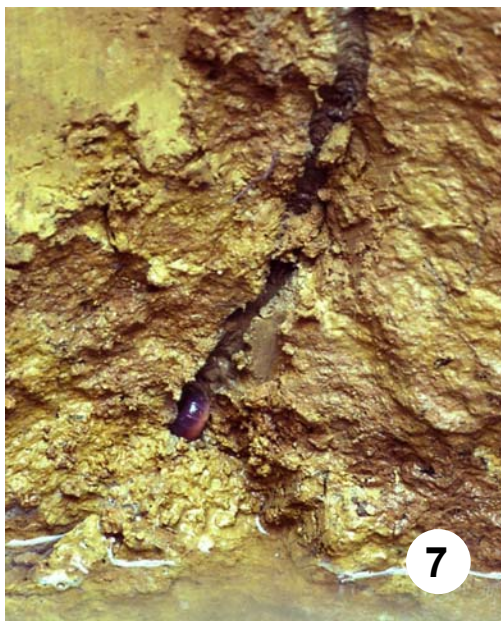
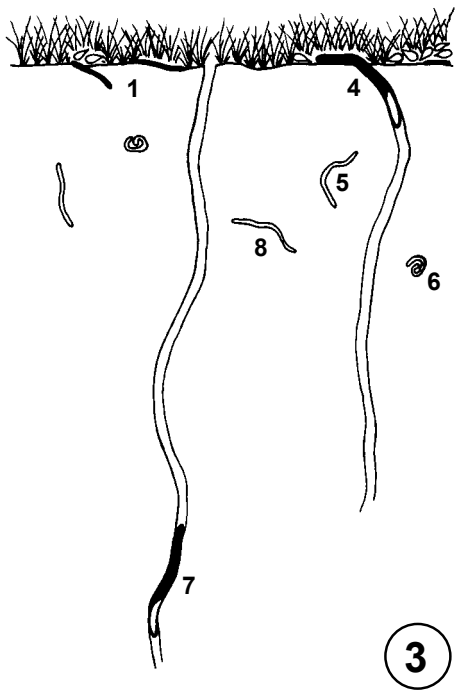
Ökologische Gruppen von Regenwürmern

Regenwürmer können aufgrund ihrer unterschiedlichen Lebensweise und der Besiedlung verschiedener Lebensräume im Boden in die drei ökologischen Gruppen epigäisch, endogäisch und anezisch eingeteilt werden (BOUCHÉ 1972 und 1977). Diese Einteilung ist für das Verständnis des folgenden Beitrages von grundlegender Bedeutung. Eine schematische Darstellung des Lebensraumes der ökologischen Gruppen und Bilder typischer Arten werden auf Bildtafel C gezeigt (Bild C-1 bis C-8). Die Funktionen der drei ökologischen Gruppen sind in Tabelle 4-10 kurz beschrieben und werden auf Bildtafel D visualisiert (Bild D-9 bis D-16).

Tabelle 4-10: Charakteristika der 3 ökologischen Gruppen der Regenwürmer

	ökologische Gruppe		
	epigäisch	anezisch	endogäisch
Länge adulter Tiere [mm]	20-120	150-250 (500)	30-150
Pigmentierung	bräunlich-rot, dunkel	schwärzlich-rötlich-braun	± unpigmentiert
Verteilung des Pigmentes	± gleichmäßig über den ganzen Körper	Vorderteil deutlich dunkler pigmentiert	
Lebensraum	Streu, Humusauflage	gesamtes Bodenprofil bis über ein Meter Tiefe	Oberboden, vor allem im intensiv durchwurzelten Bereich
Nahrung	kleinere, vorzeretzte Streu	vorzeretzte Streu	organische Feinsubstanz
Ort der Nahrungsaufnahme	Bodenoberfläche	Bodenoberfläche	Oberboden
Abhängigkeit des Vorkommens von pH (CaCl ₂), Bodenart und -feuchte*	gering	fehlen an Standorten < pH 4 sowie in sehr nassen und in tonarmen Böden	fehlen an Standorten < pH4
wichtigste Funktionen	Streuabbau	Einmischen von Streu in den Boden, Streuabbau, Bodenlockerung, (Krümelbildung), Anlage tiefreichender Röhren	Streuabbau, (Bodenlockerung), Krümelbildung, Anlage von Röhren im Oberboden
* Die Angaben beziehen sich jeweils auf die Gruppe als Ganzes.			

Keine ökologische Gruppe kann also alle Funktionen hinreichend erfüllen. Die Funktionen der epigäischen Regenwürmer können allerdings im wesentlichen von den anezischen übernommen werden. Innerhalb einer ökologischen Gruppe können in der Regel verschiedene Arten die gleiche Funktion erfüllen.



Bildtafel C: Beispiele zu ökologischen Gruppen von Regenwürmern

Bild C-1: *Lumbricus rubellus* in einem Hohlraum unter einem (entfernten) Stein. Dieser epigäische Regenwurm ist aufgrund seiner oberflächennahen Lebensweise durchgehend dunkel pigmentiert. Das Vorhandensein eines Clitellums (rötliche Stelle am Ende des ersten Drittels) weist auf ein geschlechtsreifes Tier hin.

Bild C-2: Zwei anezische *Lumbricus terrestris* bei der Paarung an der Bodenoberfläche. Die Regenwürmer tauschen bei der Paarung Sperma aus. Die Befruchtung der Eizelle erfolgt erst bei der Kokonbildung. Die Tiere bleiben bei der Paarung mit dem Hinterende in der Röhre, bei Störungen können sie sich in den Unterboden zurückziehen.

Bild C-3: Schematische Darstellung der Lebensbereiche verschiedener ökologischer Gruppen. Das Bild wurde aufgrund eigener Erfahrungen und Kenntnisse aus der Literatur gezeichnet. Epigäische Arten (1) sind durchgehend dunkel gezeichnet, bei anezischen (4,7) ist nur das Hinterteil hell, wohingegen von den endogäischen Regenwürmern (5,6,8) nur die Umrißlinien gezeichnet sind. Epigäische Regenwürmer leben meist an der Bodenoberfläche, die endogäischen im Oberboden. Anezische Regenwürmer kommen zur Paarung und Nahrungsaufnahme an die Bodenoberfläche, sie können sich aber tief in den Unterboden zurückziehen. Die Zahlen neben den Regenwürmern weisen auch darauf hin, daß ein Bild mit der gleichen Nr. vorhanden ist.

Bild C-4: *Lumbricus terrestris* beim Einziehen eines Laubblattes.

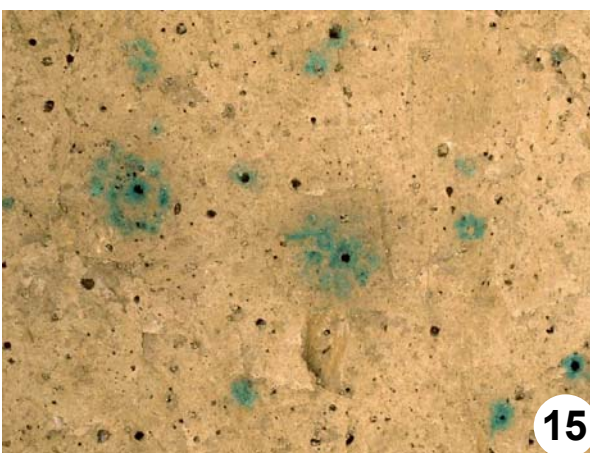
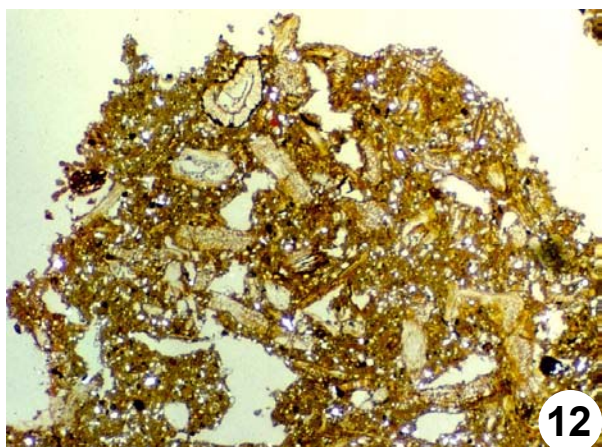
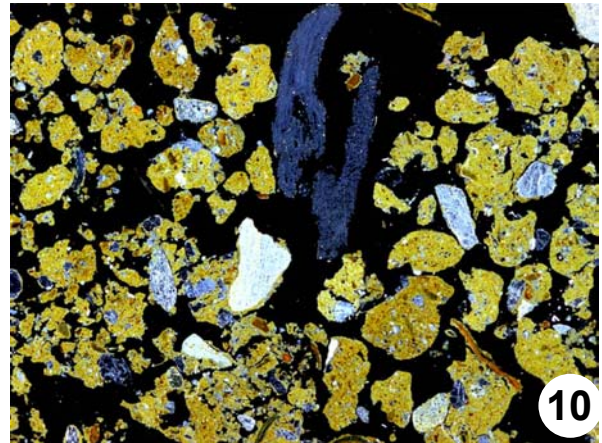
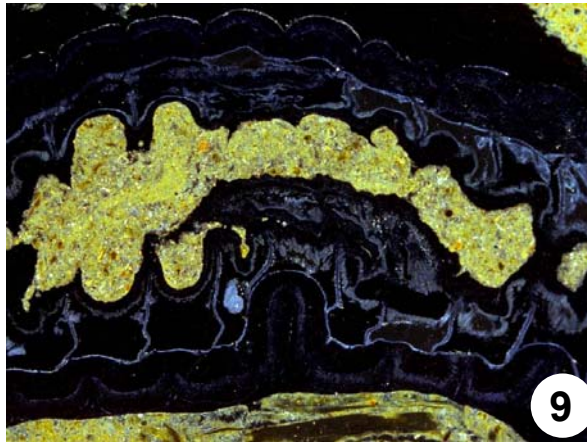
Anezische Regenwürmer legen eine dauerhafte, ± senkrecht orientierte Wohnröhre mit Mündung zur Bodenoberfläche an. Dorthin kommen sie zur Nahrungsaufnahme, verlassen dabei aber in der Regel ihre Wohnröhre nur mit dem Vorderteil, so daß die Fläche, von der sie Nahrung sammeln können, begrenzt ist.

Die **Bilder C-5** und **C-6** zeigen endogäische Regenwürmer. *Aporrectodea icterica* (Bild 6) wurde in natürlicher Lage im Oberboden aufgenommen. Dieses Exemplar hat kein Röhrensystem und konnte deshalb auch seine Position nicht verlassen. *A. icterica* frißt sich vermutlich durch den Boden und verfüllt die Röhre am Hinterende wieder.

Auf Bild 5 ist *A. rosea* im Ruhestadium zu sehen. Das Tier hat eine kleine Höhle gebildet und sie mit Schleim ausgekleidet. Darin kann es Trockenperioden überdauern.

Bild C-7: *Lumbricus terrestris* am unteren Ende seiner Wohnröhre in 130 cm Tiefe. Vom Tier ist nur die Kopfspitze zu sehen, der Körper ist noch in der Röhre, deren Ende bis ins Stauwasser reicht. Das Tier kann sich lange im Wasser aufhalten, wenn ausreichend Sauerstoff darin gelöst ist. Die Röhre hebt sich aufgrund der dunklen Humustapete deutlich von der umgebenden Bodenmatrix ab.

Bild C-8: *Octolasion lacteum* ist ein großer endogäischer Regenwurm (Länge ca. 15 cm). Typisch für die meisten Exemplare von *O. lacteum* ist das fast völlige Fehlen einer Pigmentierung und die gelbe Schwanzspitze. Normalerweise lebt diese Art im Boden. Das Foto wurde in der Nacht nach einem Starkregen aufgenommen. Der Regenwurm nutzt die feuchten Bedingungen an der Bodenoberfläche zur Wanderung und Besiedelung neuer Habitats.



Bildtafel D: Beispiele zu Funktionen von Regenwürmern**Bild D-9:** Schnitt durch einen Regenwurm

Dieser Längsschnitt durch einen Regenwurm (Bildbreite 5 mm) bei Durchlicht-Dunkelfeld-Beleuchtung (Hohlräume sind dabei schwarz) zeigt in der Mitte des Regenwurmes den Darminhalt. Im Darm ist der Boden dispergiert, d.h. die ursprüngliche Bodenstruktur ist aufgelöst, im Regenwurmdarm findet eine Neuvermischung von organischer und mineralischer Substanz statt.

Bild D-10: Regenwurmlosungen im Oberboden

Dieser Vertikalschnitt (Dünnschliff: Durchlicht-Dunkelfeld-Beleuchtung, Bildbreite 14 mm) aus dem Oberboden einer Pararendzina zeigt zahlreiche Aggregate von ca. 2 - 3 mm Größe. Die meisten davon haben verrundete Oberflächen. Dies ist in dieser Größenklasse typisch für Regenwurmlosungen. Unten links sind die Regenwurmlosungen durch den Fraß anderer Bodentiere verändert. Oben, ungefähr in der Mitte des Bildes liegen zwei Wurzeln.

Bild D-11: Zusammengezogene Blätter

Vom nahen Wald wurden Laubblätter auf einen Acker geweht. Ein anezischer Regenwurm hat die Blätter in der Umgebung seiner Röhre gesammelt und zieht sie nach und nach in seine Röhre. Dort wird durch das günstigere Mikroklima die mikrobielle Vorzersetzung gefördert. Die vorzersetzten Blätter werden vom Regenwurm verzehrt und mit dem gleichzeitig aufgenommenen Mineralboden intensiv vermischt.

Bild D-12: Regenwurmlosung im Detail

Dünnschliff von der Losung eines großen anezischen Regenwurms (Bildbreite 4 mm). Neben zahlreichen Pflanzenresten (mit Innenstruktur) enthält die Losung auch viel mineralisches Material (zahlreiche helle Quarzkörner sind zu sehen). Mineralisches Material und Pflanzenreste sind gleichmäßig in der Losung verteilt, sie wurden im Regenwurmdarm intensiv vermischt. Dadurch wird die Bildung von Ton-Humus-Komplexen gefördert.

Bild D-13: *Aporrectodea longa* bei Losungsablage

Der Regenwurm kommt dazu mit dem Hinterende aus dem Boden. *A. longa* legt häufig seine Losung an der gleichen Stelle ab. Dadurch entstehen charakteristische Losungshäufchen, anhand deren auch sein Vorkommen erfasst werden kann. Durch die Losungsablage an der Oberfläche wird der Boden in erheblichem Umfang gelockert.

Bild D-14: Losungen an der Bodenoberfläche

Auf einem stark betretenen Rasen haben Regenwürmer nach der Winterruhe ihr Röhrensystem erneuert. Da der verdichtete Boden keinen Raum für die Losungsablage bot, haben sie die Losungen auf die Bodenoberfläche gelegt. Die jährliche Losungsablage an der Bodenoberfläche kann beträchtliche Ausmaße annehmen (z.T. über 5 kg m⁻²).

Bild D-15: Regenwurmröhren im Unterboden

Bild 15 ist eine Aufsicht auf den Boden in 70 cm Tiefe (Bildbreite 50 cm). Das Bild zeigt zahlreiche Regenwurmröhren verschiedenen Durchmessers. Vor dem Aufgraben wurde eine einem Starkregen entsprechende Menge (30 l m⁻²) blaugrün angefärbten Wassers auf die Bodenoberfläche ausgebracht. Die Verteilung der Farbe um die Röhren zeigt, dass der Wassertransport in dieser Tiefe fast nur in Regenwurmröhren stattgefunden hat.

Bild D-16: Wurzeln in Regenwurmröhren

Das Bild zeigt drei Regenwurmröhren in ca. 70 cm Tiefe (vertikaler Schnitt, Bildbreite 9 cm). Die Regenwurmröhren heben sich aufgrund ihrer Form und ihrer dunklen Wandauskleidung (Humustapete) vom umgebenden Boden ab. In allen drei Röhren sind Wurzeln hineingewachsen, wenige in die rechte Röhre und sehr viele in die mittlere. Vertikale Regenwurmröhren erleichtern Wurzeln den Weg in den Unterboden, gleichzeitig stellt die Humustapete eine Nährstoffquelle dar.

4.6.1.2 Regenwürmer in den Lysimeterfeldern

Während der Erdbauarbeiten wurde zum einen die Menge der mit dem Rekultivierungssubstrat angelieferten Regenwürmern bestimmt, zum anderen wurde im weiteren Verlauf des Vorhabens die Entwicklung dieser Population in den Testfeldern untersucht.

Vorbemerkungen und Methoden

Der angelieferte Boden wurde mit einer Handauslese auf Regenwürmer durchsucht (nach EHRMANN & BABEL 1991). Dabei wurde der Zustand der Regenwürmer (*verletzt/unverletzt*) bonitiert. Um die in den Proben gefundene Regenwurmmenge auf eine Standardfläche (1 m²) umrechnen zu können, wurde der Boden gewogen. Mittels der nach dem Einbau erhobenen Parameter Einbauhöhe und Trockenraumdichte konnte dann der Flächenbezug hergestellt werden.

Bei allen Regenwurmuntersuchungen nach dem Einbau der Substrate in die Testfelder wurden die Regenwürmer mit einer Kombination aus Elektromethode (1/8 m² Untersuchungsfläche, THIELEMANN 1986) und nachfolgender Handauslese einer Teilfläche (1/30 m², Tiefe: 30 cm) durchgeführt. An jedem Standort wurde diese Methodenkombination sechsmal wiederholt. Die Zahl der Wiederholungen war jedoch zu gering, um Unterschiede zwischen den Testfeldern in Leonberg statistisch abzusichern²⁰.

Ergebnisse

Der bei der Anlage der Rekultivierungsschicht gelieferte Boden enthielt Regenwürmer aus allen drei ökologischen Gruppen (siehe Tabelle 4-11). Die Biomasse war zwar - verglichen mit ähnlichen Standorten in Baden-Württemberg - um den Faktor 10 (Grünland) bzw. um den Faktor 3 (Wald) geringer, sie hätte aber prinzipiell für die Entwicklung einer standortgerechten Population innerhalb einiger Jahre ausgereicht.

Die bisherigen Regenwurmfänge zeigen jedoch keine Zunahme, sondern einen fast vollständigen Zusammenbruch der Population nach dem Einbau der Böden (Tabelle 4-11). Im Frühjahr 2001 wurde kein Regenwurm gefunden, im Herbst 2001 nur ein einziger (mit 0,8 g Biomasse, die gesamte Fangfläche betrug jeweils 1,5 m²), im Frühjahr 2002 wurden drei Regenwürmer mit 1,1 g Biomasse erfasst. Dieser geringe Anstieg kann aber nicht als Zeichen einer Populationsentwicklung gewertet werden, da die Probefläche

²⁰ Um mögliche Unterschiede zwischen den Einbauvarianten statistisch abzusichern, wäre wegen der sehr kleinen Populationen in den Testfeldern (siehe Tabelle 4-11) mindestens die zehnfache Anzahl von Wiederholungen nötig gewesen. Abgesehen vom hohen Arbeitsaufwand, hätte dies die Böden der Testfelder für weitere wissenschaftliche Untersuchungen unbrauchbar gemacht.

viel zu gering ist (s.o.). Er zeigt vielmehr die Zufälligkeit der Ergebnisse bei so winzigen Populationen. Die Unterschiede zwischen U- und K-Feld passen zwar zu der Vorstellung, dass der unverdichtete Einbau die für Regenwürmer günstigere Variante ist, aber aus den zuvor genannten Gründen können die gefundenen Unterschiede auch Zufall sein.

Die im Testfeld festgestellte Regenwurmbiomasse gehört mit zu niedrigsten in Baden-Württemberg bisher festgestellten²¹, nur ein flachgründiger Nadelforst im Tauberbischofsheimer Trockengebiet wies ähnlich niedrige Werte auf (EHRMANN et al. 2002).

Tabelle 4-11: Biomasse der Regenwürmer im Versuchsfeld Leonberg [alle Angaben in Gramm Frischmasse je m²]

ökologische Gruppe*	epigäisch		endogäisch		anezisch		Summe	
	K*	U*	K	U	K	U	K	U
angeliefert (Herbst 2000)	10,7		9,5		3,3		23,5	
Annahme: überlebensfähig**	0,8		0,7		0,2		1,8	
Fang im Frühjahr 2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fang im Herbst 2001	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Fang im Frühjahr 2002	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	2,3
Ø von Standorten mit ähnlicher Körnung (Löss) in Ba-Wü								
a) Grünland	7		102		157		266	
b) Wald	7		30		29		66	
** Annahme: nur nicht schwerverletzte Regenwürmer in der Tiefe 0 - 50 cm überleben								

Für den Populationszusammenbruch nach dem Bodeneinbau sind vermutlich mehrere Faktoren verantwortlich:

- Verletzungen der Regenwürmer beim Aus- und Einbau des Bodens; 65 % der Regenwürmer waren nach der Umlagerung verletzt, so dass ein Überleben unwahrscheinlich war.
- Tiefes Vergraben der Regenwürmern bei gleichzeitigem Verdichten des Bodens; durch die Bodenumlagerung gelangten Regenwürmer tief in den Unterboden der Testfelder. Durch die verdichteten Schichten im K-Feld kann sich kein Regenwurm graben und es ist auch nicht sehr wahrscheinlich, dass sich Regenwürmer aus den unteren Schichten des U-Feldes zur Bodenoberfläche durchgraben können. Im

²¹ Der Autor untersucht seit 1987 die Regenwurmfauna Baden-Württembergs und hat bisher ca. 200 Standorte beprobt.

eingebauten Unterboden können Regenwürmer wegen Nahrungsmangel und Sauerstoffarmut nicht lange leben.

- Nahrungsmangel unmittelbar nach dem Einbau der Rekultivierungsschicht. Es fehlt noch die Streu von Pflanzen, der ausgebrachte Kompost deckt nicht die Nahrungsansprüche der drei verschiedenen ökologischen Gruppen ab.

Vergleichbare Untersuchungen sind aus der Literatur nicht bekannt, auch wurde kein derart gravierender Effekt der Bodenumlagerung auf die Regenwurmpopulation erwartet. Weder Zeitpunkt (frostfreier Spätherbst) noch Bodenfeuchte (mittlere Werte) waren ungünstig für Regenwürmer. Prinzipiell sind die Ergebnisse wegen der praxiskonformen Durchführung des Testfeldbaues auch auf ähnliche Baumaßnahmen übertragbar. Deshalb sollte der Frage nachgegangen werden, ob Bodenumlagerungen stets mit solchen katastrophalen Auswirkungen für Regenwurmpopulationen verbunden sind.

Eine deutliche Reduktion der Regenwurmverluste durch eine schonendere Behandlung beim Bodeneinbau ist in der derzeitigen Baupraxis nur schwer zu erreichen. Vermutlich ist das gezielte Einbringen von Regenwürmern nach Abschluß einer Baumaßnahme erfolgversprechender. Positive Erfahrungen mit dem Aussetzen von Regenwürmern in regenwurmfreie Böden wurden beispielsweise in neuseelandändischen Grünland²² von STOCKDILL (1982) oder in neu angelegten niederländischen Poldern von HOOGERKAMP (1983) gewonnen.

Prognose zur weiteren Entwicklung der Regenwurmpopulationen

Die weitere Entwicklung der Regenwurmpopulation ist abhängig von der Vermehrung der wenigen derzeit vorhandenen Tiere und von der Einwanderung aus der unmittelbaren Umgebung der Versuchsfelder. Die rekultivierten Flächen in der Umgebung der Versuchsfelder weisen jedoch auch kaum Regenwürmer auf. Zudem behindern Schotterwege und Betonrinnen die Migration. Die unterschiedlichen ökologischen Gruppen werden vermutlich verschieden reagieren:

- Die wenigen **endogäischen** Regenwürmer werden sich allmählich vermehren. Da die wichtigsten Arten wie *Aporrectodea caliginosa* und *A. rosea* sich über Parthenogenese fortpflanzen können (LEE 1985), ist eine Vermehrung auch bei geringer Populationsdichte möglich. Diese wird jedoch eher langsam erfolgen, weil zum einen die Nahrungsgrundlage (humoser Oberboden) nur wenig entwickelt ist, und zum anderen diese Arten mit im Durchschnitt ca. 20 Kokons pro Jahr nur eine geringe Reproduktionsleistung haben (nach EVANS & GUILD 1948).

²² Die einheimischen Regenwürmer „ertrugen“ die von den Europäern eingeführte Weidenutzung nicht.

- Die Anzahl der Würmer **epigäischer** Arten wird vermutlich bald zunehmen. Diese relativ mobilen Arten kommen auch in der Umgebung vor (Abbildung 4-33), haben bereits jetzt eine günstige Nahrungsgrundlage und weisen eine sehr hohe Reproduktionsleistung von 50 - 100 Kokons pro Jahr auf (EVANS & GUILD 1948).
- Die tiefgrabenden **anezischen** Arten pflanzen sich ausschließlich sexuell fort. Daher ist eine gewisse Populationsdichte für die Reproduktion dieser eher sessilen Regenwurmgruppe notwendig. Diese Tiere treten daher praktisch nie vereinzelt, sondern in der Regel gruppenweise auf. In der näheren Umgebung der Versuchsfelder kommen keine anezischen Regenwürmer vor (siehe Abbildung 4-33) und die Besiedlung der Versuchsfläche ist erschwert. Deshalb ist es eher unwahrscheinlich, dass diese, für die Bodenstruktur wichtigste ökologische Gruppe die Versuchsfelder in den nächsten Jahren besiedeln kann.

Aus diesen Gründen ist insgesamt nur ein allmählicher Anstieg der Regenwurmzahlen auf den Versuchsfeldern zu erwarten, so dass die Populationsdichten von Standorten auf ähnlichem Substrat vermutlich erst langfristig erreicht werden. Als Folge hiervon fehlen die positiven Wirkungen der Regenwürmer auf die Bodenstruktur in den nächsten Jahren weitgehend.

4.6.1.3 Regenwürmer auf der Kreismülldeponie Leonberg

Nachdem die Untersuchungen der Versuchflächen einen Zusammenbruch der Regenwurmpopulation zeigte, wurde dies als Anlass genommen, die Regenwurmfauna der Kreismülldeponie Leonberg auf repräsentativen Flächen zu untersuchen. Hierzu wurde in jeder der unterschiedlich alten Rekultivierungen jeweils eine Probefläche ausgewählt sowie zusätzlich der umgebende Wald nördlich und südlich der Deponie beprobt. Die Regenwurmfänge wurden im Frühjahr 2001 mit der unter 4.6.1.2 beschriebenen Methode durchgeführt.

Tabelle 4-12: Übersicht über die untersuchten Rekultivierungsabschnitte auf der Deponie Leonberg

Nr	Fertigstellung**	Exposition	Inklination [°]	Vegetation	pH*
1 Lysimeterfeld	2000	OSO	22	Grünland mit kleinen Bäumen	6,8
2	1998	SSW	22	Sukzession mit kleinen Bäumen	7,0
3	1990	N	27	lichter Erlenforst	7,1
4	1986	N	15	Robinienforst	7,0
5	1978	N	19	dichter Ahornforst	7,2
7	1974	N	18	dichter Ahornforst	7,1
A	alter Wald	eben	-	Altholz Buche	3,8
B	alter Wald	eben	-	Altholz Buche	3,1

* in 0-10 cm Tiefe, gemessen in CaCl₂, ** Die älteren Teile der Deponie wurden sukzessive verfüllt und abgedeckt, daher lässt sich kein Anlagejahr für die Rekultivierungsschicht angeben.

Der Boden der Rekultivierungen 2, 4, 5, 7 sowie der Althölzer A und B weist einen hohen Steinanteil auf. Bei den Althölzern ist Keupersandstein das Ausgangsmaterial der Bodenbildung, auf der Deponie wurde humusarmer Löss, Ton und Bauschutt in unterschiedlichen Gemengen eingebaut. Die Fläche 3 ist im Oberboden humoser, obwohl sie später als die Flächen 4, 5 und 7 angelegt wurde. Bei dieser Rekultivierung wurde zumindest

teilweise humusreicher Oberboden verwendet. Die Fläche 2 weist bis in über 50 cm Tiefe sehr hohe Kompostgehalte auf.

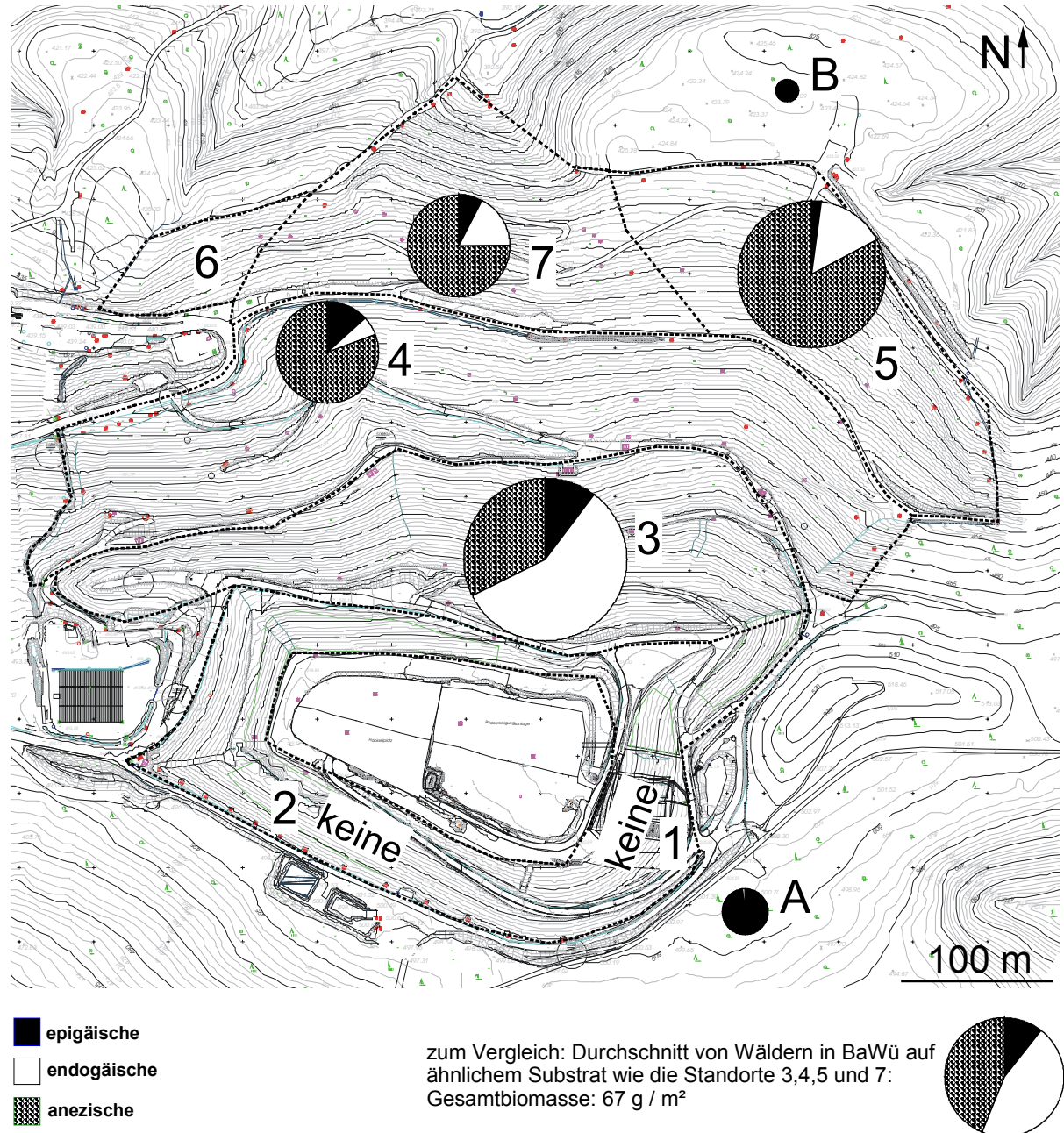


Abbildung 4-33: Regenwürmer auf der Kreismülledeponie Leonberg im Frühjahr 2001. Die Zahlen stehen für die unterschiedlich alte Rekultivierungen der Tabelle 4-12. Aufgetragen ist als Kreisdiagramm jeweils die Regenwurmbiomasse. Die Kreise sind an der jeweiligen Untersuchungsstelle positioniert, die Kreisfläche ist äquivalent zur Populationsgröße.

Ergebnisse der Regenwurmfänge

Die Regenwurmuntersuchung der Kreismülldeponie Leonberg brachte wiederum überraschende Ergebnisse:

Tabelle 4-13: Regenwurmarten und -abundanzen auf der Kreismülldeponie Leonberg

Fläche	Deponie						alter Wald	
	1	2	3	4	5	7	A	B
epigäische								
<i>Dendrobaena octaedra</i>	-	-	-	-	-	-	7	j*
<i>D. pygmaea</i>	-	-	-	-	-	-	6	j*
<i>Lumbricus castaneus</i>	-	-	17	3	-	3	-	-
<i>L. rubellus</i>	-	-	4	j	1	1	8	j
juvenile epigäische	-	-	1	20	3	19	22	33
Summe epigäische	-	-	22	23	4	23	43	33
endogäische								
<i>Aporrectodea caliginosa</i>	-	-	6	1	3	j	-	-
<i>A. icterica</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>A. rosea</i>	-	-	3	-	5	1	-	-
<i>Allolobophora chlorotica</i>	-	-	8	-	-	-	-	-
<i>Allolobophora handlirschi</i>	-	-	19	-	-	-	-	-
<i>Octolasion cyaneum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>O. lacteum</i>	-	-	36	-	-	12	-	-
juvenile endogäische	-	-	221	22	94	60	8	-
Summe endogäische	-	-	293	24	102	74	8	-
anezische								
<i>Lumbricus terrestris</i>	-	-	-	j	j	3	-	-
<i>Aporrectodea longa</i>	-	-	j	5	10	j	-	-
juvenile anezische	-	-	55	35	38	20	-	-
Summe anezische	-	-	55	40	48	23	-	-
Gesamtsumme	-	-	371	87	154	120	51	33
Anzahl der Arten	0	0	8	5	5	7	4	2

j = nur juvenile Tiere dieser Art gefunden, j* = mindestens eine der beiden Arten kommt vor

- Die Regenwurmpopulationen auf der Deponie sind im Mittel viel größer als im umgebenden alten Buchenwald (Abbildung 4-33, Tabelle 4-13). Dort sind nicht nur die Abundanzen und Biomassen viel geringer, sondern es kommen im alten Wald praktisch nur epigäische Arten vor. Ursache ist die ungünstigere Bodenart (Sand) und die starke Versauerung der die Deponie umgebenden Waldflächen auf Keupersandstein (siehe Tabelle 4-12). Bei diesem niedrigen pH-Wert können nur kleine Populationen aus epigäischen Arten vorkommen (EHRMANN et al. 2002). Damit fällt auch der umgebende Wald als Quelle für die Einwanderung von Regenwürmern praktisch aus.
- Die Unterschiede zwischen verschiedenen Rekultivierungen auf der Deponie sind drastisch. In der Rekultivierungsfläche 2 wurden an der Probestelle keine Regenwürmer gefunden²³, etwas ältere (3) und deutlich ältere Bereiche wiesen mittlere (Flächen 4 und 7) bis große (5) Populationen auf.
- Die Regenwurmbiomassen sind zwar ähnlich groß (Flächen 4 und 7) oder sogar noch größer (3 und 5) als in Wäldern Baden-Württembergs auf vergleichbarem Substrat, die Populationen sind aber deutlich anders zusammengesetzt. Auf der Kreismülldeponie Leonberg weisen die Probeflächen 4, 5 und 7 wesentlich geringere Anteile an endogäischen Arten auf als die vergleichbaren Flächen in Baden-Württemberg. Lediglich die Population der Rekultivierung 3 ist ähnlich zusammengesetzt wie auf Vergleichsflächen, diese Rekultivierung hat aber zumindest an der Probestelle Oberboden („Mutterboden“) erhalten. Ursache der unterschiedlichen Zusammensetzung ist also die Humusarmut im Oberboden, denn endogäische Arten leben im humosen Oberboden. Somit wird sich die Regenwurmpopulation mit zunehmender Bodenbildung (Humusanreicherung) ändern.

Es stellt sich daher die Frage, ob sich die Besiedlung von Rekultivierungsflächen mit Regenwürmern im Verlauf einiger Jahre von selbst ergeben wird. So einfach ist der Sachverhalt aber nicht. Es gibt fundamentale Unterschiede zwischen den unterschiedlich alten Rekultivierungen:

- Ältere Rekultivierungen erfolgten eher zufällig, weniger gut organisiert und die Böden wurden nicht systematisch verdichtet. Durchführung der Rekultivierung und verwendete Materialien sind heterogener und eine Verdichtung erfolgte - wenn überhaupt - nur stellenweise. Diese Heterogenität ist günstig für Regenwürmer, denn zumindest kleinräumig hatten sie günstigere (Über-)Lebensbedingungen und konnten von dort aus dann die Fläche besiedeln.
- Weiterhin wurde früher auf das Einarbeiten von Kompost verzichtet. Große Mengen von Kompost im Boden führen wegen der leichten Umsetzbarkeit dieser relativ jungen organischen Substanz in den meist eher schlecht durchlüfteten Böden zu einer starken Sauerstoffzehrung. Als Folge dessen können Regenwürmer diesen Boden-

²³ Weitere Testgrabungen an verschiedenen Stellen zeigten, dass es eine extrem kleine Population gibt, diese wird jedoch mit der üblichen Fangfläche nicht erfasst.

bereich nicht aufsuchen. Damit haben sie keine Rückzugsmöglichkeit bei Frost oder Trockenheit und den tiefgrabenden Arten fehlt der Lebensraum an sich. Falsch eingebauter Kompost ist also kein „Regenwurmfutter“ sondern ein „Regenwurmkiller“, solange die Umsetzungsprozesse nicht abgeschlossen sind.

- Zusätzlich ist in Leonberg die Exposition der älteren Rekultivierungen günstiger für Regenwürmer, denn sie liegen am Nordhang. Dort ist das Mikroklima ausgeglichener und insgesamt feuchter als am Südhang. Dieser Faktor erklärt aber nur einen Teil der Unterschiede.

Regenwurmuntersuchungen auf Mülldeponien wurden bisher sehr selten durchgeführt. Zudem sind die Ergebnisse wegen der unterschiedlichen Standorte, Substrate und Rekultivierungsbedingungen nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar. Es zeichnet sich jedoch auch bei anderen Untersuchungen ab, dass großflächige Rekultivierungen ohne Verwendung von Mutterboden anfänglich praktisch regenwurmfrei sind (JUDD & MASON 1995, SCHRIEFER 1981). Ältere unregelmäßige Rekultivierungen wiesen auch bei den in Bremen von SCHRIEFER (1981) durchgeführten Untersuchungen wesentlich mehr Regenwürmer auf. Neu rekultivierte Flächen werden dort trotz günstiger Randbedingungen mit 3 - 4 m pro Jahr sehr langsam besiedelt, weil die Rohböden nur teilweise für Regenwürmer geeignet waren. Damit ist die Besiedlung im Vergleich zu neu angelegten niederländischen Poldern nur halb so schnell (MARINISSEN & VAN DEN BOSCH 1992). In Leonberg wird die Besiedlung neuer Flächen zusätzlich durch Schotterwege und befestigte Gräben erschwert. Regenwürmer wandern in der Regel bei Regenwetter. Solche Gräben können prinzipiell kaum von Regenwürmern durchquert werden, sobald sie aber Wasser führen, werden sie völlig unpassierbar, weil die Tiere weggeschwemmt werden.

Große einheitliche Rekultivierungen können zu einheitlichen Standortbedingungen führen, somit besteht auch die Gefahr, dass großflächig ungünstige Standortbedingungen entstehen. Für die Regenwürmer auf der Deponie Leonberg waren die alten kleinräumigen Rekultivierungen günstiger. Es ist aber unrealistisch, deswegen die bautechnisch günstigeren großen Rekultivierungen nicht mehr durchzuführen. Es sollten dabei aber folgende Punkte berücksichtigen werden:

- Verdichtungen beim Einbau sind zu vermeiden.
- Kompost sollte nur oberflächennah, nicht gleichmäßig und nicht überall eingearbeitet werden. Der Aufwand für eine gleichmäßige Einarbeitung ist also nicht nur unnötig, sondern hat gegebenenfalls negative Folgen.
- Im Zuge größerer Rekultivierungen sollte nach dem Bodeneinbau, d.h. nach dem letzten Befahren, an einigen Stellen Mutterboden ohne weitere Bearbeitung auf der Fläche abgesetzt werden.

4.6.2 Mikroorganismen

Einführung

Mikroorganismen stellen in der Regel den größten Biomassenanteil aller Bodenorganismengruppen. Ihnen kommt eine große Bedeutung beim Abbau der Streu (REICHLÉ 1977) und bei der Humusbildung (HAIDER 1992) zu. Ihre geringe Größe und große Zahl erlaubt ihnen, neu angelegte Flächen relativ schnell besiedeln, aufgrund ihrer kurzen Generationszeit können sie sich schnell vermehren. Das Vorkommen ist also im Gegensatz zu Regenwürmern kaum eine Frage der Besiedlung, sondern vor allem eine Frage der Nahrungsressource und der Standortseigenschaften.

Untersucht wurde im U-Feld und im K-Feld je ein Bodenprofil im Mai 2001 und im Mai 2002. An den Proben wurde die **mikrobielle Biomasse** mittels der Chloroform-Begasungs-Extraktionsmethode (VANCE et al. 1987) bestimmt. Als Maß für die mikrobielle Aktivität unter Laborbedingungen wurde die **Basalatmung** ermittelt (JÄGGI 1976).

Ergebnisse

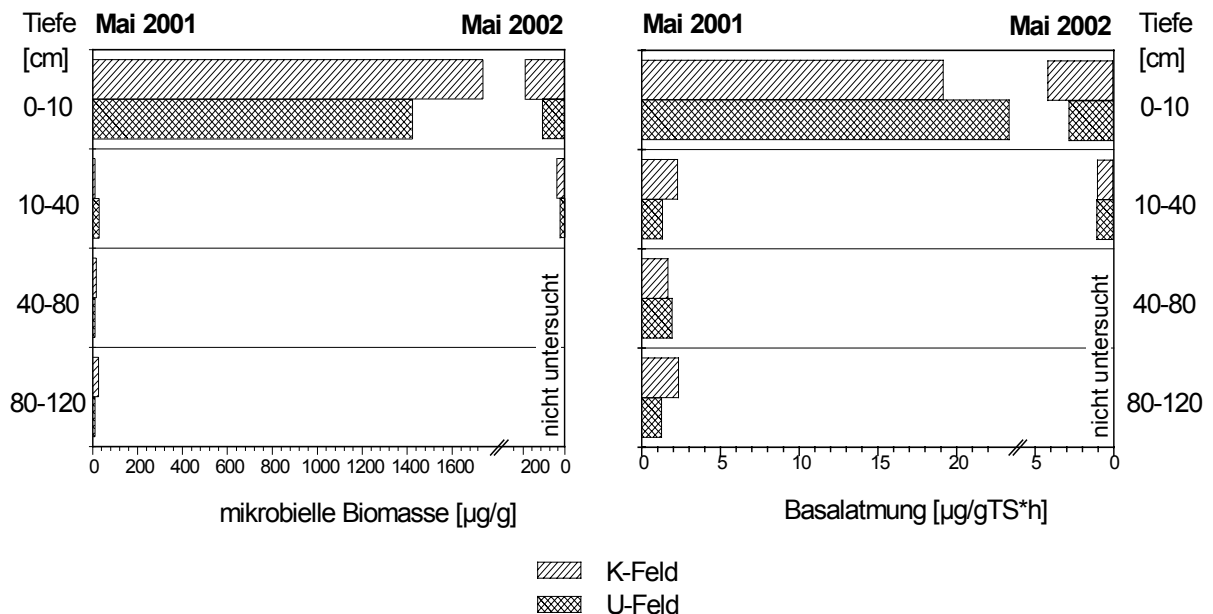


Abbildung 4-34: Mikrobielle Biomasse und Basalatmung im U- und K-Feld im Mai 2001 sowie im Mai 2002

Die mikrobielle Biomasse und die Basalatumung zeigen bei der ersten Untersuchung im Mai 2001 eine eindeutige Abfolge im Bodenprofil: In der ersten Tiefenstufe sind die Werte jeweils sehr hoch, in allen anderen Tiefenstufen sind sie dagegen sehr viel niedriger. Ursache dieser drastischen Unterschiede der Profile aus Unterbodenmaterial gleicher Herkunft ist vor allem die Kompostausbringung, denn nur der erste Horizont enthält Kompost. Die leicht abbaubare organische Substanz im Kompost ist eine sehr gute Nahrungsquelle und bedingt so einen drastischen Anstieg der Mikroorganismenpopulation. Vergleicht man diese Ergebnisse mit Daten aus Baden-Württembergischen Wäldern (SOMMER & FRIEDEL 2002) so zeigt sich, dass die Werte des sehr jungen ersten Horizonts von Leonberg den Werten von gereiften humosen mineralischen Oberböden entsprechen. In den tieferen Schichten der Versuchsfelder liegt die Basalatumung auf dem Niveau von Unterböden, die mikrobielle Biomasse sogar an der unteren Grenze der Werte von Unterböden.

Nach einem weiteren Jahr (im Mai 2002) sind sowohl die mikrobielle Biomasse als auch die Basalatumung im ersten Horizont sehr viel niedriger. Sie liegen nun deutlich unter den Vergleichswerten von Oberböden Baden-Württembergischer Wälder (SOMMER & FRIEDEL 2002). Im Unterboden hat sich – soweit Werte vorhanden sind – wenig verändert.

Der drastische Rückgang der Mikroorganismenpopulation im ersten Horizont innerhalb eines Jahres zeigt, dass zum einen die leicht abbaubare Fraktion im Kompost am Standort erschöpft ist und zum anderen durch die Vegetation am Standort noch nicht so viel organische Substanz produziert wurde, um dies zu kompensieren. Vermutlich wird es viele Jahre dauern, bis in den Versuchsfeldern die Werte hinsichtlich Substrat und Klima ähnlicher Standorte erreicht werden.

Resümee (4.6):

Für eine gelungene Rekultivierung ist ein vielfältiges Bodenleben, welches die Funktionen Streuabbau, Nährstofftransfer und Bodengefügeaufbau erfüllt, notwendig.

Die Bodenumlagerung beim Bau der Testfelder führte zu einem fast vollständigen Erlöschen der Regenwurmpopulation. Ursachen hierfür sind vermutlich neben der eigentlichen Umlagerung auch Nahrungsmangel und Verdichtung des Bodens sowie auf benachbarten Flächen die bodenbiologisch falsche Verwendung von Kompost (zu viel Kompost wurde zu tief eingebaut).

Jüngere Rekultivierungen auf der Kreismülldeponie Leonberg waren im Frühjahr 2001 daher praktisch regenwurmfrei. Eine schnelle Zunahme der Regenwurmzahlen ist aufgrund der Rahmenbedingungen nicht zu erwarten. Im Gegensatz dazu besitzen die älteren Rekultivierungen eine artenreiche Regenwurmfauna. Sie ist vermutlich eine Folge der für Regenwürmer günstigeren unregelmäßigen Ausführung dieser Rekultivierungen aber auch der günstigeren Exposition (feuchter Nordhang) und der längeren Entwicklungszeit seit Fertigstellung der Rekultivierung.

Eine schnellere Zunahme der Regenwurmpopulation ließe sich z.B. durch die Reduktion von Verdichtungen, besseres Kompostmanagement und durch Aussetzen von Regenwürmern erreichen.

Diese Ergebnisse sollten durch Untersuchungen an einigen anderen Deponieren und von weiteren Bauverfahren mit Bodenumlagerung abgesichert werden, da sie prinzipiell auch auf andere Verfahren der Rekultivierung übertragen werden können (z.B. Rekultivierung von Industriebrachen, Straßenbau).

Die Mikroorganismenpopulation der Testfelder in Leonberg wird in der Anfangsphase vor allem durch den ausgebrachten Kompost geprägt. Dessen Effekt ist aber nach kurzer Zeit verpufft, so dass aufgrund der geringen Humusgehalte der Böden die mikrobiellen Parameter deutlich unter denen vergleichbarer Waldstandorte liegen.

4.7 Vegetationsentwicklung

(P. WATTENDORF, O. EHRMANN)

Wie bereits in Abschnitt 3.1 ausführlich dargestellt, beeinflusst die Vegetation den Wasserhaushalt eines Standorts maßgeblich. Die Auswahl eines geeigneten Bewuchses bietet somit die Möglichkeit, den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten im Rahmen der standörtlichen Gegebenheiten zu beeinflussen (z.B. WATTENDORF & SOKOLLEK 2000). Die TA SIEDLUNGSABFALL (1993) schreibt vor, den Bewuchs so auszuwählen, dass die Absickerungsraten aus der Rekultivierungsschicht minimiert werden, d.h. eine hohe Transpirationsrate erreicht wird. Hohe Transpirationsraten werden nur von vitalen und üppigen Pflanzenbeständen erreicht. Besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der Durchwurzelungstiefe und -intensität zu. Diese Faktoren sind in hohem Maß von den Bodeneigenschaften abhängig. Im folgenden Kapitel werden deshalb Biomasse, Vitalität und Durchwurzelung der Bestände auf den beiden Lysimeterfeldern miteinander verglichen.

Die Versuchsfelder auf der Deponie Leonberg wurden mit Ausnahme des Buschlagenfeldes (Feld B) im Dezember 2000 sofort nach Abschluss der Erdbauarbeiten zum Schutz vor Erosion mit Winterweizen (*Triticum aestivum*) eingesät (siehe 4.2.2) und mit Zitterpappeln (*Populus tremula*) bepflanzt. Aufgrund des sehr späten Saattermins kam keine andere schnellwüchsige Kultur in Frage. Im März/April 2001 erfolgte eine weitere Einsaat mit einer konventionellen Gras-/Krautmischung, deren Zusammensetzung in Anhang 9-1 aufgeführt ist. Im November 2001 wurden weitere Gehölze (*Alnus glutinosa*, *Tilia cordata*) nachgepflanzt, um die Bestandesentwicklung zu beschleunigen und Ausfälle der Zitterpappeln (siehe 4.7.2) zu ersetzen.

4.7.1 Oberirdische Biomasse der Pflanzen (Phytobiomasse)

Die Entwicklung des im Anschluss an die Erdbauarbeiten als Erosionsschutz gesäten Winterweizens verlief sehr erfolgreich. Einerseits konnte in Verbindung mit dem besonderen Oberbodenlockerungsverfahren (siehe 4.2.2) der Abtrag von Oberboden wirkungsvoll verhindert werden, andererseits waren bereits im Frühjahr 2001 die Versuchsfelder flächendeckend begrünt. Der Weizen erreichte im Verlauf der Vegetationszeit in den Versuchsfeldern einen mittleren Deckungsgrad von ca. 95 %. In geringem Umfang am Bestandaufbau beteiligt waren vor allem noch folgende Arten aus der Ansaat: Luzerne, Steinklee, Rotklee, Weidelgras, Knautgras und Wiesenschwingel.

Für Wasserhaushaltsbetrachtungen und -simulationen, z.B. mit dem Computermodell HELP, dient meist der Blattflächenindex (siehe 4.9.2) als Eingabegröße zur Charakterisierung der Vegetationsmerkmale. Zwischen Blattflächenindex und Evapotranspiration

eines Pflanzenbestandes besteht eine positive Korrelation (vergleiche 3.1). In der Praxis ist jedoch der Blattflächenindex, vor allem bei mehrstufig aufgebauten Waldbeständen, nur sehr schwer und mit erheblichen Ungenauigkeiten zu messen. Deshalb wird meist auf empirische Werte zurückgegriffen (z.B. LARCHER 1984, WALTER 1990, BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, siehe auch HÜTTER et al. 1993), wenn Pflanzenbestände charakterisiert werden sollen. Für eine Wasserhaushaltsmodellierung ist diese Vorgehensweise hinreichend genau. Sie ist jedoch nicht zielführend, wenn die Bestände der beiden Versuchsfelder miteinander verglichen werden sollen. Aus diesem Grund wurde als Vergleichsmaß die oberirdische Biomasse (Phytobiomasse) herangezogen, da sie mit vertretbarem Aufwand sehr genau gemessen werden kann (MORITZ 1997).

Die oberirdische Biomasse der Pflanzenbestände auf den Testfeldern wurde im Juli 2001 ermittelt. Die Gewinnung des Probegutes sowie die Trocknung bei 80 °C zur Berechnung der pflanzlichen Trockenmasse erfolgte nach den Methodenvorgaben von JANETSCHKE (1982). In jedem Versuchsfeld wurde auf vier Probeparzellen von je 1 m² Größe der gesamte Pflanzenbestand direkt über dem Boden abgeerntet. Die Probeparzellen a bis d waren auf Höhe der Messstationen (siehe Abbildung 2-3) im Böschungsverlauf angeordnet, Parzelle a am Böschungsfuß, Parzelle d am Oberhang.

Tabelle 4-14: Oberirdische Phytobiomasse (Trockenmasse) auf je vier Probeflächen der Testfelder U und K im Juli 2001

[g/m ²]	a	b	c	d	Summe	Mittelwert
K	1159,0	1558,0	1273,0	1387,0	5377,0	1344,3
U	1539,0	1577,0	1387,0	1843,0	6346,0	1586,5

Wie Tabelle 4-14 zeigt, unterscheiden sich die Trockenmassen mit durchschnittlich 1587 g/m² im U-Feld und 1344 g/m² im K-Feld zwar nicht erheblich, sie sind jedoch in Testfeld U in jeder der vier Probeparzellen größer als im Kontrollfeld mit konventionell verdichteter Rekultivierungsschicht.

Die Phytomasseproduktion beeinflusst über den mit ihr verbundenen Wasserverbrauch der Pflanzen auch den Wasserhaushalt des Standortes. Messbare Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, z.B. die Absickerungsraten der Testfelder, haben die - im Hinblick auf zukünftig angestrebte Waldbestände - insgesamt noch geringen Biomassen und wenig bedeutsamen Unterschiede zwischen den Feldern für das Jahr 2001 nicht.

4.7.2 Vitalität der Gehölze

Zitterpappeln sind als so genannte „Pionier“baumart nicht nur geeignet, offene Standorte zu besiedeln und den Boden für anspruchsvollere Baumarten zu bereiten, sie legen auch bei Überdeckung der Stammbasis mit Erde ein sekundäres Wurzelsystem an. Diese Eigenschaft der Bäume sollte genutzt werden, um eine möglichst schnelle und tiefreichende Durchwurzelung zu erreichen. Sie wurden deshalb bei der Pflanzung im Dezember 2000 ca. 50 cm tief in den Boden eingebracht.

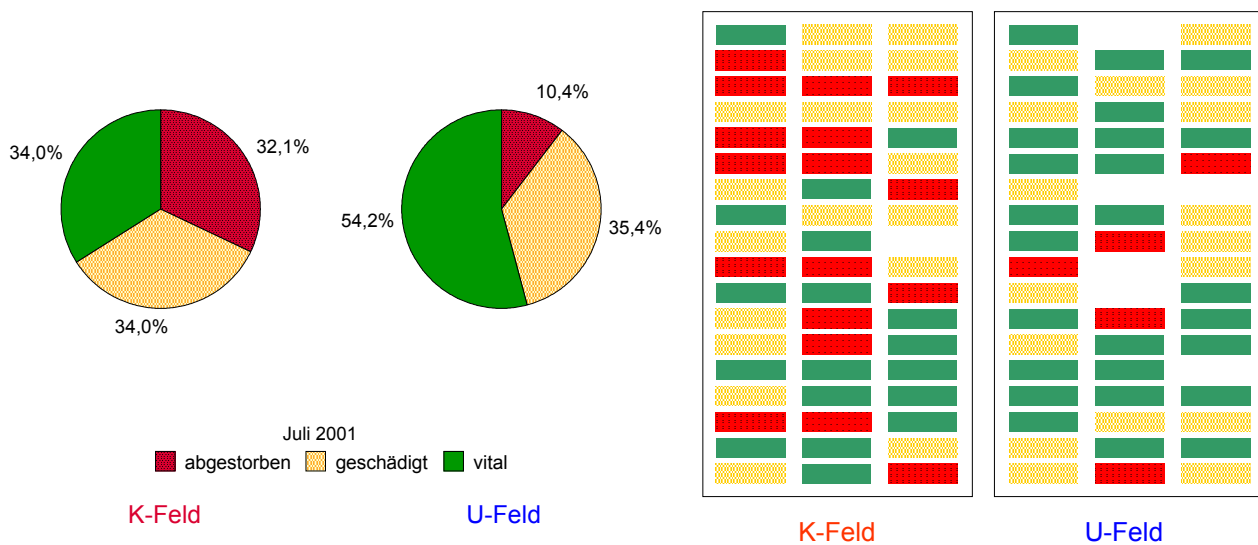


Abbildung 4-35: Vitalität der Zitterpappeln auf den Lysimeterfeldern im Juli 2001; links: Anteile der Vitalitätsstufen, rechts: Verteilung auf den Versuchsfeldern (Lücke = fehlendes Bäumchen)

Im Verlauf der ersten Vegetationsperiode nach der Pflanzung war bei den Zitterpappeln eine Reihe von Ausfällen zu verzeichnen, die überwiegend durch eine Pilzinfektion des Wurzelbereichs der Bäume verursacht wurden. Als weiteres Vegetationsmerkmal wurde deshalb der Vitalitätszustand der Zitterpappeln auf den Versuchsfeldern mit einer flächendeckenden Bonitierung im Juli 2001 untersucht. Zur Bewertung der Vitalität kam eine dreistufige Skala mit folgenden Vitalitätsstufen zum Einsatz²⁴:

I	vital	=	keine sichtbaren Schäden
II	geschädigt	=	mindestens ein abgestorbener Ast (keine Blätter, trockenes Holz)
III	abgestorben	=	keine Blätter, nur trockenes Holz

²⁴ Schäden, die auf äußere Einwirkung (Fegen, Verbiss) zurückzuführen waren, wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Vor allem hinsichtlich des Anteils abgestorbener Bäumchen unterschieden sich die beiden Testfelder erheblich (Abbildung 4-35, links). Im Kontrollfeld (K-Feld) waren 32,1% der Zitterpappeln abgestorben, im Feld mit unverdichtet eingebauter Rekultivierungsschicht (U-Feld) nur ca. 10%. Insgesamt waren im K-Feld 66 % der Zitterpappeln geschädigt oder abgestorben, im U-Feld 45 %.

Die Verteilung der Vitalitätsstufen (Abbildung 4-35, rechts) in den Flächen ist relativ gleichmäßig, jedoch nicht regellos. Geschädigte und abgestorbene Bäume treten nicht gehäuft an bestimmten Stellen auf (*Cluster*, KENT & COKER 1992), so dass kleinflächige Inhomogenitäten, z.B. punktuelle Verdichtungen, als Einflussfaktoren ausgeschlossen werden können. Es fällt jedoch auf, dass sich das Vorkommen abgestorbener und geschädigter Pappeln im K-Feld auf das obere Drittel der Böschung konzentriert. Im Gegensatz dazu ist die Verteilung vitaler Bäume im U-Feld gleichmäßiger. Die aufgrund des Einbauverfahrens in beiden Testfeldern erhöhten Bodendichten im oberen Böschungsabschnitt (siehe 4.3.1) wirken sich anscheinend nur im Feld mit konventionell verdichteter Rekultivierungsschicht nachteilig auf die Vitalität aus.

4.7.3 Durchwurzelung

Die Untersuchung der Durchwurzelung hat für die Bewertung von Standorten große Bedeutung, denn sie trägt dazu bei, Beziehungen zwischen Standort und Bewuchs zu erkennen. Insbesondere werden folgende Beziehungen betrachtet (AKS 1996):

- die gegenseitige Beeinflussung von Wurzelwachstum und Bodeneigenschaften,
- die Durchwurzelbarkeit des Bodens und
- der Einfluss des Wurzelwachstums auf den Boden.

Die Untersuchung der Durchwurzelung umfasst die Durchwurzelbarkeit²⁵, die reale Durchwurzelungstiefe und die Durchwurzelungsintensität. Als Durchwurzelungsintensität wird die Anzahl von Wurzeln pro dm² verstanden (AKS 1996).

Die Untersuchungen zur Durchwurzelung der Rekultivierungsschichten erfolgten in jeweils zwei 1,25 m tiefen Profilgruben pro Lysimeterfeld und erfassten überwiegend die Wurzeln des im Herbst 2000 eingesäten Winterweizens, der die Bestände dominierte. Die Durchwurzelungsintensität wurde in 5-cm-Tiefenstufen in 50 cm breiten Probeflächen²⁶ (= jeweils 250 cm²) nach der in AG BODEN (1994) beschriebenen Methode aufgenommen. Die Lage der Aufnahmepunkte geht aus Abbildung 2-3 hervor.

Die Durchwurzelung der beiden Profile im oberen Böschungsabschnitt Ud und Kd (Abbildung 4-36, oben) ist aufgrund der kurzen Entwicklungszeit der Vegetation noch als „sehr schwach“ (Stufe W1 = 1-2 Wurzeln/dm²) bis „schwach“ (W2 = 2-5 Wurzeln/dm²) einzustufen (Bewertung nach AKS 1996). Im Vergleichspaar Ub/Kb (Abbildung 4-36, unten) ist die Oberbodendurchwurzelung in beiden Profilen intensiver. Sie erreicht in Profil Kb bis ca. 35 cm Tiefe Stufe W4 („starke Durchwurzelung“). Im Testfeld mit unverdichteter Rekultivierungsschicht (Profil Ub) reicht die „starke Durchwurzelung“ sogar bis in ca. 55 cm Tiefe, doch fehlt auch hier noch ein ausgeprägter, für gräserdominierte Bestände typischer Wurzelfilz im Oberboden. Dieser wird sich vermutlich erst im Laufe der nächsten Jahre entwickeln.

Es ist anzunehmen, dass die stärkere Bodenverdichtung im oberen Böschungsabschnitt für die allgemein geringere Durchwurzelung der beiden Profile Ud und Kd verantwortlich ist (siehe 4.3). Eine direkte Korrelation zwischen den gemessenen Bodendichten bzw.

²⁵ Unter Durchwurzelbarkeit wird die Tiefe des Bodens verstanden, bis zu der Wurzeln tatsächlich in den Boden einzudringen vermögen. Begrenzungen sind beispielsweise Festgestein, Verfestigungen, aber auch Reduktionshorizonte. Diese Merkmale sind in den Rekultivierungsschichten der Testfelder nicht zu erwarten, so dass diese mit einer Einschränkung (siehe 4.4) nahezu vollständig durchwurzelbar sind.

²⁶ Da die Durchwurzelung in der ersten Vegetationsperiode nach der Aussaat teilweise noch recht schwach war, wurden größere Probeflächen als in der Methodenbeschreibung (100 cm²) vorgesehen ausgewertet.

Eindringwiderständen und der Durchwurzelung in der vertikalen Profilausdehnung war jedoch nicht festzustellen.

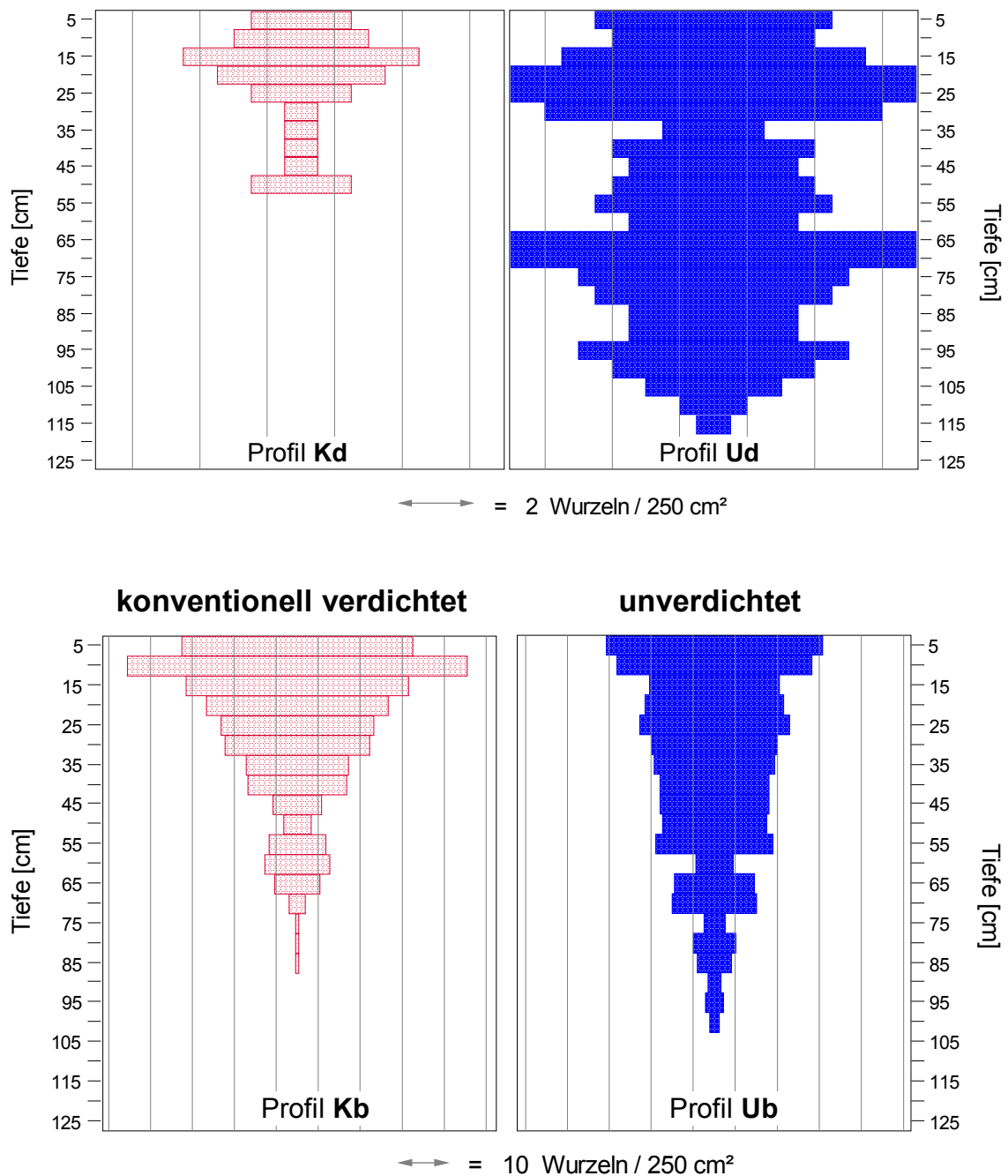


Abbildung 4-36: Durchwurzelungstiefe und -intensität (Winterweizen) in den Versuchsfeldern im Juni 2001; oben: Profile Kb/Ub, unten: Profile Kd/Ud; die x-Achsen der beiden Diagramme sind unterschiedlich skaliert.

Trotz der teilweise noch geringen Durchwurzelungsintensität der untersuchten Profile belegt die hinsichtlich der allgemeinen Fragestellung des Vorhabens relevante Tiefendurchwurzelung bereits in der ersten Vegetationsperiode deutliche Unterschiede zwischen

den Testfeldern. In den im oberen Bereich der Böschung gelegenen Profilen Kd und Ud (Abbildung 4-36, oben) sind diese Unterschiede am stärksten ausgeprägt:

Die Durchwurzelung im Profil Kd konzentriert sich lediglich auf den Oberbodenbereich, der nach Einbau der Rekultivierungsschicht mit dem Bagger aufgelockert wurde (siehe 4.2.2). Im Übergang zur ersten verdichteten Lage endet die Durchwurzelung abrupt, die Wurzeln wachsen nur noch wenig in die verdichtete Schicht ein. Die Durchwurzelung in der Tiefenstufe zwischen 25 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 tieferreichendere und weit ausgeprägtere Durchwurzelung des gesamten Unterbodens zu verzeichnen. In diesem Profil reichen auch die Schrumpfrisse etwas tiefer, was auf eine stärkere Austrocknung des Bodens durch Wasserentnahme der Pflanzen schließen lässt.

Die beiden Profile Ub und Kb sind insgesamt intensiver und tiefer durchwurzelt, trotzdem sind auch hier, wenngleich weniger deutlich, Unterschiede zwischen den Testfeldern zu erkennen. So ist zwar der gelockerte Oberboden im K-Feld intensiver durchwurzelt, im Feld mit unverdichteter Rekultivierungsschicht (U-Feld) reichen jedoch mehr Wurzeln tiefer in den Unterboden.

Resümee (4.7):

Die Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung belegen für die zum Vergleich der Testfelder herangezogenen Parameter *pflanzliche Biomasse*, *Vitalität* und *Durchwurzelung* stets eine mehr oder weniger deutlich positive Reaktion der Pflanzen auf die - zumindest geringfügig - günstigeren Standortbedingungen im Testfeld U. Insbesondere durchwurzeln die Pflanzen das unverdichtete Substrat des U-Feldes erheblich tiefer und intensiver als das lagenweise verdichtete Material im Kontrollfeld. Die Ergebnisse überraschen vor allem insofern, als dass diese Unterschiede schon im Lauf der ersten Vegetationsperiode nach Einrichtung der Felder so deutlich zutage traten.

Sollte diese Entwicklungstendenz in Zukunft anhalten, so wird die üppigere und vitalere Vegetation des U-Feldes das Substrat besser erschließen, was zu einem höheren Wasserverbrauch durch (Evapo-)Transpiration führen wird.

4.8 Ingenieurbioologischer Verbau

(G. BÖNECKE)

Durch den Einbau von Buschlagen²⁷ (Abbildung 4-37) in die Rekultivierungsschicht ist es möglich, auch bei steileren Böschungen (< 1:3) Böden locker, d.h. ohne Verdichtung, zu schütten. Ein lockerer Bodeneinbau ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass Pflanzen, vor allem Gehölze, Entwicklungsmöglichkeiten vorfinden, wie sie auf natürlichen Standorten vorherrschen. Erst dadurch kann ein Bewuchs auf abgedeckten Deponien eine wesentliche Funktion im Wasserhaushalt - die Minimierung und Vergleichmäßigung der Absickerung in die Rekultivierungsschicht - nachhaltig erfüllen (BÖNECKE 2001). Zudem ist in locker geschütteten Böden der Anwuchserfolg von Pflanzungen besser (vergleiche Abbildung 4-35), da günstigere Bodeneigenschaften vorliegen, wodurch das Wurzelwachstum stimuliert und ein vitaler Bewuchs erzielt wird (BÖNECKE 1997a, 1997b).

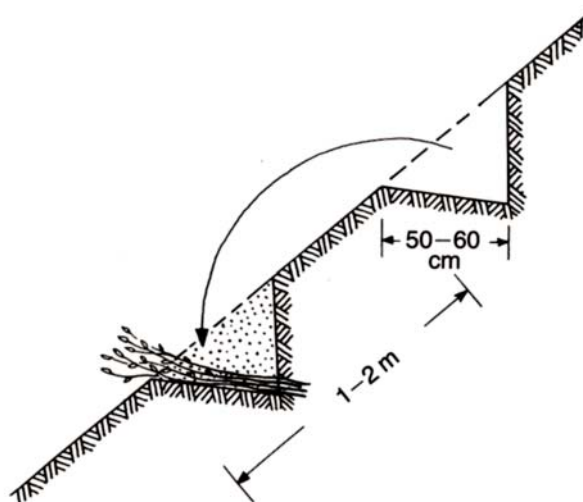


Abbildung 4-37: Prinzipskizze für die Ausführung von Buschlagen. Mit dem Bau der ersten Berme wird am Böschungsfuß begonnen. Nach dem Auslegen der Äste bzw. Pflanzen wird die erste Berme mit dem Aushub der nächsten verfüllt.

Mit dem ingenieurbioologischen Verbau eines Testfeldes mit Buschlagen konnten die hierzu für den Landschafts- und Straßenbau vorliegenden Kenntnisse (BEGEMANN & SCHIECHTL 1994, FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN 1983, SCHAARSCHMIDT 1974) beim Aufbau einer Rekultivierungsschicht an einer steilen Böschung angewendet werden. Während der Projektlaufzeit wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

²⁷ Buschlage: sog. Stabilbauweise bei der lebende Äste auf Bermen in gewachsenem oder geschüttetem Boden verlegt werden und sofort nach dem Einbau steil aufgebaute Böschungen bzw. Hänge gegen Abrutschen sichern.

- Messung des Herausziehwiderstandes an eingelegten Ästen zur Herleitung der Verbundfestigkeit zwischen Ästen und Boden
- Untersuchungen zum Wurzelwachstum (Durchwurzelungstiefe und -intensität)
- vergleichende Untersuchungen zur Wurzelentwicklung an älteren Buschlagen auf der Erd- und Bauschuttdeponie Hasenholz bei Tuttlingen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Felduntersuchen beschrieben und bewertet. Weiterhin werden Empfehlungen für die Durchführung von Lagenbauten²⁸ beim Aufbau einer Rekultivierungsschicht in steileren Böschungsbereichen gegeben.

4.8.1 Bau des Testfeldes „Buschlagen“ und Wuchsentwicklung der Buschlagen

Auf der Kreismülldeponie Leonberg wurde angrenzend an das Feld mit konventioneller Rekultivierungsschicht das Testfeld mit Buschlagen gebaut (Testfeld B). Das Feld ist ca. 20 m lang und 10 m breit, die Böschungsneigung beträgt etwa 1 : 2,7. Die Rekultivierungsschicht entspricht in Zusammensetzung und Aufbau Testfeld U (siehe 2.3.1). Durch Befahren der Fläche während des Baus des konventionellen Feldes entstanden starke Oberbodenverdichtungen. Diese wurden durch das Aufgraben der Bermen (Bild 14) nur teilweise ausgeglichen. Insoweit ergibt sich eine Abweichung vom Versuchsansatz, die Buschlagen in einem Böschungsbereich mit explizit lockerem Bodeneinbau auszuführen. Die Lagen wurden hangparallel, mit einem mittleren Abstand von 150 cm angelegt. Sie binden etwa 0,8 m tief in die Böschung ein (Bild 15). Insgesamt wurden rund 100 lfm Buschlagen gebaut. Für die Lagen wurden lebende Äste²⁹ von Weiden (*Salix spec.*, 15 – 20 Stück/lfm) und bewurzelte Aspen (*Populus tremula*, 1 – 2 Stück/lfm) verwendet. Die Ausführung entspricht somit der Definition einer sogenannten Heckenbuschlage³⁰.

Die im Dezember 2000 eingebauten Buschlagen haben sich gut entwickelt. Die Weidenäste und Aspen sind zu fast 100 % angewachsen. Die Weidenäste haben bis zum Ende der Vegetationsperiode 2001 Triebe mit einer mittleren Länge von 0,8 m gebildet, was einem durchschnittlichen bis guten Wachstum entspricht. Durch Frosteinwirkung traten im Winter 2001/02 vereinzelt Ausfälle auf. Im Frühjahr 2002 war das Antriebsverhalten wegen Trockenheit zunächst mäßig, inzwischen verläuft das Triebwachstum aber wieder durchschnittlich bis gut.

²⁸ Lagenbau: Sammelbegriff für die ingenieurbiologischen Bauweisen Buschlage, Heckenbuschlage und Heckenlage; Heckenlage: Bauweise wie Buschlage; anstelle lebender Äste werden jedoch ausschließlich geeignete bewurzelte Gehölze verwendet.

²⁹ Lebende Äste: Aststücke von Gehölzen mit der Fähigkeit zur adventiven Wurzelbildung, z.B. Weidenarten

³⁰ Heckenbuschlage: Bauweise wie Buschlage, nur werden die lebenden Äste mit geeigneten bewurzelten Gehölzen durchmischt.



14



15



16

Bild 14: Anlage der Bermen mit Teleskopbagger mit etwa 12 – 15 Grad Neigung gegen die Böschung. Mit dem Aushub wird die unterhalb liegende Lage abgedeckt.

Bild 15: Verlegen der Weidenäste auf einer Berme, die ungefähr 80 cm tief in die Rekultivierungsschicht eingeschnitten ist. Der Abstand zur unterliegenden Lage beträgt böschungsparell ca. 150 cm.

Bild 16: Messung von Auszieh Widerständen im Testfeld „Buschlagen“ im März 2001. Das eingesetzte Gerät wurde bei der Bundesanstalt für Wasserbau für Untersuchungen an Dämmen und Deichen entwickelt und von dort zur Verfügung gestellt.

4.8.2 Die Standsicherheit durch Buschlagen verstärkter Böschungen

Die statische Wirkung von Buschlagen in Böschungen wird von folgenden Komponenten bestimmt:

- In erster Linie hängt die statische Wirkung unmittelbar nach dem Einbau (= Anfangsstandsicherheit) von der gewählten Einbindetiefe und den Reihenabständen der Buschlagen ab. SCHAARSCHMIDT hat hierzu schon 1974 nachgewiesen, dass bereits der Einbau von Buschlagen die Anfangsstandsicherheit einer Böschung erhöht.
- Die Stabilisierungswirkung erhöht sich infolge der zunehmenden Durchwurzelungstiefe und -dichte im Laufe der biologischen Entwicklung,. Außerdem wachsen im Laufe der Zeit die Flächen zwischen den Lagen, gegebenenfalls unterstützt durch Saat oder Pflanzung, zu, sodass eine durchwurzelte Deckschicht entsteht, wodurch die Stabilität der Böschung zusätzlich erhöht wird (Endstandsicherheit = ca. 5 – 25 Jahre nach dem Einbau). Die Endstandsicherheit entspricht der Anfangsstandsicherheit, die sich um den durch die Durchwurzelung hervorgerufenen Anteil erhöht. Zum Nachweis der Endstandsicherheit ist es notwendig, die Durchwurzelung zu erkunden und die Wirkung der Durchwurzelung nachzuweisen (HÄHNE 1997).

4.8.3 Ermittlung der Standsicherheit – Messung des Herausziehwiderstandes

Um den Beitrag von Pflanzen zur Erhöhung der Standsicherheit von Böschungen herzuleiten wurden in der Vergangenheit verschiedene theoretische Grundlagen entwickelt und Modell- und Naturuntersuchungen durchgeführt (COPPIN & RICHARDS 1990, HÄHNE 1997, SCHAARSCHMIDT 1974, SCHUPPENER 1994, SCHUPPENER & HOFFMANN 2000). Als Modell zur Beschreibung der Wirkung der Durchwurzelung auf die Standsicherheit wird ein Anker-Dübel-Modell, wie bei HÄHNE (1997) vorgestellt, herangezogen.

Die Dübelwirkung, ausgehend von Wurzeln, die etwa rechtwinklig zur Scherfuge bzw. etwa lotrecht wachsen, wird aufgrund der Scherfestigkeit des Wurzelholzes errechnet. Die verdübelnde Wirkung hat sich für größere Böschungen allerdings als bedeutungslos erwiesen, da eine sehr große Anzahl von Wurzeln notwendig wäre, um die Standsicherheit von Böschungen wesentlich zu beeinflussen. Für die Standsicherheit vor allem größerer Böschungen maßgebend ist die Ankerwirkung, ausgehend von waagrecht bis leicht schräg nach oben oder unten in der Böschung ausgerichteten Wurzeln. Zur Erfassung der Ankerwirkung ist es notwendig, den Auszieh- oder Herausziehwiderstand zu messen (Messung der Tragfähigkeit einer Wurzel parallel zu ihrer Wuchsrichtung).

Für die Messung von Auszieh Widerständen wurde in Leonberg ein bei der Bundesanstalt für Wasserbau entwickeltes Gerät (Bild 16) eingesetzt. Mit den Messungen wurde vor dem Anwachsen der Buschlagen begonnen (1. Messreihe Januar 2001, 2. Messreihe März 2001). Dabei sollte zunächst die Verbundfestigkeit zwischen noch unbewurzelten Ästen und Boden und im Sommer/Herbst 2001 zwischen zunehmend besser bewurzelten Ästen und Boden untersucht werden.

Leider zeigte sich bereits bei den ersten Versuchen, dass mit dem vorhandenen Ausziehgerät keine aussagekräftigen Werte ermittelt werden können. Das Gerät ist so konstruiert, dass jeweils ein einzelner Ast über eine Klemmvorrichtung mit dem Kraftmessgerät verbunden wird. Die Buschlagen im Testfeld bestehen aber nicht aus einzelnen, kontaktfrei nebeneinander liegenden Ästen, sondern aus mit ihren Seitenzweigen ineinander greifenden Ast- und Kronenstücken (Bild 15). Wegen der gegenseitigen Beeinflussung der eng miteinander verzahnten Äste wurde beim Herausziehen eines einzelnen Astes daher in erster Linie der sich aus dem Verbund mit den benachbarten Ästen ergebende Widerstand gemessen. Für eine Ermittlung der Verankerungswirkung der eingelegten Äste ist es aber erforderlich, die Tragfähigkeit eines Astes gegen Herausziehen aus dem Boden und nicht aus einem Astpaket zu bestimmen. Für die Buschlagen in Leonberg wäre ein Messgerät erforderlich, mit dem Ausziehversuche an ganzen Astgruppen durchgeführt werden können. Ein solches Messgerät müsste zur Kraftmessung mit einem schweren Zugerät, wie einem Bagger oder Kran, verbunden werden. Entwicklung und Bau eines entsprechenden Geräts waren im Projekt nicht möglich.

Da aus diesen Gründen die Verbundwirkung zwischen Ast und Boden, und damit der tatsächliche Beitrag der Buschlagen zur Erhöhung der Standsicherheit der Rekultivierungsschicht im Testfeld nicht gemessen werden konnte, muss an dieser Stelle auf bereits bekannte Untersuchungsergebnisse zurückgegriffen werden. Hierbei können, aufgrund des komplexen Wirkungsgefüges zwischen eingebauten Pflanzen und Standortfaktoren, keine allgemeingültigen Zahlenangaben gemacht werden. Die in Tabelle 4-15 aufgeführten Werte sind daher Richtwerte, die auf Messungen unter Laborbedingungen an Modellen im Maßstab ca. 1:10 und Berechnungen von SCHAARSCHMIDT (1974) basieren. Für diese Modelle wurden Böden mit geringer Kohäsion (Sande) verwendet. Die Kohäsion hat eine zusätzliche böschungsstabilisierende Wirkung. Die in Tabelle 4-15 angegebenen Werte liegen somit eher auf der sicheren Seite. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass bei gut entwickelten Lagenbauten im Durchwurzelungshorizont keine Gleitfugen zu erwarten sind. Ansätze für Brüche werden durch den Lagenbau in die Tiefe verschoben. Die für die Gesamtstandsicherheit einer Deponieböschung maßgebende Gleitfugen liegen daher mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb der Rekultivierungsschicht.

Tabelle 4-15: Geschätzter statischer Wirkungsbereich von Buschlagen in gewachsenen und geschütteten Böden, ergänzt nach SCHAARSCHMIDT (1974).

Bauweise Einbau der Buschlage in	Einbinde- ¹ bzw. Wurzeltiefe ² (cm)	Reihen- abstand (cm)	Erhöhung der Stand- sicherheit (%)	Maximale Böschungs- neigung (° bzw. 1 :)	Bemerkungen
gewachsenen Boden	~ 50 ~ 100	100 - 150	10 - 40	29 – 35 1,8 - 1,4	Alle Werte gelten für Busch-, Hecken- und Heckenbusch- lagen
geschütteten Boden ³	~ 150 ~ 200	150 - 200	40 - 50	35 – 37 1,4 - 1,3	

¹: Einbindetiefe der Verbauung = Bautiefe der Berme auf der die Lagen verlegt werden;
²: Wurzeltiefe = erwartete Durchwurzelungstiefe im Endzustand, waagrecht gemessen;
³: Einbau wie in Abbildung 4-38 dargestellt.

4.8.4 Aufgrabungen zur Untersuchung der Durchwurzelungstiefe

Im Hinblick auf die statische Wirkung von Buschlagen ist für die Anfangsstandsicherheit die Einbindetiefe relevant. Die Endstandsicherheit wird später durch die Wurzeltiefe bestimmt, die über die Einbindetiefe hinaus erreicht wird. Die Durchwurzelungstiefe kann über Aufgrabungen festgestellt werden. In Leonberg und auf der Deponie Hasenholz bei Tuttlingen - hier gibt es bis zu 6 Jahre alte, in den Randdamm einer Erd- und Bauschuttdeponie eingebaute Buschlagen - wurden im Jahr 2001 Aufgrabungen durchgeführt. Die Ergebnisse liegen als Diplomarbeit vor (MÜNCH 2001).

SCHAARSCHMIDT (1974) geht nach seinen Untersuchungen davon aus, dass in gewachsenem wie in geschüttetem Boden die mit Lagenbauten im Endzustand erreichbare Wurzeltiefe etwa der Größe Einbindetiefe + ca. 50 cm entspricht (vergleiche Tabelle 4-15). Bei den in Leonberg und Tuttlingen durchgeführten Aufgrabungen³¹ konnten hierzu folgende Beobachtungen gemacht werden:

- In die Tiefe bzw. in den Hang hinein gerichtete, stark verankernd wirkende Wurzeln setzen vor allem an der Basis bzw. am basalen Schnittende der eingelegten Äste an (Basalwurzeln). Dies war besonders an den 6-jährigen Buschlagen in Tuttlingen sehr gut zu erkennen (vergleiche Bild 17 und Bild 18); initial aber auch schon bei den 1-jährigen Ästen in Leonberg und in Tuttlingen. Wurzeln im mittleren oder vorderen Astbereich waren meist seitwärts oder sogar gegen die Böschungsoberfläche gerichtet (Stützwurzeln).

³¹ Es wurden in Tuttlingen insgesamt 120 Äste, jeweils 60 *Salix purpurea* und 60 *Salix viminalis*, je zur Hälfte 1- bzw. 6-jährig und in Leonberg 30 Äste, *Salix purpurea*, 1-jährig, ausgegraben.



Bild 17: *Salix purpurea* aus einer 6-jährigen Buschlage (Deponie Hasenholz, Tuttlingen). Links die oberirdische Seite mit den gekappten Trieben. In der Mitte des Aststücks eine stärker nach unten gerichtete Wurzel. Rechts, am basalen Ende, ein ganzer Wurzelzopf mit überwiegend stärkeren Wurzeln (Basisdurchmesser > 10 mm). Vor allem die in Verlängerung des Aststücks in den Hang gewachsenen Wurzeln tragen durch ihre Ankerwirkung maßgeblich zu einer erhöhten Standsicherheit bei.



Bild 18: *Salix purpurea* aus einer 6-jährigen Buschlage (Deponie Hasenholz, Tuttlingen) mit starken basalen Wurzeln. Die Wurzel links erreichte eine Länge von über 80 cm. Rechts ist der Stumpf des gekappten, an der Basis knapp armstarken Triebes zu erkennen.

- Die Bildung von Basalwurzeln korreliert eng mit dem Einbauwinkel. Nach außen geneigte Äste bildeten kaum oder keine Basalwurzeln, dafür i.d.R. ein am vorderen Astbereich angelegtes Hauptwurzelsystem, oft mit Stützwurzel(n) (Bild 19). Horizontal eingelegte Äste entwickelten ein meist gleichmäßig über die Astlänge verteiltes, überwiegend aus dünneren Wurzeln (an der Basis < 10 mm dick) bestehendes Wurzelwerk. Nach Innen, gegen die Böschung geneigt eingelegte Äste (Einbauwinkel > 5 °), hatten ihr Hauptwurzelsystem dagegen immer im basalen Bereich.

Länge und Dicke der Basalwurzeln schwankte stark. Die längste Basalwurzel mit über 80 cm (Bild 18) wurde in den 6-jährigen Buschlagen an *Salix purpurea* gefunden. Die Länge der Basalwurzeln lag bei den 6-jährigen Ästen sonst bei 30 – 60 cm, im Durchschnitt bei 40 – 45 cm, wobei zu berücksichtigen ist, dass beim Aufgraben dünnere Wurzelenden (< 5 mm) oft abgerissen werden. Gut ausgebildete Basalwurzeln waren regelmäßig auch die dicksten Wurzeln am gesamten Ast, mit einem Basisdurchmesser von meist 10 – 20 mm und teilweise > 20 mm.



Bild 19: *Salix viminalis* aus einer 6-jährigen Buschlage (Deponie Hasenholz, Tuttlingen). Der Ast war nicht, wie für Buschlagen erforderlich, nach innen, gegen den Hang geneigt eingebaut, sondern mit einer Außenneigung von ca. 5°. Die typische Folge ist die schlechte Ausbildung der am Astende ansetzenden basalen Wurzeln. Dagegen wurde im vorderen Astbereich eine starke Stützwurzel entwickelt, die für die Böschungsstabilisierung aber unbedeutend ist.

Im übrigen haben die Aufgrabungen aus früheren Untersuchungen bekannte Ergebnisse, z.B. von SCHIECHTL (1973), bestätigt. Hierzu gehört die oben bereits erwähnte Wurzel-

verteilung in Abhängigkeit vom Einbauwinkel und die Abhängigkeit der Bewurzelungsfähigkeit vom Alter des verwendeten Astmaterials. Bei den aufgegrabenen einjährigen Buschlagen war an 1 – 2 jährigen Ästen die Wurzeldichte (n Wurzeln je cm^2 Astmantelfläche) am höchsten und nahm bei älteren Ästen deutlich ab. Bei 4-jährigem Astmaterial lag die Wurzeldichte z.B. 30 – 40 % unter den Werten der 1 – 2 jährigen Äste. Die Dicke der verwendeten Äste spielte bei der Wurzeldichte keine Rolle, dafür aber bei der oberirdischen Triebbildung. Auch hier bestätigte sich: Je größer der Astdurchmesser, desto mehr Triebe werden gebildet.

Für die Anwendung von Lagenbauten bei der Rekultivierung wird aus den Aufgrabungsergebnissen geschlossen, dass mit den Werten von SCHAARSCHMIDT bezüglich der zu erwartenden Wurzeltiefen (Einbindetiefe + ca. 50 cm) gearbeitet werden kann und die in Tabelle 4-15 genannten Werte geeignet sind, den statischen Wirkungsbereich von Lagenbauten abzuschätzen. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung des Einbauwinkels für die Bildung kräftiger Basalwurzeln und damit für die Sicherungswirkung insgesamt. Aus bodenmechanischer Sicht sollten die Lagen idealerweise senkrecht zum Winkel der inneren Reibung angeordnet werden (SCHAARSCHMIDT 1974). In der Praxis hat sich ein Einbauwinkel der Lagen von mindestens 10 Grad zum Hang bewährt.



Bild 20: Testfeld mit den eingebauten Buschlagen unmittelbar nach der Fertigstellung im Dezember 2000.



Bild 21: Erste Triebbildung an den im vorangegangenen Dezember im Testfeld eingebauten Buschlagen im Mai 2001. Der Anwuchs erfolgte sehr gleichmäßig und ohne große Lücken. Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Maßnahme.



Bild 22 Testfeld mit Buschlagen zum Beginn des Laubaustriebs im Frühjahr 2002. Die Triebe aus dem Vorjahr haben eine durchschnittliche Höhe von 80 cm erreicht. Im ausgewachsenen Zustand sind ca. 3 – 5 m zu erwarten.

4.8.5 Geeignete Gehölzarten und Einbauverfahren

Im Testfeld wurden für den Lagenbau ausschließlich Weiden (*Salix spec.*) in Form lebender Äste verwendet, die mit bewurzelten Pflanzen - dreijährige Aspen (*Populus tremula*) - ergänzt wurden. Selbstverständlich können bei Rekultivierungen sehr viel artenreichere Zusammensetzungen entstehen. Je nach Höhenlage, Exposition und Böden kommen als unbewurzelte Sprosssteile³² die in Tabelle 4-16 aufgeführten und als bewurzelte, 2 - 3-jährige Gehölze die in Tabelle 4-17 genannten Arten in Frage. Für den Einsatz als unbewurzelte Sprosssteile sind Weiden die bedeutendste Gattung. Wertvolle Hinweise für die Verwendung sowie zur Bestimmung der Arten finden sich bei SCHIECHTL (1992).

Tabelle 4-16: Für Lagenbauten in Rekultivierungsschichten gut geeignete Gehölzarten zur Verwendung als unbewurzelte und bewurzelte Sprosssteile (nach GROHMANN 2000).

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsform
<i>Berberis vulgaris</i>	Berberitze	Strauch
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Sanddorn	Strauch
<i>Ligustrum vulgare</i>	Liguster, Rainweide	Strauch
<i>Salix spec.</i>	Weide	Baum/Strauch
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	Strauch
<i>Sambucus racemosa</i>	Roter Holunder	Strauch

Zur Sicherung kleiner, potentieller Rutschflächen, gerade auch bei älteren Böschungen, ist der nachträgliche Einbau, wie im Versuchsfeld auf der Deponie Leonberg, mit oder ohne maschinelle Unterstützung ein praktikables Verfahren. Bei der Neuanlage von Rekultivierungsflächen in Steilbereichen ist der Einbau der Buschlagen während der Schüttung der Rekultivierungsschicht (Abbildung 4-38) effektiver und kostengünstiger: Die Anfangsstandsicherheit einer Böschung ist bei dieser Bauweise wegen der größeren Einbindetiefe deutlich höher und die Kosten sind geringer, da die Reihenabstände der Lagen weiter gewählt und die Arbeiten teilmechanisiert ausgeführt werden können.

Der Gesamtaufwand lässt sich bei Lagenbauten deutlich reduzieren, wenn überwiegend (> 80 %) oder ausschließlich bewurzelte Gehölze verwendet werden (Ausführung als Heckenbuschlage oder Heckenlage). Das benötigte Pflanzmaterial wird aus Baumschulen frei Baustelle bezogen, wodurch der hohe Zeitanteil für die Gewinnung lebender Äste, deren Transport und sachgerechte Lagerung teilweise bzw. ganz entfällt. Bei der Organisation des Bauablaufs muss beachtet werden, dass die Ausführung von Lagenbauten auf die hierfür günstige Jahreszeit (von der Laubverfärbung im Herbst bis spätestens zum beginnenden Laubaustrieb im Frühjahr) beschränkt ist.

³² eine Verwendung als bewurzelte Gehölze ist ebenfalls möglich

Tabelle 4-17: Für Lagenbauten in Rekultivierungsschichten gut geeignete Gehölzarten zur Verwendung als bewurzelte Sprosssteile (nach GROHMANN 2000)

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsform
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	Baum
<i>Alnus glutinosa</i>	Schwarzerle	Baum
<i>Alnus incana</i>	Grauerle	Baum
<i>Alnus viridis</i>	Grünerle	Strauch
<i>Cornus mas</i>	Kornelkirsche	Strauch
<i>Cornus sanguinea</i>	Roter Hartriegel	Strauch
<i>Corylus avellana</i>	Hasel	Strauch
<i>Evonymus europaea</i>	Pfaffenhütchen	Strauch
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gewöhnliche Esche	Baum
<i>Lonicera xylosteum</i>	Rote Heckenkirsche	Strauch
<i>Populus alba</i>	Silber-Pappel	Baum
<i>Prunus padus</i>	Traubenkirsche	Baum
<i>Salix spec.</i>	Weide	Baum/Strauch
<i>Viburnum opulus</i>	Gewöhnlicher Schneeball	Strauch

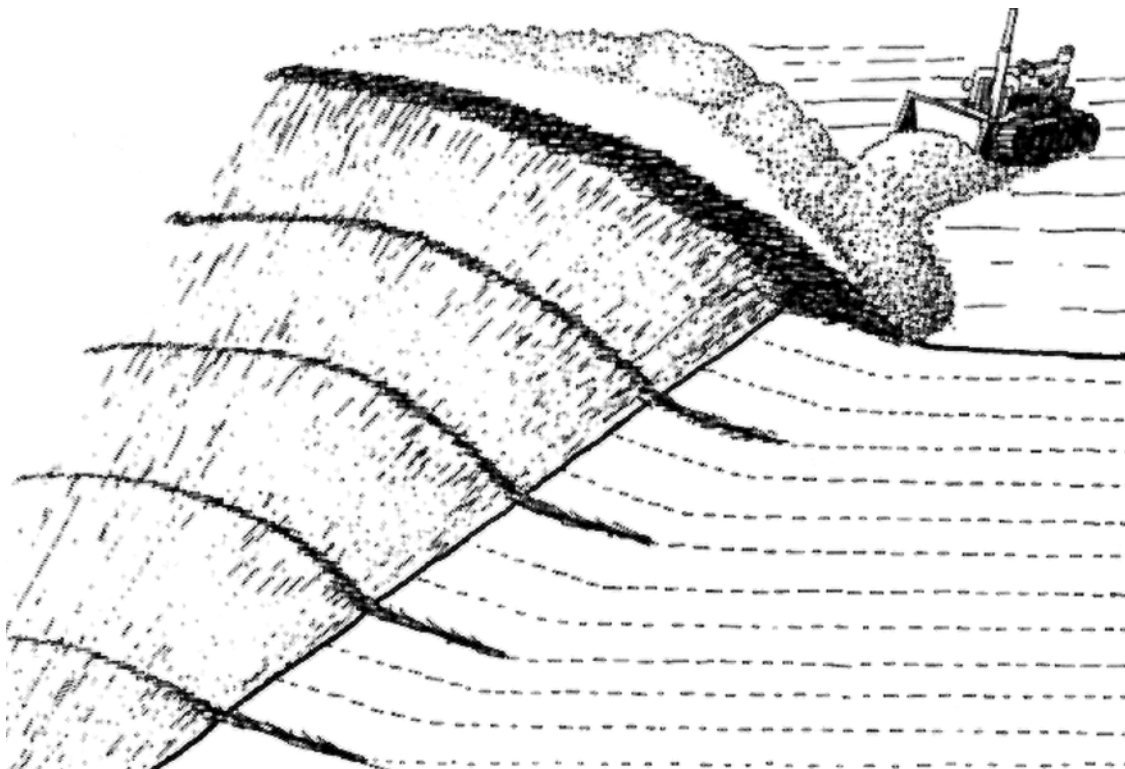


Abbildung 4-38: Lagenbau während der Schüttung (nach SCHIECHTL aus ZEH 1996).

Resümee (4.8):

Die Stabilität einer in steilen Böschungsbereichen zu schüttenden Rekultivierungsschicht kann durch den Einbau von Buschlagen unmittelbar erhöht werden (größere Anfangsstandsicherheit). Die Bodenstabilität nimmt im Laufe der Zeit noch weiter zu, da die eingebauten Pflanzen erst etwa nach > 5 Vegetationsperioden die optimal mögliche Durchwurzelungstiefe und -intensität erreichen. Wegen des relativ hohen Bauaufwandes kommen Lagenbauten nur dort in Frage, wo für die fertig eingebaute Rekultivierungsschicht ein Endzustand mit einer Neigung zwischen > 18° - 20° und < 35° - 37° realisiert werden muss. Wegen der größeren Anfangsstandsicherheit und aus Kostengründen ist der Einbau der Buschlagen während der Schüttung dem nachträglichen Einbau vorzuziehen. Für die Entwicklung von ankerähnlich wirkenden, kräftigen Basalwurzeln ist beim Einbau der Lagen eine Neigung von mindestens 10 Grad zum Hang hin einzuhalten.

Werden Äste bzw. Pflanzen mit der empfohlenen Einbindetiefe für geschüttete Böden von etwa 150 cm verlegt, ist im Endzustand, d.h. nach Erreichen der maximalen Durchwurzelungstiefe, davon auszugehen, dass die Rekultivierungsschicht in sich standfest ist. Für die Gesamtstandsicherheit einer Deponieböschung maßgebende Gleitfugen sind in diesem Fall unterhalb der Rekultivierungsschicht zu erwarten.

Unter den drei möglichen Varianten Buschlage, Heckenlage und Heckenbuschlage ist bei der Rekultivierung den beiden letztgenannten Bauweisen der Vorzug zu geben. Bei der zusätzlichen Verwendung bewurzelter Gehölze kann auf ein breiteres Artenspektrum zurückgegriffen werden. Auf diese Weise wird den jeweiligen standörtlichen Verhältnissen besser Rechnung getragen.

4.9 Wasserhaushaltsmodellierung

(P. WATTENDORF)

Die Simulation des Wasserhaushalts von Deponie-Oberflächenabdichtungen oder einzelner Komponenten mit Hilfe von Computer-Modellen ist ein heute weit verbreitetes Verfahren zum Vergleich von Aufbauvarianten oder zur Optimierung von Dichtungssystemen. Grundsätze zum Einsatz dieses Verfahrens sind in GDA-Empfehlung E 2-30 (DGGT 1998) zusammengestellt.

Modelle berechnen die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Gliedern der Wasserhaushaltsbilanz und Einflussfaktoren (siehe 3.1) in vereinfachter Weise realitätsnah und können somit eine - im Gegensatz zur klimatischen Wasserbilanz - verbesserte Abschätzung der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht liefern. Allerdings bedeutet „realitätsnah“ nicht die völlige Übereinstimmung mit der Wirklichkeit. Vielmehr müssen komplexe Vorgänge, zum Beispiel die Versickerung von Wasser im Boden, mit mathematischen Formeln in vereinfachter Form beschrieben und berechnet werden, so dass die Modellierungsergebnisse zwangsläufig von der Realität abweichen. Eine weitere wichtige Einschränkung beim Einsatz von Modellen ist, dass einige der Parameter, die Wasserhaushaltsbilanzen beeinflussen, in ihrer Wirkung (noch) nicht hinreichend genau quantifizierbar sind. Dies gilt zum Beispiel für die Transpiration und Interzeption unterschiedlich aufgebauter Vegetationsbestände. Zur Validierung bzw. Verifizierung eines Modells kann es deshalb sehr nützlich sein, gemessene Werte und Modellierungsergebnisse für einen konkreten Zeitraum gegenüberzustellen. Die Messungen von Bodenwassergehalt und Absickerung in den Lysimeterfeldern auf der Deponie Leonberg erlauben einen solchen Vergleich und damit die Überprüfung der Realitätsnähe der Modellierungsergebnisse.

Die Simulation des Wasserhaushalts der Lysimeterfelder auf der Deponie Leonberg verfolgt daher vorrangig zwei Ziele:

1. Den Vergleich der gemessenen Absickerungsraten mit den Modellrechnungen zur Validierung³³ eines Modells und
2. den Vergleich der Absickerung aus den Lysimeterfeldern mit der Absickerung einer ohne besondere Vorgaben erstellten konventionellen Rekultivierungsschicht aus der näheren Umgebung der Testfelder.

³³ Die Validierung von generischen Modellen dient der Qualitätssicherung des Abbildungsprozesses (BERGER 1998). Eine vollständige (operationale) Validierung eines Modells beinhaltet neben dem Vergleich von Modellergebnissen mit empirischen Daten noch weitere Arbeitsschritte (BERGER et al. 1999).

4.9.1 Klima von Leonberg und Witterungsbedingungen im Jahr 2001

Leonberg ist mit einem langjährigen Mittel (1961-1990) der Niederschläge von 764,2 mm/a und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10,6 °C einem feuchtgemäßigten Klima zuzuordnen. Die mittlere Gras-Referenzverdunstung (ET_0) als internationaler Standard der tatsächlichen Evapotranspiration (DVWK 1996) beträgt 550 - 600 mm/a (HAD 2000), so dass unter gemähtem Grünland und vergleichbarer Vegetation im langjährigen Mittel eine Absickerung bzw. Grundwasserneubildung in der Größenordnung von ca. 150 - 200 mm/a zu erwarten ist. Unter höherwüchsiger Vegetation, insbesondere unter Wald, ist die Versickerungsrate niedriger anzusetzen.

Messwerte der Deponiestation und nahegelegener DWD-Stationen

Auf der Deponie Leonberg wird eine Klima-Messstation betrieben, die nach einer längeren Ausfallzeit anlässlich des Forschungsvorhabens wieder in Betrieb genommen wurde, so dass aktuelle Witterungsdaten für das Jahr 2001 verfügbar sind³⁴. Die Station steht nur ca. 350 m von den Versuchsfeldern entfernt und liegt auf der gleichen Höhe, jedoch an einer nordwestlich exponierten Böschung. Allerdings verlief der Betrieb dieser Station im Jahr 2001 nicht ohne Störungen und Ausfallzeiten. Für Wasserhaushaltsbetrachtungen sind jedoch lückenlose Datenreihen erforderlich, so dass auf Daten der nahegelegenen DWD-Klimastationen Renningen und Böblingen (ca. 2 bzw. 7 km entfernt) zurückgegriffen werden muss. Deshalb wird in einem ersten Schritt für das Jahr 2001 geprüft, inwieweit die Werte der DWD-Klimastationen mit den auf der Deponie Leonberg gemessenen Klimadaten übereinstimmen und als repräsentativ für den Standort Leonberg angesehen werden können. In Abbildung 4-39 sind die monatlichen Niederschlagssummen und Monatsmittel der Lufttemperaturen vergleichend gegenübergestellt.

Die Temperatur-Tagesmittelwerte der Deponiestation zeigen durchgehend eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten der DWD-Station Böblingen und auch die Monatsmittel von Januar bis Mai sowie von November und Dezember sind gleich. Lediglich in den Sommermonaten liegen die auf der Deponie gemessenen Werte im Monatsmittel bis maximal 1,5 °C unter dem Mittel der DWD-Station. Dies kann möglicherweise durch die nördliche Exposition der Messstation in Leonberg bedingt sein. Insgesamt ergibt sich hierdurch mit 8,6 °C ein um 0,4 °C niedrigeres Jahresmittel für 2001 auf der Deponie (Böblingen 9,0 °C).

Naturgemäß ergeben sich bei den täglichen Niederschlagssummen deutlichere Abweichungen als bei der Temperatur, da Niederschläge auch kleinräumig differenziert auftreten

³⁴ Die Station auf der Deponie Leonberg misst keine Globalstrahlung.

können. Verstärkt werden die Unterschiede durch Ausfälle der Klimastation auf der Deponie, die bei den Monatssummen stärker ins Gewicht fallen als bei den Monatsmittelwerten der Temperatur. Ausfallzeiten aufgrund technischer Störungen traten vor allem in den Monaten Juli und August 2001 auf. Auf der Deponie wurden 2001 insgesamt 750 mm Niederschlag registriert, die DWD-Station Renningen verzeichnete dagegen 852 mm³⁵. Demgemäß waren auch die in Renningen gemessenen Monatssummen meist höher. Das gilt vor allem für November, wo mit 30 mm der größte Unterschied zu verzeichnen war. Dieser ist jedoch nicht durch Ausfallzeiten der Klimastation auf der Deponie begründet, vielmehr durch eine Reihe von Einzelereignissen mit relativ geringen Niederschlägen und Differenzen von bis zu 3 mm/d zwischen den Stationen.

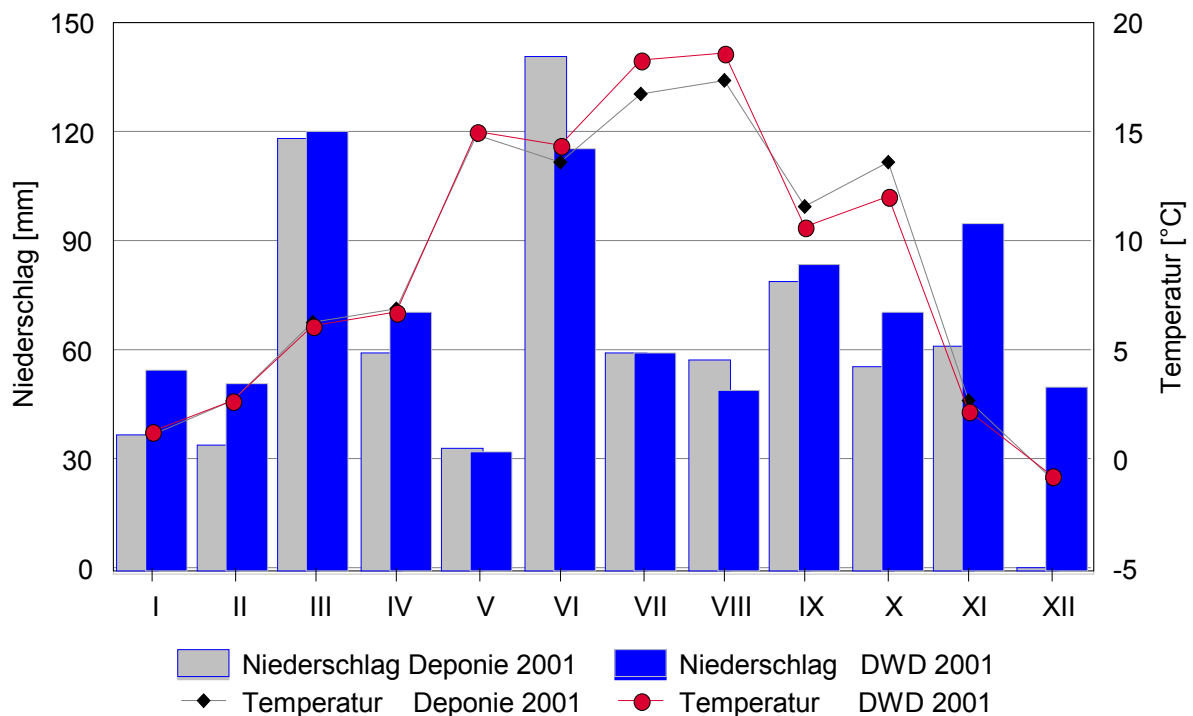


Abbildung 4-39: Monatssummen der Niederschläge und Mittel der Lufttemperatur im Jahr 2001, Deponie Leonberg und DWD-Stationen Renningen (Niederschlag) und Böblingen (Temperatur); für den Monat Dezember liegen keine Niederschlagswerte der Deponiestation Leonberg vor.

Die auf der Deponie gemessene Windgeschwindigkeit übertrifft mit 11,2 km/h Jahresdurchschnitt 2001 den für die DWD-Station Böblingen ermittelten Wert von 5,3 km/h bei weitem. Diese Tatsache ist in der exponierten Lage der Deponiekuppe begründet und muss bei der Wasserhaushaltsmodellierung berücksichtigt werden.

³⁵ Da die Dezember-Niederschlagswerte der DWD-Station Renningen noch nicht verfügbar sind, wurde ersatzweise der Niederschlag der ca. 20 km entfernten Station Hohenheim eingesetzt.

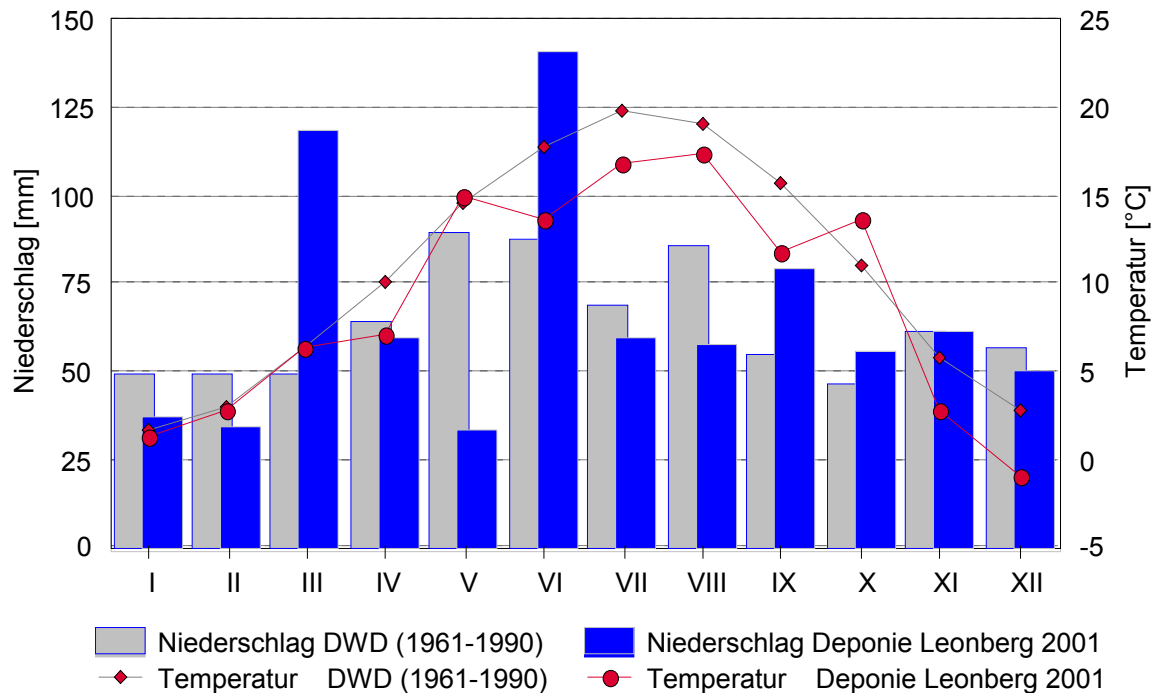


Abbildung 4-40: Monatssummen der Niederschläge und Mittel der Lufttemperatur auf der Deponie Leonberg im Jahr 2001 und langjähriges Mittel (1961-90) der DWD-Stationen Renningen (Niederschlag) und Böblingen (Temperatur)

Auch ein Vergleich der 2001 auf der Deponie Leonberg gemessenen Niederschläge und Lufttemperaturen mit dem 30-jährigen Mittel (1961 - 1990) der DWD-Stationen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Das Jahr 2001 kann somit hinsichtlich der Temperatur als durchschnittlich bezeichnet werden. Erheblich vom langjährigen Mittel abweichende Niederschlagssummen wurden vor allem in den Monaten März, Mai, Juni und Dezember verzeichnet. Während März und Juni 2001 erheblich nasser waren als der Durchschnitt, fiel im Mai und Dezember sehr viel weniger Niederschlag als üblich (Abbildung 4-40).

Im Hinblick auf die Modellierung des Wasserhaushalts und die Bewertung der Funktion einer Rekultivierungsschicht ist neben der Niederschlagssumme auch die Verteilung der Niederschläge im Lauf des Jahres von Bedeutung. Hohe Niederschläge ausserhalb der Vegetationsperiode können bei gleichen Jahresniederschlägen zu höheren Absickerungsraten führen, da sowohl die Interzeptionsverdunstung von Blattflächen als auch die Transpiration der Pflanzen im Winter mehr oder weniger stark herabgesetzt ist.

Die Verteilung der Niederschläge in Leonberg beträgt im langjährigen Mittel (1961 - 1990) ca. 60 % Sommerniederschlag gegenüber 40 % in der Zeit von November bis April. Im Jahr 2001 erreichten die Winterniederschläge 440,7 mm, die Niederschlagsverteilung war mit einem Verhältnis Sommer/Winter von 48,3 %/51,7 % relativ ungünstig für den Standort Leonberg.

Auf der Grundlage des Vergleichjahres 2001 können die Klimadaten der DWD-Stationen als repräsentativ für die Deponie Leonberg angesehen werden. Dies gilt nicht für die Windgeschwindigkeit, die den Gegebenheiten entsprechend korrigiert werden muss (s.o.). Die vom DWD zur Verfügung gestellte Datenreihe³⁶ ist lückenlos und erfüllt somit die Anforderungen für die Wasserhaushaltsmodellierung mit HELP.

4.9.2 Eingabedaten für die Wasserhaushaltsmodellierung mit HELP

Für Wasserhaushaltsmodellierungen von Deponie-Oberflächenabdichtungen wird üblicherweise das von der US-EPA entwickelte Programm HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) verwendet, das zur Zeit in der überarbeiteten deutschen Version HELP 3.5D vorliegt (SCHROEDER & BERGER 2001). HELP ist ein Schichtmodell und wurde auf deponiespezifische Anforderungen hin konzipiert. Es können Deponieaufbauten mit folgenden Komponenten berechnet werden: Rekultivierungsschicht, Dränschicht, mineralische Dichtung(en) und/oder Kunststoffdichtung. Hauptzweck ist der Vergleich des Wasserhaushalts unterschiedlicher Abdichtungssysteme an einem Standort. Das Modell bietet den Vorteil, mit relativ einfach zu erhebenden Boden- und Aufbaudaten den Wasserhaushalt auch von komplexen Oberflächenabdichtungssystemen, bestehend aus Rekultivierungs- und Entwässerungsschicht, Kunststoffdichtungsbahn sowie mineralischer Abdichtung modellieren zu können.

Als Ergebnis eines Simulationslaufes liefert HELP folgende zur Bewertung der Abdeckung relevante Ausgabedaten als Tageswerte:

- Oberflächenabfluss
- Dränabfluss
- Absickerung aus der untersten Schicht
- tatsächliche Evapotranspiration (ETa) und
- Wassergehalt der Verdunstungszone

Boden- und Aufbaudaten

Das Programm benötigt Daten zum Profilaufbau (Bodenart, Lagerungsdichte, Tiefe der Verdunstungszone) und zum Standort (geografische Lage, Hangneigung und Exposition). HELP berechnet den Wasserhaushalt eines homogenen Ausschnitts einer Oberflächenabdichtung bzw. Rekultivierungsschicht. Solche kleinsten Einheiten werden in der Bodenkunde als *Pedon* bezeichnet (SCHLICHTING et al. 1995), ihre Bodenmerkmale werden durch Bohrung oder in Profilgruben bestimmt. Als Eingabedaten der Bodenparameter für die Wasserhaushaltsmodellierung dienen grundsätzlich die bei den Profilaufnahmen in

³⁶ Die Klimadaten wurden vom DWD für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt.

den beiden Lysimeterfeldern gemessenen Werte (z.B. Lagerungsdichte, Bodenart). Nur bei den Profilaufnahmen im Sommer 2001 (Ub, Kb, Ud und Kd) konnten auch die Durchwurzelungstiefe und -intensität bestimmt werden. Deshalb werden die Daten dieser vier Profile für die Wasserhaushaltsberechnungen herangezogen. Die Lage der Profile ist in Abbildung 2-3 verzeichnet. Für die kf-Werte, die in den Versuchsfeldern mit vertretbarem Aufwand nicht bestimmt werden konnten, wurden empirische Daten aus der HELP-Datenbank (basierend auf AG BODEN 1994) eingesetzt. Eine Übersicht der für die Simulationsläufe verwendeten Boden- und Aufbaudaten findet sich in Anhang 9-2.

US-Feldkapazität: Das Programm rechnet mit der US-Feldkapazität (FC = Field Capacity), die im Gegensatz zur deutschen Feldkapazität nicht mit pF 1,8 (60 hPa) konventionell definiert ist, sondern mit pF 2,5 (330 hPa). In jedem Lysimeterfeld werden an zwei Messpunkten der volumetrische Wassergehalt und die Wasserspannung gemessen (siehe 4.5.1). So ist es möglich, die FC aus der mit diesen Werten erstellten Wasserspannungskurve zu ermitteln (HARTGE & HORN 1999). Wasserspannungskurven auf valider Datenbasis konnten jeweils nur für die Bodentiefen 85 und 135 cm erstellt werden. Da der Boden in 25 und 50 cm Tiefe im Sommer 2001 öfter austrocknete, wurde der Messbereich der Tensiometer häufig überschritten, so dass für diese Tiefenstufen keine brauchbaren Wasserspannungskurven erstellt werden konnten. Aufgrund des einheitlichen Substrates sind die Werte jedoch übertragbar. Da die Feldkapazität von der Lagerungsdichte abhängt, wurde für jede Lagerungsdichtestufe eine eigene Kurve erstellt (Anhang 9-3).

Vegetation

Als Bewuchs sieht das Programm HELP nur Gras vor. Die spezifische Evapotranspirationsleistung von Waldbeständen kann mit HELP deshalb nur unzureichend simuliert werden (BERGER 2000), woraus sich für die Abschätzung des Wasserhaushalts von aufgeförmsteteten Deponien Einschränkungen ergeben:

1. Eigenschaften des Bewuchses können nur über den Blattflächenindex (BFI bzw. LAI = L e a f A r e I n d e x) definiert werden. Die im Vergleich zu Gras höhere Verdunstungsleistung von Waldbeständen wird jedoch auch bei Eingabe höherer Blattflächenindices nicht angemessen berücksichtigt, obwohl das Programm grundsätzlich die Interzeptionsverdunstung berechnen kann³⁷. Die tatsächliche Evapotranspiration wird zu niedrig angesetzt und somit höhere Absickerungen berechnet, als in der Literatur für Wald angegeben.

³⁷ Die höhere Gesamtverdunstung von Wald ist weniger auf eine höhere Transpirationsleistung der Bäume, als vielmehr auf die hohe Interzeptionsverdunstung zurückzuführen.

2. Das Modell kann auch in mehrjährigen Simulationsreihen keine Vegetationssukzession modellieren. Veränderungen des Bewuchses müssen deshalb in einzelne Teilschritte zerlegt und nacheinander modelliert werden.
3. Das Modell setzt voraus, dass der Bewuchs aus perennierenden Arten aufgebaut ist. Pflegemaßnahmen oder Nutzung (Mahd, Mulchen usw.) sind nicht vorgesehen. Das unterschiedliche Wuchsverhalten von laubabwerfenden und immergrünen Beständen (Nadelbäumen) kann ebenfalls nicht adäquat berücksichtigt werden.

Die mit HELP berechneten Simulationsergebnisse von Rekultivierungsschichten mit Wald müssen daher unter einer Reihe von Voraussetzungen bzw. Einschränkungen interpretiert werden. Der zur Zeit auf den Versuchsfeldern vorhandene Bewuchs kann mit dem Programm ohne Einschränkungen modelliert werden, da die im Herbst 2000 und Frühling 2001 gepflanzten Gehölze im Jahr 2001 noch keine maßgebliche Wirkung auf den Wasserhaushalt entfalten konnten. Zur Berechnung längerer Zeitreihen und zum Erstellen von Prognosen muss die Vegetationssukzession (Waldentwicklung) jedoch berücksichtigt werden.

Der im Sommer 2001 auf den Lysimeterfeldern vorhandenen dichten Vegetationsdecke aus Winterweizen, Kräutern der Ansaatmischung und spärlichem Gehölzjungwuchs wurde für alle Varianten ein LAI von 5 zugeordnet (Tabelle 4-18)). Der Einfluss unterschiedlicher Bestandesdichten auf die Modellierungsergebnisse wird in einem Simulationslauf mit einem Blattflächenindex von 10 aufgezeigt (siehe Tabelle 4-19).

Tabelle 4-18: Blattflächenindices unterschiedlicher Bewuchsdichte im HELP-Modell (SCHROEDER & BERGER 2001)

Bewuchs	LAI/BFI
kein Bewuchs	0
spärlicher Grasbewuchs	1
mäßiger Grasbewuchs	2
guter Grasbewuchs	3,5
ausgezeichneter Grasbewuchs	5
Büsche	5

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Wasserhaushaltsberechnungen ist die Durchwurzelungstiefe. Nach BERGER (2001) ermittelt sich die Mächtigkeit der Verdunstungszone aus der mittleren Durchwurzelungstiefe zuzüglich des Bereichs, in dem kapillare Nachlieferung aufgrund eines Saugspannungsgradienten aus dem Unterboden erfolgen kann. Die Tiefe der kapillaren Nachlieferungszone beträgt bei Schluff ca. 20 - 45 cm, bei Ton bis ca. 30 - 150 cm.

Klimadaten

Als Eingabedaten benötigt HELP lückenlose Tageswerte von Niederschlag, Temperatur und Globalstrahlung sowie Parameter für die Verdunstung (Quartalsmittel der relativen Luftfeuchte und mittlere jährliche Windgeschwindigkeit). Für die Modellierung des Wasserhaushalts wurden die Klimadaten der DWD-Stationen Böblingen und Renningen verwendet, lediglich die mittlere Windgeschwindigkeit wurde von der Deponiestation übernommen (siehe 4.9.1).

Bezugsfläche für die Berechnungen des HELP-Modells ist die Horizontalprojektion, eine Berücksichtigung der Exposition und Böschungsneigung ist im Programm explizit nicht vorgesehen (BERGER 1999). Erforderlichenfalls muss eine Anpassung der Eingabedaten für die Globalstrahlung als einziger Strahlungskomponente erfolgen. Berechnungen von BERGER (1999) zeigen jedoch, dass in südlichen und östlichen Expositionen eine Korrektur der Globalstrahlungswerte nicht notwendig ist. Für die Wasserhaushaltsmodellierung der südostexponierten Versuchsfelder in Leonberg erfolgte deshalb keine Korrektur der Globalstrahlungswerte.

4.9.3 Vergleich der Ergebnisse: Modellierung und Messungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung für die beiden Bodenprofile Ub und Ud mit den Messwerten aus dem Lysimeterfeld mit unverdichteter Rekultivierungsschicht (Feld U) verglichen. Da die Messungen erst im Laufe des Jahres 2001 begonnen wurden, umfasst dieser Vergleich nur die Monate Juni und August bis Dezember, die Modellierung erfolgte aber für das gesamte Jahr 2001.

Absickerungsraten (As)

Die mit HELP modellierten Absickerungen aus der Rekultivierungsschicht (Dränabfluss) stimmen in der Summe sehr gut mit den gemessenen Abflussraten aus dem Lysimeterfeld überein (Tabelle 4-19). Dies gilt vor allem für Profil Ub. Abweichungen ergeben sich jedoch bei der Betrachtung der monatlichen Absickerungsmengen. Zwar weisen die Werte eine ähnliche Tendenz auf, jedoch unterschätzt HELP in den Monaten VIII bis XI die Absickerung und überschätzt sie im Juni und Dezember. Besonders deutlich sind diese Differenzen bei Profil Ud, hier überschätzt HELP den Dränabfluss im Dezember um mehr als 100 %.

Um den Einfluss unterschiedlicher Vegetationsbedeckung zu prüfen, wurde für Profil Ub ein zweiter Simulationslauf mit einem höheren Blattflächenindex (LAI = 10) durchgeführt.

Dieser Ansatz führt nur teilweise zu besseren Ergebnissen. Die Gesamt-Absickerung wird im Vergleich zu den Messungen zu niedrig berechnet, für den Juni wird sie noch stärker überschätzt und für Dezember unterschätzt. Auf die Absickerungsraten der übrigen Monate (I - V und VII - XI) hat der höhere Blattflächenindex sehr geringe Auswirkungen.

Tabelle 4-19: Dränabfluss aus Lysimeterfeld U und modellierte Absickerungsraten der Profile Ub und Ud mit unterschiedlichen Blattflächenindices und Tiefen der Verdunstungszone [Monatssummen in mm]

Monat			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Σ
Feld U gemessen			5,8	---	2,3	5,3	6,6	4,5	21,7*	46,2
Profil	LAI	VZ [cm]								
Ub	5	120	10,7	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	38,8	49,9
Ud	5	120	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	57,2	58,5
Ub	10	120	13,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,8	34,8
Ub	5	150	11,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	19,9

* vom 6.12. bis 31.12.; LAI = Leaf Area Index; VZ = Tiefe der Verdunstungszone

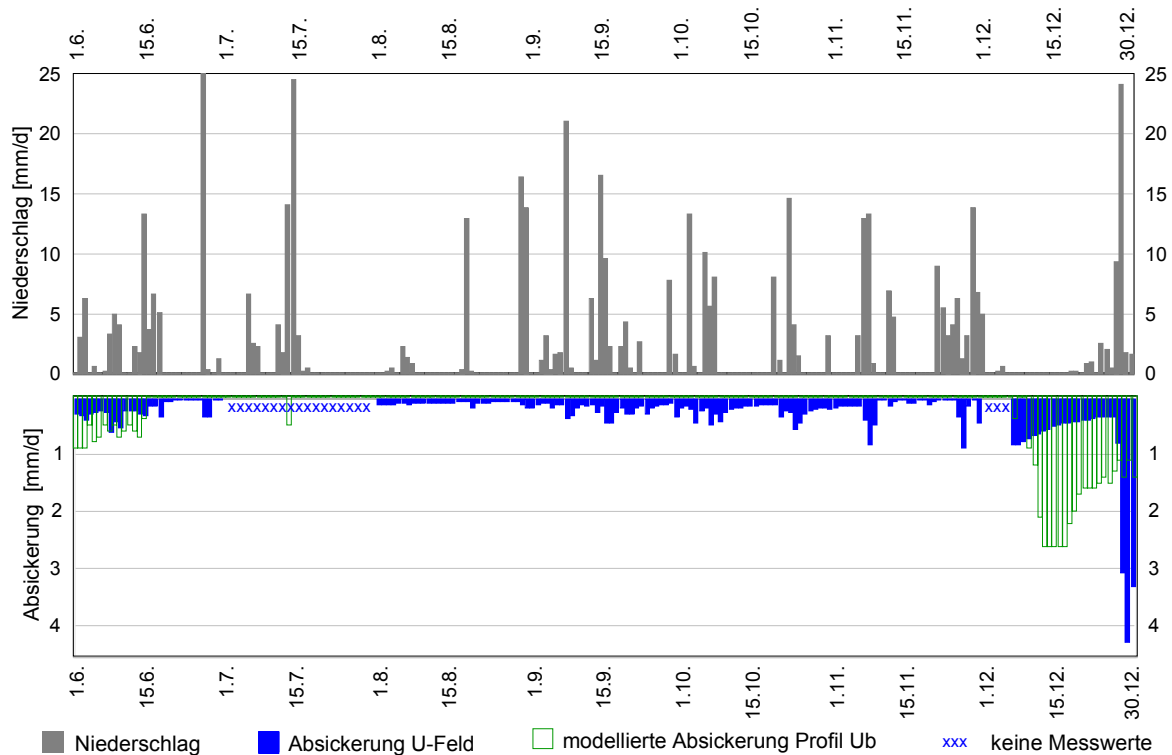


Abbildung 4-41: Vergleich: Niederschlag, gemessene Abflüsse aus Lysimeterfeld U und modellierte Absickerungsraten der Messstelle Ub (Tageswerte)

Größere Unterschiede zwischen Messwerten und Wasserhaushaltssimulation ergeben sich beim Vergleich der Tageswerte der Absickerung (Abbildung 4-41). Das Abflussverhalten im Dezember 2001 wird zwar weitgehend realitätsnah abgebildet, die Abflussmenge bis zur letzten Dezemberwoche jedoch deutlich überschätzt. Während HELP zum Ende des Monats eine rückläufige Tendenz modellierte, stiegen die Abflussraten aus dem Lysimeterfeld sprunghaft an. Mit bis zu 4,27 mm/d wurden in dieser Zeit die höchsten Absickerungen des Jahres gemessen. Vermutlich berechnete das Programm die Retention von Bodenwasser in tieferen Bereichen der Rekultivierungsschicht zu niedrig. Die berechnete Absickerung erfolgte somit gleichmäßiger als in der Realität, wo erst nach Übersättigen des Unterbodens ein abrupter Anstieg der Abflüsse erfolgte, der im Januar 2002 relativ schnell wieder versiegte (siehe 4.5.3).

Insgesamt gesehen wurden die gemessenen Absickerungsraten gut vom Programm wiedergegeben. Allerdings ist der betrachtete Zeitraum für den Vergleich zu kurz, um weitergehende Aussagen zur Modellvalidierung zu ermöglichen.

Oberflächenabfluss (Ao)

Ein weiterer Ausgabeparameter von HELP ist der berechnete Oberflächenabfluss, so dass die Simulationsergebnisse mit den Messwerten aus dem Lysimeterfeld verglichen werden können. Die Bedeutung des Oberflächenabflusses und sein Anteil an der Wasserhaushaltsbilanz von Rekultivierungsschichten wird oft stark überschätzt, denn auch an steilen Deponieböschungen kann eine dichte Vegetationsdecke Abflüsse fast vollständig verhindern. Vor allem unter Wald ist nur bei extremen Niederschlagsereignissen (nach WOHLRAB et al. (1992) ca. 30 mm mit Intensitäten > 1,7 mm/min) Oberflächenabfluss zu erwarten.

HELP berechnet für die beiden Profile Ub und Ud erheblich größere Oberflächenabflussmengen als die in Lysimeterfeld U gemessenen (siehe 4.5.3). Während im Lysimeterfeld im Jahr 2001 keine Oberflächenabflüsse registriert wurden, berechnete HELP für diesen Zeitraum 17,2 (Ub) bzw. 15,8 (Ud) mm. In diesen Beträgen ist der Abfluss infolge des Starkniederschlages am 27. Juni 2001 nicht berücksichtigt. Für dieses Ereignis, das die Messstation in Leonberg überlastete, berechnete HELP einen Abfluss von 18,8 mm, ein Wert, der in seiner Größenordnung für konventionell rekultivierte Böschungen mit glatter Oberfläche als realistisch einzustufen ist. Der Oberflächenabfluss aus den Testfeldern dürfte aufgrund der höheren Rauigkeit der Oberfläche (siehe 4.2.2.2) den modellierten Betrag bei weitem nicht erreicht haben.

Wassergehalt der Evaporationszone

Das Programm HELP gibt neben den Absickerungsraten und der Evapotranspiration (ETa) auch den gemittelten Wassergehalt der Verdunstungszone (Wurzeltiefe + kapillarer Aufstieg) als Tageswert aus. So kann überschlägig ermittelt werden, wann die Wasserspeicherkapazität des Wurzelraumes überschritten ist, so dass Absickerung erfolgen muss. Trocknet der Boden bis in den Bereich des permanenten Welkepunktes (pF 4,2 bzw. 15.000 hPa) aus, so können Pflanzen das noch enthaltene Totwasser in der Regel nicht mehr zur Wasserversorgung nutzen. Das Unterschreiten der Wassergehalte im Wurzelraum unter PWP markiert somit Zeiträume mit stark eingeschränkter Wasserversorgung und/oder Trockenstress. Aus Abbildung 4-42 ist zu ersehen, dass die von HELP modellierten Wassergehalte für das Jahr 2001 überwiegend im Bereich zwischen Wasserspeicherkapazität (WSK) und PWP angesiedelt waren. Lediglich im Juli und August 2001 wurden Wassergehalte um den PWP berechnet.

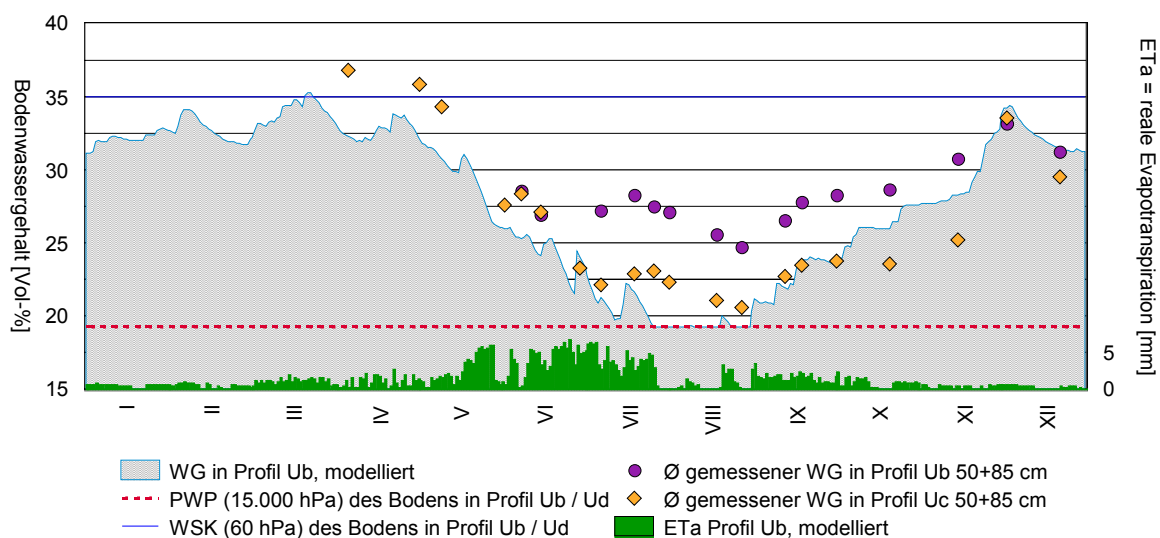


Abbildung 4-42: Vergleich des modellierten Wassergehaltes der Verdunstungszone (120 cm Tiefe) von Profil Ub mit den gemessenen Wassergehalten (Mittel der Tiefenstufen 50 und 85 cm) der Profile Ub und Uc; zusätzlich sind angegeben: Wasserspeicherkapazität (WSK, pF 1,8) und Permanenter Welkepunkt (PWP, pF 4,2), WG = Wassergehalt

In Abbildung 4-42 sind die mit HELP berechneten Wassergehalte den im Testfeld gemessenen gegenübergestellt. Da das Programm nur den über die gesamte Tiefe der Verdunstungszone (= 120 cm) gemittelten Wassergehalt ausgibt, werden zum Vergleich ebenfalls die Mittelwerte der Messungen aus den Tiefen 50 und 85 cm herangezogen. Die Wassergehalte der obersten Messstelle in 25 cm Tiefe sind nicht berücksichtigt, da sie starken Schwankungen unterliegen und ausserdem der Messbereich der Tensiometer häufig überschritten wurde. Die Abbildung zeigt eine gute Übereinstimmung der Modell-

ierungsergebnisse mit den Ergebnissen der Messungen, vor allem bei der längeren Wertereihe der Messstelle Uc. Bedeutende Unterschiede zeigen sich nur in den Monaten Juli und August. Während nach HELP der PWP erreicht wird und demnach praktisch kein pflanzenverfügbares Wasser im Wurzelraum mehr vorhanden sein sollte, ist dies nach den Wassergehaltsmessungen eindeutig nicht der Fall.

Steht nurmehr wenig oder überhaupt kein pflanzenverfügbares Wasser im Wurzelraum zur Verfügung, so müssen die Pflanzen ihre Transpiration zwangsläufig stark reduzieren. Folgerichtig verringert HELP für diese Zeiträume die ETa bis auf null. Nach den gemessenen Wassergehalten dürfte ein Zustand ohne Evapotranspiration im Sommer 2001 jedoch nicht oder nur kurzzeitig erreicht werden. Allerdings ist in den Monaten Juli und August von sehr geringen Evapotranspirationsraten auszugehen, da viele Pflanzen ihre Transpiration bereits bei Wassergehalten unter 50 % der nWSK deutlich einschränken (siehe 3.1).

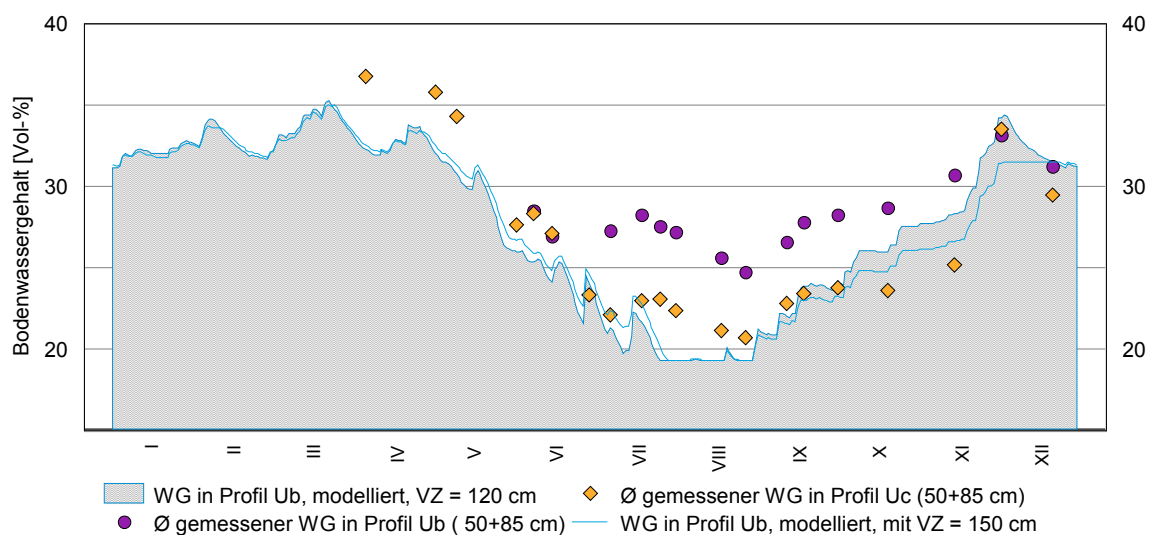


Abbildung 4-43: Vergleich des modellierten Wassergehaltes der Verdunstungszone (Profil Ub) mit den gemessenen Wassergehalten (Mittel der Tiefenstufen 50 und 85 cm) der Messstellen Ub und Uc); Tiefe der Verdunstungszone 120 bzw. 150 cm

Mit abnehmendem Wassergehalt im Oberboden steigt der Saugspannungsgradient zwischen feuchterem Unter- und trockenerem Oberboden an, Wasser wird entlang dieses Gradienten gegen die Schwerkraft kapillar nach oben bewegt. Die Aufstiegsrate und die Höhe des Aufstiegs hängen vom Saugspannungsgefälle und Bodeneigenschaften, wie der Bodenart, ab. Ein Grund für die im Sommer zu niedrig berechneten Wassergehalte kann sein, dass HELP diese Nachlieferung aus dem Unterboden unterschätzt. Um zu prüfen, ob der Bereich des kapillaren Bodenwasseraufstieges in den Wurzelraum (Tiefe 90 cm) in der ersten Modellierung mit 30 cm zu gering angesetzt war, erfolgte für Profil Ub eine zweite Modellierung mit einer Gesamttiefe der Verdunstungszone von 150 cm, d.h. einer Nachlieferungszone von 60 cm Mächtigkeit.

Wie Abbildung 4-43 zeigt, wird hierdurch keine bessere Übereinstimmung der berechneten Bodenwassergehalte mit den gemessenen erzielt. Der Zeitraum, für den das Erreichen des permanenten Welkepunkts berechnet wird, ist ähnlich lang. Nicht nachvollziehbar ist, warum HELP für die Monate Oktober bis Dezember geringere Bodenwassergehalte in der Verdunstungszone berechnete. Aufgrund dieser niedrigeren Bodenwassergehalte nimmt HELP für den Monat Dezember eine Absickerung von lediglich 6,6 mm an, so dass auch die Absickerungsraten dieser Berechnungsvariante nicht gut mit den gemessenen Sickerwassermengen übereinstimmen (Tabelle 4-19).

4.9.4 Vergleich der modellierten Absickerung aus U- / K-Feld und Profil 1

Für die Testfelder in Leonberg liegen bisher nur über einen kurzen Zeitraum Messergebnisse vor. Deshalb soll mit Hilfe einer Wasserhaushaltsmodellierung für das gesamte Jahr 2001 abgeschätzt werden, wie sich die beiden Aufbauvarianten K (= konventionelle Verdichtung) und U (= unverdichteter Einbau) im jetzigen Zustand hinsichtlich ihres Wasserhaushalts unterscheiden. Da in beide Versuchsfelder sehr mächtige Rekultivierungsschichten mit hoher nutzbarer Feldkapazität eingebaut wurden, beinhaltet die Wasserhaushaltsbetrachtung auch den Vergleich mit einer nach gängigen Vorgaben im Jahr 2000 hergestellten Rekultivierungsschicht (Profil 1) in unmittelbarer Nähe der Versuchsanlage. Die Vegetation im Umfeld dieses Vergleichsprofils setzt sich aus ein- und mehrjährigen Stauden und Gräsern zusammen. Die im Zuge der Rekultivierung gepflanzten Gehölze beeinflussen ebenso wie auf den Versuchsfeldern den Wasserhaushalt im Vergleich zu den krautigen Arten nur geringfügig. Die aktuelle Bestandesdichte wurde wie auf den Testfeldern mit einem Blattflächenindex von 5 eingestuft. Weitere Eingabedaten für die Wasserhaushaltsmodellierung des Vergleichsprofils finden sich in Anhang 9-2.

Tabelle 4-20: Wasserhaushaltsmodellierung für das Jahr 2001: Jahressummen des Oberflächenabflusses, der Evapotranspiration und der Absickerung, Vergleich der beiden Testfelder mit einer Rekultivierungsschicht in der Umgebung (Profil 1)

Profil	Ao	ETa	ETa-Ø	As	von N	As-Ø	von N
	mm	mm	mm	mm	%	mm	%
Ub	51,3	527,5	525,7	276,1	32,4	279,3	32,8
Ud	45,7	523,9		282,4	33,2		
Kb	40,2	515,1	492,3	295,1	34,6	321,4	37,7
Kd	35,6	469,5		347,6	40,8		
Profil 1	38,4	463,7		349,0	41,0	349,0	39,2

Tabelle 4-20 enthält die von HELP berechneten Jahressummen von Oberflächenabfluss, Evapotranspiration und Absickerung aus den Versuchsfeldern und dem Vergleichsprofil 1 für das Jahr 2001. Die berechneten Oberflächenabflüsse (Ao) differieren entsprechend der Hangneigung und der Bodenart des Oberbodens. Aufgrund des aussergewöhnlichen Niederschlagsereignisses vom 27. Juni 2001 sind sie insgesamt sehr hoch. Profil 1 weist vor allem aufgrund der geringen Durchwurzelungstiefe bzw. Tiefe der Verdunstungszone (24 cm / 30 cm; siehe Anhang 9-2) die niedrigste Evapotranspirationsrate auf. Auch im relativ flach durchwurzelten Profil Kd (siehe 4.7.3) bleibt die tatsächliche Evapotranspiration (ETa) mit 469,5 mm/a in der gleichen Größenordnung. Bereits im Ist-Zustand unterscheiden sich die beiden Lysimeterfelder hinsichtlich der Evapotranspiration bzw. der

Absickerung somit erheblich. Während für das Jahr 2001 im Mittel für Testfeld U 279,2 mm Absickerung (A_s) berechnet wurden, sind für Feld K 321,4 mm anzunehmen. Die Absickerung aus dem Vergleichsprofil (Profil 1) beträgt 349,0 mm.

Die monatlichen Absickerungsraten weisen aufgrund der Niederschlagsverteilung im Jahr 2001 in den drei modellierten Profilen eine ähnliche Verteilung auf (Abbildung 4-44). Aufgrund der höheren Wasserspeicherkapazität berechnete das Modell für Testfeld U zeitweise höhere Absickerungsraten als für das K-Feld.

Ein deutlich anderes Absickerungsverhalten zeigt das Vergleichsprofil. Aufgrund der geringeren Wasserspeicherkapazität versickern bereits ab September erhebliche Wassermengen in den Untergrund. Die größten Absickerungsmengen sind im März und im November, zeitgleich mit den höchsten Niederschlägen, zu verzeichnen. Lediglich im Monat Juli verursachen die hohen Niederschläge wegen der ebenfalls hohen Evapotranspiration keinen Anstieg der Absickerungsrate.

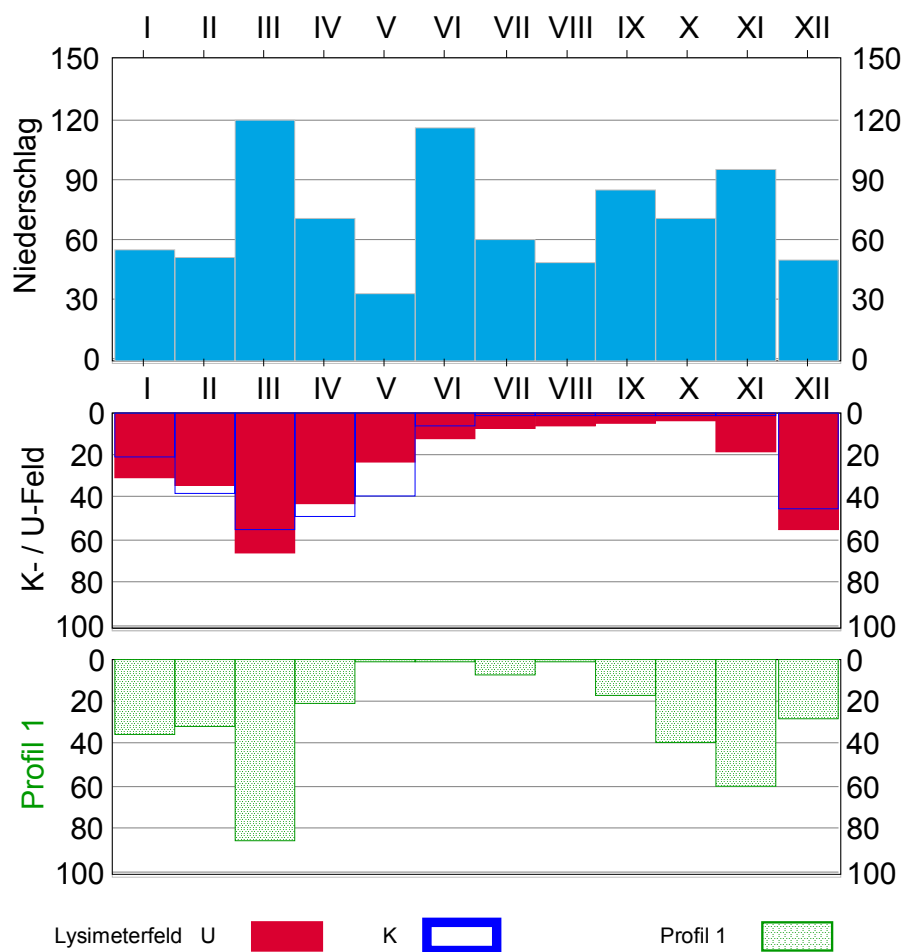


Abbildung 4-44: Wasserhaushaltsmodellierung: Niederschlag und monatliche Absickerungsraten aus den Lysimeterfeldern U und K und Vergleichsprofil 1

Die Betrachtung der Tageswerte von Niederschlag und Absickerung verdeutlicht weitere Unterschiede zwischen den Testfeldern und dem Vergleichsprofil (Abbildung 4-45). Das Abflussregime der beiden Lysimeterfelder ist sehr viel gleichmäßiger als das des Vergleichsprofils. Die berechneten maximalen täglichen Sickerwassermengen aus den Testfeldern bleiben meist deutlich unter 5 mm, während für das Vergleichsprofil Abflussspitzen von über 13 mm/d berechnet wurden. Tage mit geringer oder ohne Absickerung wechseln sich ab mit Zeiten hoher Absickerungsraten. Dieses Verhalten ist, unabhängig von der Gesamt-Absickerungsrate, hinsichtlich der Gefahr einer zeitweisen Überlastung von Entwässerungseinrichtungen oder Dichtungskomponenten (Kapillarsperre) sehr viel ungünstiger als der gleichmäßige Abfluss aus den Lysimeterfeldern. Auch unter dem Aspekt, die Austrocknungsgefährdung der mineralischen Dichtungselemente zu verringern, werden möglichst gleichmäßige, geringe Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht angestrebt (siehe 6.1).

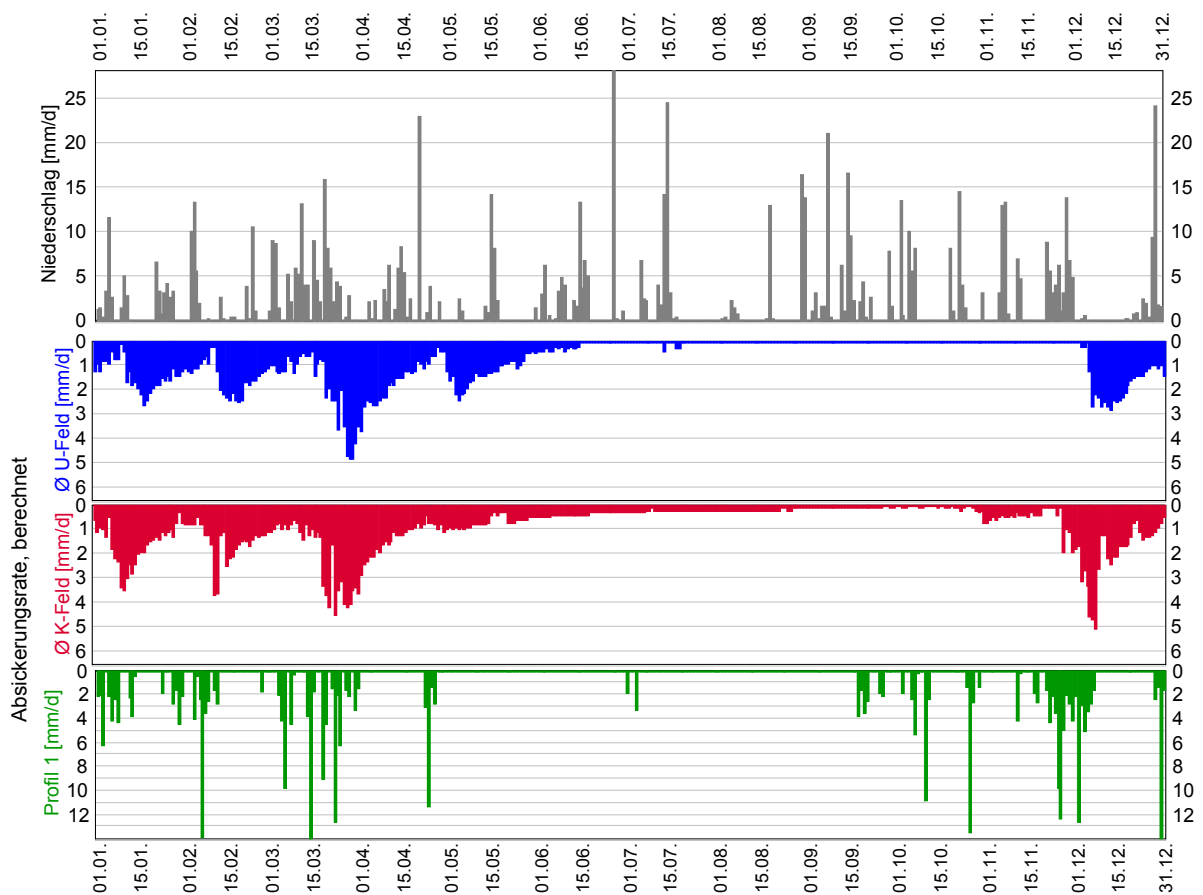


Abbildung 4-45: Wasserhaushaltsmodellierung: Niederschlag und Absickerungsraten aus den Testfeldern U und K und Vergleichsprofil 1, Tageswerte

Resümee (4.9):

Messergebnisse aus den Lysimeterfeldern liegen erst ab Juni 2001 vor. Dieser Zeitraum ist viel zu kurz, um aussagekräftige Wasserhaushaltsbilanzen oder Studien zur Modellvalidierung zu erstellen. Trotzdem sind Tendenzen zu erkennen.

Das Modell HELP lieferte für den Betrachtungszeitraum in der Summe brauchbare Absickerungsraten. Die Betrachtung einzelner Monate zeigt deutliche Unterschiede zwischen Messung und Modellergebnis. Der Oberflächenabfluss wird vom Modell sehr stark überschätzt, vor allem wohl aufgrund der besonderen Oberflächengestaltung, die das Modell nicht berücksichtigen kann. Die Wassergehalte der Verdunstungszone werden gut wiedergegeben.

Die Wasserhaushaltsmodellierung für das Jahr 2001 zeigt Unterschiede zwischen den Testfeldern und zu den Rekultivierungen der Umgebung der Versuchsanlage. Die geringsten Absickerungsraten werden für Lysimeterfeld U berechnet; die konventionell ausgeführten Rekultivierungsschichten verursachen zwischen 40 und 60 mm/a höhere Absickerungsraten.

5 Ergebnisse II: Wirkung von Wurzelsperren

(P. WATTENDORF, O. EHRMANN)

5.1 Funktion und Eigenschaften von Wurzelsperren

Die TA SIEDLUNGSABFALL fordert für Rekultivierungsschichten eine Mindestmächtigkeit von einem Meter. Untersuchungen zum Wurzelwachstum von Pflanzen (z.B. LEHNHARDT & BRECHTEL 1980, LINERT 1995) zeigen, dass diese Mächtigkeit bei Weitem nicht ausreicht, um ein Einwachsen von Wurzeln in die unter der Rekultivierungsschicht liegenden Systemelemente zu verhindern. Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, können die Dichtungselemente des TASI-Regelaufbaues und gleichwertiger Systeme in unterschiedlichem Maß von einer Durchwurzelung in ihrer Funktion beeinträchtigt werden (BRAUNS et al. 1997). Die Entwicklung von tief wurzelnden Pflanzen, insbesondere Gehölzen, auf der Rekultivierungsschicht ist einerseits unter Aspekten des Wasserhaushaltes (siehe 3.2) erwünscht. Andererseits wäre eine natürliche Besiedlung mit tiefwurzelnden Pflanzen auf Dauer auch kaum zu verhindern, denn nicht nur Gehölze, sondern auch eine große Zahl krautiger Pflanzen, beispielsweise Distel-Arten, können sehr tiefreichende Wurzelsysteme ausbilden.

BRAUNS et al. empfehlen deshalb zum Schutz von Entwässerungsschicht und Dichtungssystem das Aufbringen einer mehr als 2 m mächtigen Rekultivierungsschicht. Doch auch solche Schichtdicken bieten keinen absoluten Schutz vor Tiefendurchwurzelung. Deshalb liegt es nahe, Wurzelsperrschichten zwischen Rekultivierungsschicht und Dichtung einzubauen, um das Einwachsen von Pflanzenwurzeln in sensible Dichtungselemente zu verhindern.

Aus der bodenkundlichen und forstwissenschaftlichen Literatur liegen Erkenntnisse von natürlichen Standorten über Bodeneigenschaften vor, die das Wurzelwachstum begrenzen:

1. In der Natur sind dies vor allem Bodenverdichtungen, die oft mit Sauerstoffmangelsituationen im Unterboden aufgrund von Staunässe verbunden sind (siehe 4.4). Neben dem mechanischen Hindernis der hohen Lagerungs- bzw. Trockenraumdichte wirkt also auch noch O₂-Mangel als physiologische Barriere. Staunässe in der Rekultivierungsschicht darf jedoch aus Gründen der Standsicherheit in Oberflächenabdichtungssystemen nicht hergestellt werden (siehe hierzu jedoch 4.5.1). Weiterhin würde Staunässe auch die erwünschte intensive Durchwurzelung des Rekultivierungssubstrats verhindern.
2. Bodenhorizonte mit ungünstigen chemischen Eigenschaften wie sehr hohen oder niedrigen pH-Werten oder hohen Konzentrationen phytotoxischer Stoffe werden nicht oder kaum durchwurzelt.

3. Durch das Ausfällen von Kittsubstanzen wie beispielsweise Kalk oder Eisenoxiden hervorgerufene Verfestigungen von Boden setzt den Pflanzenwurzeln erhebliche mechanische Widerstände entgegen. Solche Verfestigungen können weniger perkulationshemmend sein als die darüber- oder darunterliegenden Bodenhorizonte (SCHEFFER et al. 1992). Doch auch unverkitteter, verdichteter Sand behindert das Wurzelwachstum von Bäumen massiv, da die Anordnung der Sandkörner nur mit erheblichem Druck verschoben werden kann (KÖSTLER et al. 1968).
4. Bodenschichten oder -horizonte mit sehr geringen Nährstoffgehalten und wenig pflanzenverfügbarem Bodenwasser bieten keinen Anreiz zur Durchwurzelung. Solche Horizonte können jedoch nur dann eine gewisse Sperrfunktion erfüllen, wenn die Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanzen aus dem darüberliegenden Boden gedeckt wird, so dass kein Anreiz zum Tiefwurzeln besteht.
5. Ein sogenannter „Körnungssprung“, d.h. ein abrupter Wechsel der Bodenart behindert meist ebenfalls das Wurzelwachstum. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn das unterliegende Substrat ungünstige Bodeneigenschaften besitzt, z.B. ein nährstoffarmer Kies oder Sand unter nährstoffreicherem Lehm. So belegen Untersuchungen in Deichen mit Kieskern (BLW 1990), dass Kiesschichten das Wurzelwachstum stark hemmen konnten, wenn darüber ausreichender Wurzelraum zur Verfügung stand. Als absolute Wachstumssperre kann ein solcher Körnungssprung jedoch nicht wirken.

Technische Wurzelsperren bilden diese von Natur aus ungünstigen Bodenbedingungen künstlich nach. Hierzu kommen für den Einsatz in Oberflächenabdichtungen grundsätzlich neben technischen Systemen („Wurzelsperrmatte“) und natürlichen Materialien auch Produkte aus industriellen Prozessen oder dem Bauschuttrecycling in Frage. Wurzelsperren müssen im Allgemeinen folgende Eigenschaften besitzen:

- Sie müssen das Wurzelwachstum dauerhaft aufhalten oder zumindest deutlich begrenzen.
- Sie dürfen sich nicht negativ auf die Standsicherheit des Systems "Oberflächenabdichtung" auswirken.
- Sie dürfen keine nachteiligen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht und die Funktion der Entwässerungsschicht haben. Verdichtete bindige Bodenarten (z.B. Lehme, Tone) kommen deshalb nicht als Wurzelsperren in Frage, da sie sehr viel geringere Wasserdurchlässigkeiten aufweisen als die darüberliegenden Substrate und deshalb ein Wasseraufstau in der Rekultivierungsschicht zu erwarten ist.
- Die zur Herstellung der Barrieren verwendeten Materialien sollen allgemein verfügbar sein. Die Wurzelsperren müssen mit den üblichen Verfahren der Baupraxis mit vertretbaren Baukosten herzustellen sein.

Aus diesen allgemeinen Erkenntnissen wurden die Wurzelsperrmaterialien für den Einbau in die Testfelder ausgewählt (siehe auch 2.3.2). Folgende Überlegungen lagen der Auswahl von Versuchsvarianten zugrunde:

1. Wurzelsperrmatte:

Die Wurzelsperrmatte³⁸ besteht aus einer gelochten Kupferfolie mit beidseitig aufgebrachtem Geotextil. Die Wirkung der Matte beruht auf der pflanzentoxischen Wirkung von Kupfer-Ionen. Um die Wasserdurchlässigkeit sicherzustellen ist sie mit ca. 1 mm großen Löchern versehen. Das Produkt wurde bereits in einem Laborversuch mit Gräsern (NEURURER 1997a) und in einem 2½-monatigen Freilandversuch mit Gräsern, Kräutern und Sträuchern (NEURURER 1997b) getestet. Ergebnisse von Langzeituntersuchungen liegen jedoch nicht vor.

2. Dränbeton:

Dränbeton besteht aus Kies grober Körnung, Zement und Wasser. Die Kieskörner werden durch eine Zementhülle miteinander verkittet. Im Gegensatz zu konventionellem Beton entfällt jedoch der Sandanteil, so dass die Hohlräume, Haufwerks-poren genannt, zwischen den groben Kieskörnern nicht ausgefüllt werden. Hierdurch bleibt der Dränbeton wasserdurchlässig. Er setzt den Pflanzenwurzeln mechanischen Widerstand entgegen und bietet durch fehlende Wasser- und Nährstoffgehalte keinen Anreiz zur Durchwurzelung. Nach DRINKGERN (1999) wurde bisher noch nicht beobachtet, dass Wurzeln in Dränbeton eindringen.

3. verdichteter Sand:

Verdichteter reiner Sand wirkt wurzelhemmend, indem er den vordringenden Pflanzenwurzeln einen mechanischen Widerstand entgegensetzt. Weiterhin ist er sehr nährstoffarm und besitzt keine hohe nutzbare Wasserspeicherkapazität (ca. 10 - 15 Vol-%).

4. verdichteter Recycling-Glassplitt³⁹:

Das Substrat wird durch Schreddern von Altglas gewonnen. Es enthält neben Glas nur geringe Anteile von Papier, z.B. von Flaschenetiketten (ZIMMERMANN o.J.). Das Material kann aufgrund seiner Korngrößenverteilung praktisch kein Wasser speichern und ist auf Dauer nährstofffrei, denn auch durch Verwitterungsprozesse werden fast keine Nähr- oder Schadstoffe eluiert (ZIMMERMANN o.J.). So setzt es den Wurzeln einen mechanischen Widerstand entgegen und bietet keine Anreize zur Durchwurzelung. Weiterhin kommt auch der Effekt des „Körnungssprunges“ zum Tragen.

Die Wurzelsperren-Versuchsfelder wurden mit diesen Varianten auf die in Kapitel 2.3.2 beschriebene Weise aufgebaut.

³⁸ Hersteller: Fa. Linteco, Linz, Österreich

³⁹ Hersteller: Fa. Zimmermann, Bad Säckingen

5.2 Wasserhaushalt der Versuchsfelder

Bei den ersten Aufgrabungen zur Untersuchung der Wirkung der vier Wurzelsperren-Varianten im September 2000 fiel auf, dass der Boden (Rekultivierungsschicht) über den verschiedenen Sperren unterschiedlich feucht war. Diese Feststellung wurde zum Anlass genommen, die Bodenfeuchte über den Wurzelsperren eingehender zu betrachten. Hierzu wurden in jedem Testfeld zwei Sensoren zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes (TDR-Methode, siehe 4.5.1) in 5 und 30 cm Abstand zur Wurzelsperre, d.h. in ca. 20 und 45 cm Bodentiefe, installiert und in unregelmäßigen Intervallen abgelesen. Der Wassergehalt der Bodenoberfläche konnte bei Bedarf begleitend mit einem TDR-Einstichsensor gemessen werden.

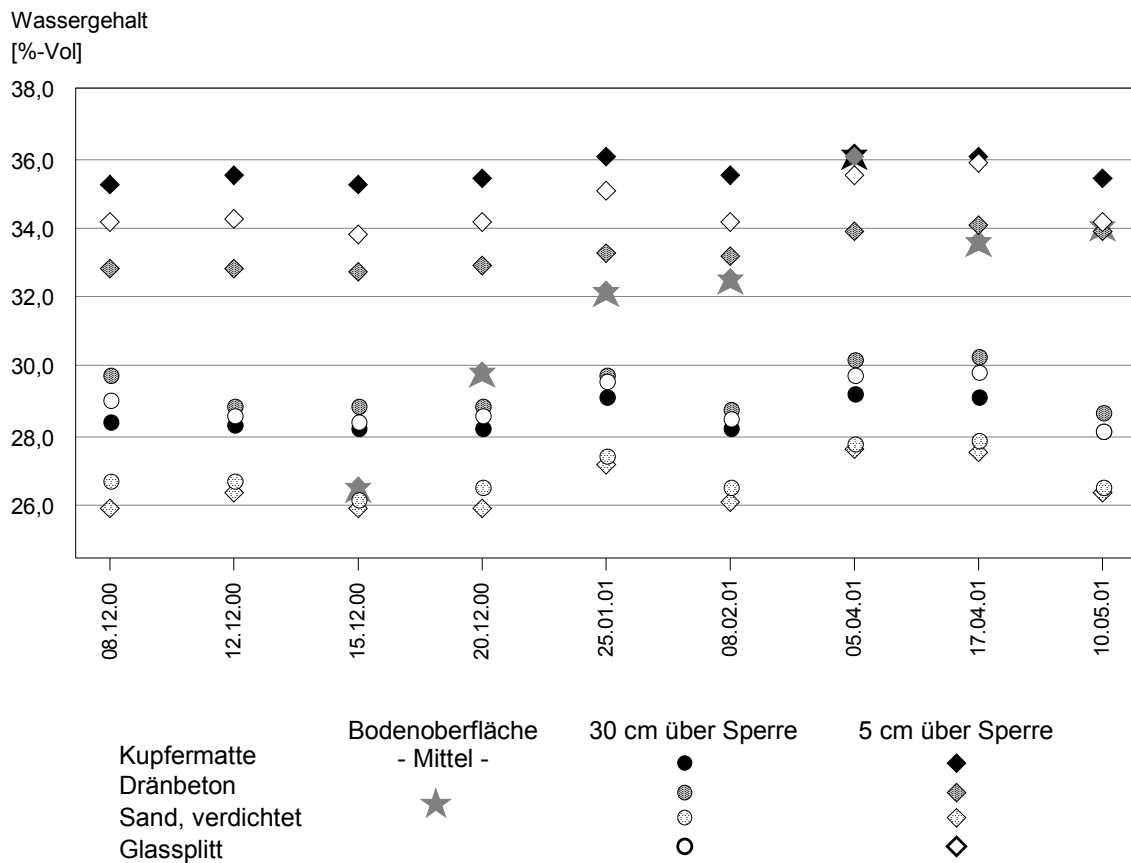


Abbildung 5-1: Wassergehalt des Bodens über den Wurzelsperren (Testfeld Freiburg) in der Zeit von Dezember 2000 bis Mai 2001

In Abbildung 5-1 sind die Wassergehalte der Testfeldböden über den Wurzelsperren dargestellt. Es wird deutlich, dass lediglich bei der Variante *Sand, verdichtet* der Boden in 5 und 30 cm Abstand zur Wurzelsperre annähernd gleiche Wassergehalte aufweist. In den übrigen Testfeldern sind zu allen Messterminen 5 cm über der Wurzelsperre deutlich

höhere Wassergehalte als in der Mitte der Rekultivierungsschicht (30 cm Abstand) zu verzeichnen. Alle Wurzelsperrenvarianten ausser dem Sand verursachen demnach einen Wasseraufstau in der Rekultivierungsschicht, obwohl sie auf eine hohe (gesättigte) Wasserdurchlässigkeit ausgelegt wurden.

Als Ursache für den Wasseraufstau in der Rekultivierungsschicht ist eine unterschiedliche Porengrößenverteilung und damit eine andere ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktion in Boden und Wurzelsperre zu sehen. Die Wurzelsperre wirkt somit wie der Kapillarblock einer Kapillarsperre (siehe MELCHIOR et al. 1996) und die der vertikalen Wasserbewegung unter Schwerkrafteinfluss entgegenwirkenden Kräfte müssen durch Aufsättigung des Bodens erst überwunden werden. Lediglich der Sand ist in seinem Aufbau dem darüberliegenden Boden so ähnlich, dass auch ungesättigter Wasserfluss ohne nennenswerte Verzögerung stattfinden kann. Das gleiche gilt sinngemäß für die Wurzelspermatte, die ebenfalls die Porenkontinuität des Bodens unterbricht und Wasser aufstaut.

Die Auswirkungen dieses Effektes ist am Standort Günterstal vermutlich stärker ausgeprägt als auf den meisten Deponiestandorten. So ist der Boden der am östlichen Stadtrand von Freiburg gelegenen Versuchsfläche aufgrund hoher jährlicher Niederschlagsmengen von durchschnittlich ca. > 900 mm/a sehr gut wasserversorgt. Solange die Vegetation, vor allem die Gehölze, noch nicht voll entwickelt ist, wird dem Boden noch nicht die maximale Wassermenge durch Evapotranspiration entzogen. Weiterhin liegen die Versuchsfelder im unteren Bereich einer nur sehr schwach geneigten Böschung, so dass praktisch kein Wasserentzug durch lateralen Abfluss erfolgt, sondern sich Zufluss und Abfluss die Waage halten. Deponieböschungen sind meistens stärker geneigt, so dass hier der laterale Abfluss (Interflow) in der Rekultivierungsschicht eine größere Bedeutung erlangt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass in Rekultivierungsschichten auf den meisten Deponiestandorten die wasserstauende Wirkung der Wurzelsperren geringer sein wird.

5.3 Einfluss der Sperren auf das Wurzelwachstum

Aufgrabungen Herbst 2000

Erste Aufgrabungen Mitte September 2000 machten deutlich, dass der nach Einrichtung der Testfelder im April 2000 gesäte Ölrettich die an ihn gestellten Erwartungen nicht erfüllen konnte und ein meist nur 10 cm tief reichendes Wurzelwerk ausbildete. Dieses Ergebnis kann teilweise durch die überdurchschnittlich feuchte Witterung des Sommers 2000 bedingt sein. Eine permanent gute Wasserversorgung stimuliert Pflanzen nicht zur Tiefendurchwurzelung. Die auch im Sommer geringe Austrocknung der Böden auf der Versuchsanlage in Freiburg-Günterstal reicht in den meisten Jahren nicht aus, um die Pflanzen unter Wasserstress zu setzen und so eine intensive und tiefe Durchwurzelung zu fördern. Darüber hinaus bewirkt Staunässe in der Regel Sauerstoffmangel und somit für die Durchwurzelung ungünstige Bodenbedingungen (s.o.). Auch in den Versuchsfeldern in Günterstal, vor allem in der Variante *Dränbeton*, wurde der überwiegend wassergesättigte Grenzbereich zwischen Boden und Wurzelsperre deshalb nicht sehr intensiv durchwurzelt. Viele, vor allem stärkere Wurzeln ($\varnothing > 1\text{mm}$) enden ungefähr 10 cm über der Sperre.

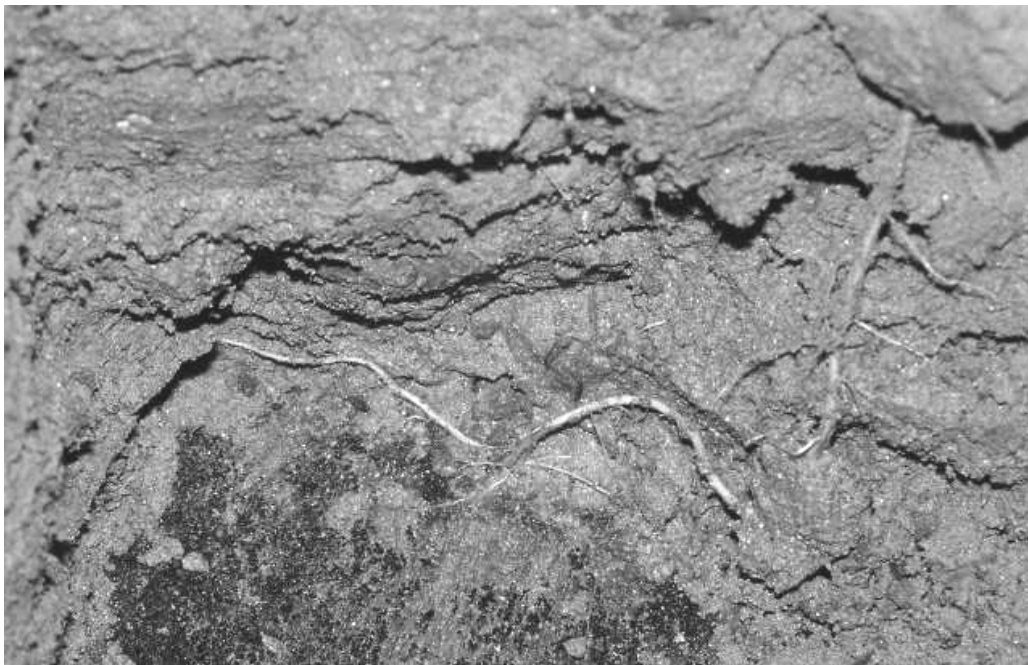


Bild 23: Eine Ampferwurzel (*Rumex obtusifolius*) wird von der Kupfer-Wurzelspermmatte in die horizontale Wuchsrichtung abgelenkt (November 2000).

Bei den Aufgrabungen zeigte sich, dass spontan aus verfrachteten Rhizomstücken angesiedelter Ampfer (*Rumex obtusifolius*) auf dem bodenfrischen bis -feuchten Standort

in Freiburg-Günterstal wesentlich besser für Wurzeluntersuchungen geeignet ist. Ampfer bildet üblicherweise eine tiefreichende Pfahlwurzel aus. Bereits im September 2000 konnten Ampferwurzeln in die Sperrschicht aus Sand einwachsen. Im Gegensatz dazu lenkte die Kupfer-Wurzelspermmatte einzelne vertikal orientierte Pfahlwurzeln ab. Bild 23 zeigt eine oberhalb der Matte horizontal weiterwachsende Wurzel. Die Glassplitt- und Dränbeton-Sperren wurden im Herbst 2000 noch nicht von Ampferwurzeln erreicht.

Aufgrabungen Frühjahr 2002

Um die Wirkung der vier Wurzelsperrenvarianten nach einer längeren Entwicklungszeit der Bepflanzung zu prüfen, wurde im Frühjahr 2002 der Übergangsbereich zwischen Boden ("Rekultivierungsschicht") und Wurzelsperre in jeweils einer Profilgrube pro Versuchsfeld freigelegt. Danach konnten auf einer bestimmten Fläche alle Wurzeln, die die Bodenüberdeckung in ihrer ganzen Tiefe durchdrungen und die Wurzelsperre erreicht hatten, freipräpariert werden. Es wurde geprüft, ob die Sperre Wurzeln in ihrem Tiefenwachstum ablenkte oder ob Wurzeln in die Sperre einwachsen konnten. Bei den Varianten *Sand* und *Glassplitt* wurde zusätzlich in weiteren Profilen geprüft, wie tief die Wurzeln bisher in die Sperre vorgedrungen waren. Bei der Variante *Dränbeton* war dies noch nicht möglich, da nur sehr dünne Wurzeln ($\varnothing \leq 1\text{mm}$) in die Zwischenräume eingedrungen waren. Diese Wurzeln wären beim Aufbrechen des Dränbetons zerstört worden.

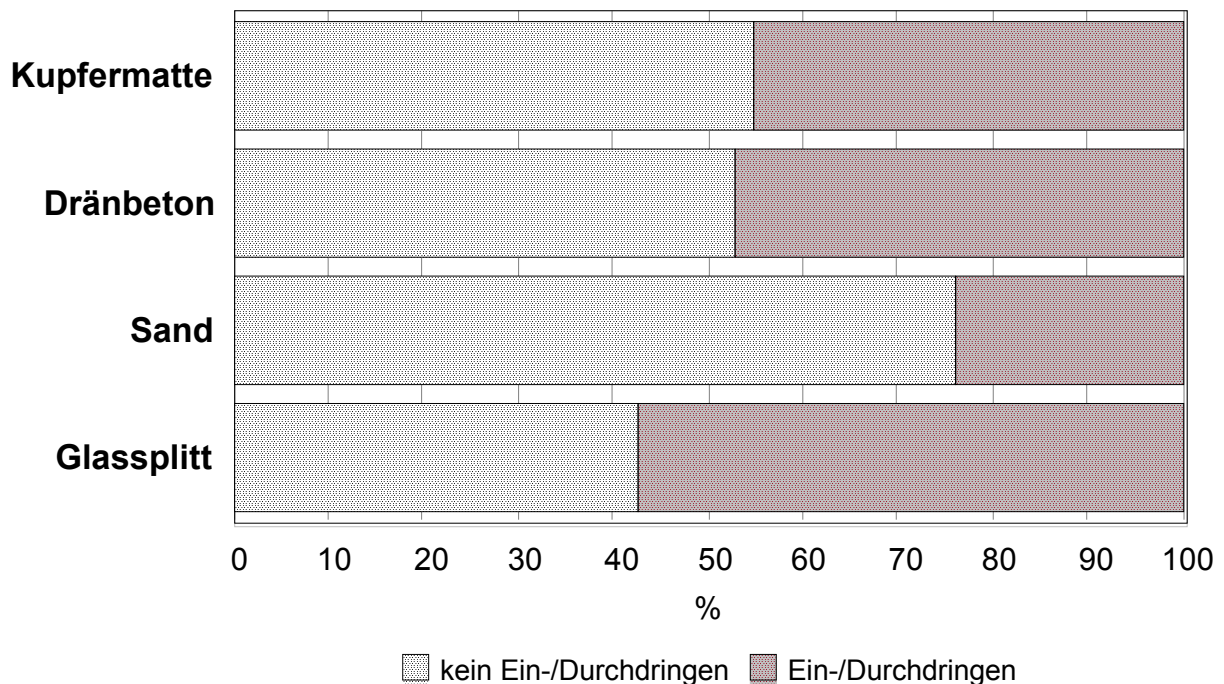


Abbildung 5-2: Durchwurzelung der vier Wurzelsperrenvarianten im Winter 2001/Frühling 2002, Anteile in % (n ≥ 20)

Die Kupfermatte wurde an Stellen, wo Wurzeln von oben in das umhüllende Geotextil eingewachsen waren, mit einer Schere ausgeschnitten, um festzustellen, ob die Wurzeln auch die Kupferfolie und das darunterliegende Geotextil überwunden hatten (siehe Bild 24). Nur in diesem Fall wurde die Sperre als vollständig durchdrungen bezeichnet.

Abbildung 5-2 zeigt die Relation von eingedrungenen und nicht eingedrungenen Wurzeln in den vier Varianten der Wurzelsperren. Es wird deutlich, dass keine der getesteten Wurzelsperren völlig frei von eingewachsenen Wurzeln war. Allerdings unterscheiden sich die Sperren gravierend in ihrer Wirksamkeit. Während in die Variante *Sand, verdichtet* nur ca. 24 % der gefundenen Wurzeln eindringen konnten, sind es bei der *Glassplitt*-Variante über 57 %. In den Dränbeton konnte fast die Hälfte (47,1 %) der Wurzeln eindringen. Die Linteco-Wurzelspermmatte aus gelochter Kupferfolie konnte das Wurzelwachstum von ca. 55 % der sie erreichenden Wurzeln in die Horizontale ablenken. Es wurde eine Reihe von Wurzeln beobachtet, die eine längere Strecke auf dem oberen Geotextil entlangwuchsen, ohne in die Kupfermatte einzudringen (siehe Bild 23). Andere Wurzeln konnten die Sperrschicht durchdringen, nachdem sie einige Zentimeter auf dem oberen Geotextil der Matte entlang gewachsen waren (Bild 24). Bei der Untersuchung der gelochten Kupferfolie war nicht zu erkennen, warum bestimmte Stellen durchwachsen wurden, denn makroskopisch waren keine Beschädigungen festzustellen.



Bild 24: Eine Ampferwurzel hat die Kupfer-Wurzelspermmatte durchdrungen; die Matte ist aufgeschnitten, Ansicht von unten



Bild 25: Eine Wurzel wächst in eine Haufwerkspore des Dränbetons ein.



Bild 26: Wurzeln werden vom verdichteten Sand in horizontale Wuchsrichtung abgelenkt.

Aufgrund der relativ kurzen Versuchslaufzeit sind die meisten der freigelegten Wurzeln mit ≤ 2 mm Durchmesser den Feinwurzeln zuzurechnen (AKS 1996). An den untersuchten Stellen wurden die 30 cm mächtigen Sperrschichten aus Sand und Glassplitt nirgends von

Wurzeln vollständig durchwachsen. Hierzu wird noch eine gewisse Zeit erforderlich sein. Die Variante Dränbeton kann in dieser Hinsicht nicht beurteilt werden, da die Sperrschicht nicht aufgebrochen wurde. Auch die in den Versuchsfeldern gepflanzten Gehölze wurden noch nicht beprobt, um Schäden am Wurzelsystem und den Sperrschichten zu vermeiden. Es ist davon auszugehen, dass auch das Wurzelsystem der Aspen die Sperren noch nicht mit stärkeren Wurzeln erreicht hat. In den nächsten Jahren kann untersucht werden, ob die Pflanzen unter zunehmendem periodischem Trockenstress in der Lage sein werden, die Wurzelsperren vollständig zu überwinden und den darunterliegenden Dränkies zu erreichen. Erst in diesem Fall kann von einem vollständigen Versagen der Wurzelsperre gesprochen werden.

In den Varianten *Sand* und *Glassplitt* konnte aufgrund der Materialeigenschaften nicht nur die Anzahl eindringender Wurzeln, sondern zusätzlich in Tiefenprofilen auch die Eindringtiefe ermittelt werden. Hierzu wurden die Wurzelsperren auf einer Breite von jeweils ca. 50 cm bis zur maximalen Durchwurzelungstiefe angeschnitten und alle eingedrungenen Wurzeln bis zur Wurzelspitze freigelegt.

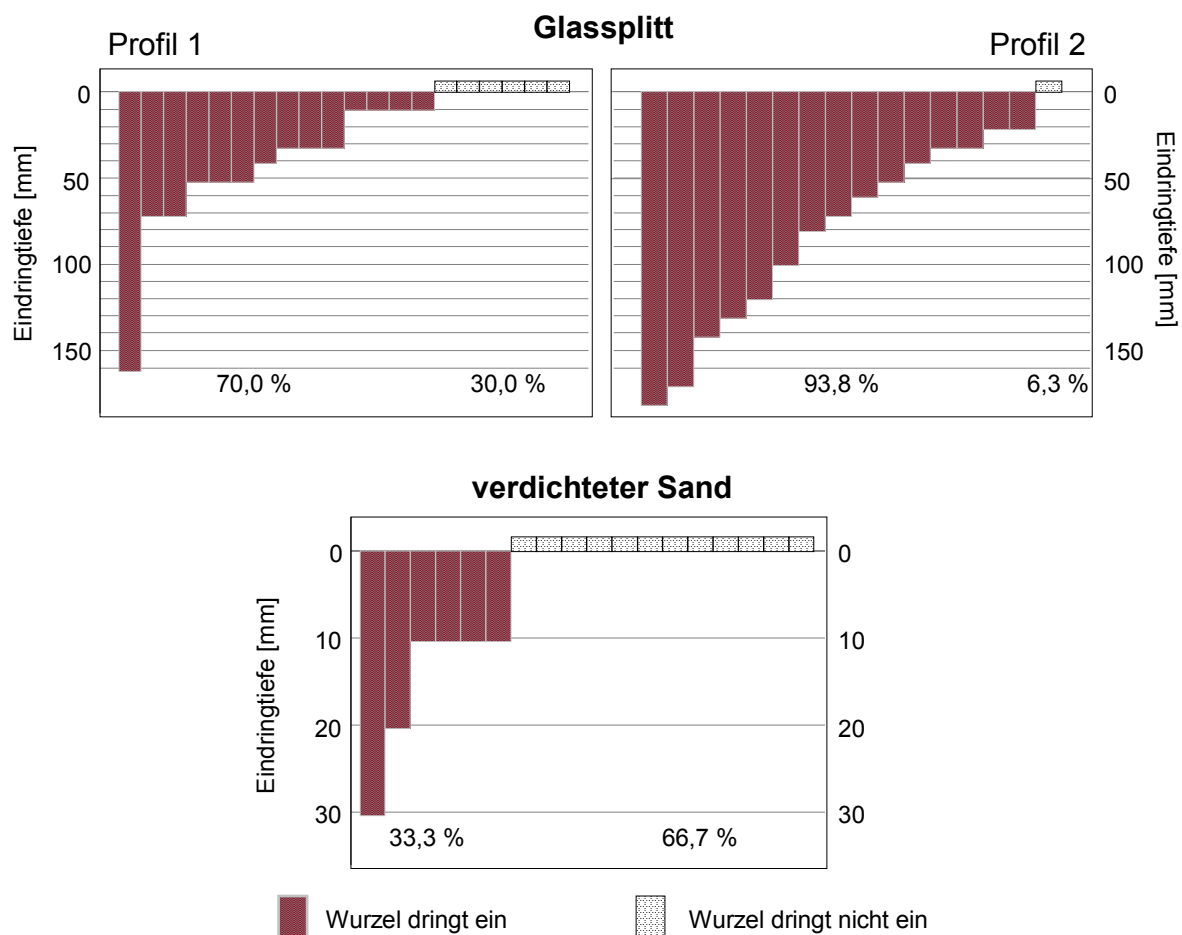


Abbildung 5-3: Anzahl eindringender und abgelenkter Pflanzenwurzeln und Eindringtiefe der Wurzeln in die Wurzelsperrenvarianten *Glassplitt* (oben) und *Sand, verdichtet* (unten); die Grafiken sind unterschiedlich skaliert

Abbildung 5-3 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Die bereits in Abbildung 5-2 dargestellten Tendenzen werden bestätigt. Einzelne Wurzeln konnten die Glassplittvariante bereits bis zu 180 mm tief, d.h. auf fast 2/3 ihrer Mächtigkeit, durchdringen. Im verdichteten Sand waren im Gegensatz dazu nur Wurzeltiefen bis maximal 30 mm festzustellen. Auch die Zahl der an der Sperreroberfläche verbleibenden Wurzeln ist beim Sand deutlich größer.

Resümee (5.):

Die bisherigen Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass unter den gegebenen Bedingungen die getesteten Materialvarianten *Kupfermatte*, *Dränbeton*, *verdichteter Sand* und *Glassplitt* nur bedingt als Wurzelsperren geeignet sind. Alle Varianten wiesen zwar einen Teil der Wurzeln ab, in jede Sperre konnten jedoch auch Wurzeln eindringen. Die Kupfer-Sperrmatte wurde aufgrund ihrer geringen Dicke als einzige vollständig durchwurzelt. Das Funktionsprinzip Cu-Toxizität muss deshalb, zumindest für den Standort Günterstal, in Frage gestellt werden. Erst nach einer weiteren Entwicklungszeit der Wurzelsysteme kann geprüft werden, ob auch die im Versuchsfeld 30 cm mächtigen Varianten *Sand*, *Dränbeton* und *Glassplitt* wirklich vollständig durchdrungen werden können.

Keine der vier Wurzelsperren kann zur Zeit uneingeschränkt empfohlen werden, denn trotz ihrer guten Wasserleitfähigkeit können vor allem die Varianten *Kupfermatte*, *Dränbeton* und *Glassplitt* Stauwasser in Rekultivierungsschichten verursachen (Kapillarsperreneffekt). Unter den gegebenen Bedingungen erscheint die Variante *verdichteter Sand* noch am geeignetsten, denn sie wurde bisher am wenigsten von den Wurzeln angegriffen und verursacht den geringsten Wasserstau in der darüberliegenden Rekultivierungsschicht. Aus diesem Ergebnis leitet sich die, die Durchlässigkeitsverhältnisse der beteiligten Böden und Baustoffe im Einzelfall zu überprüfen.

6 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

6.1 Fortschritte anderer Stellen im Lauf des Vorhabens

Bau von Wasserhaushaltsschichten

Angeregt durch die theoretischen Vorarbeiten zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und die Empfehlungen des DGGT-Arbeitskreises wurden im Jahr 2000 zeitgleich mit dem Vorhaben auf der Deponie Leonberg weitere Wasserhaushaltsschichten konzipiert. Auf zwei Deponien in Rheinland-Pfalz wurde versucht, Wasserhaushaltsaspekte bei der Gestaltung der Rekultivierungsschicht zu berücksichtigen. Kombinierte Oberflächenabdichtungen aus einer Wasserhaushaltsschicht in Verbindung mit einer Kunststoffdichtung (KDB) wurden hergestellt. Es handelt sich um:

1. Deponie „Eisenberg“ (Donnersbergkreis), Bauausführung im Sommer 2000, Fläche ca. 2,7 ha, siehe FEIN & MANZ (2001)
2. Deponie „Fernthal“ (Kreis Neuwied), Bauausführung im Sommer 2000, siehe KRATH (2001).

Weitergehende Erfahrungen mit diesen Abdichtungssystemen liegen zur Zeit noch nicht vor, langfristige Untersuchungen sind jedoch geplant. Allerdings wurde auf keinem der beiden Deponiestandorte Lysimeteranlagen zur exakten Bilanzierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtung erstellt.

Neue Anforderungen an Wasserhaushaltsschichten

Im Workshop „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungen in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“ der Arbeitsgruppe 7 des DGGT-AK 6.1 am 31. Januar 2002 wurden neuartige Anforderungen an die Gestaltung der Rekultivierungsschicht formuliert. Mit der Zielsetzung, die Austrocknungsgefährdung bindiger mineralischer Abdichtungen zu verringern, wurde gefordert, Rekultivierungsschichten so zu gestalten und zu dimensionieren, dass eine möglichst gleichmäßige Versickerung erzielt wird (vergleiche 4.5.3). Es wurde beispielsweise vorgeschlagen, unter einer hinreichend mächtigen Wurzelschicht von $\geq 1,5$ m mit einer nutzbaren Wasserspeicherkapazität von ≥ 200 mm eine ca. 1 m mächtige gut wasserleitende „Versickerungsschicht“ anzulegen. Die Ergebnisse des Workshops werden zur Zeit von der DGGT-Arbeitsgruppe aufbereitet und sollen im Lauf des nächsten Jahres in eine GDA-Empfehlung einfließen.

6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Erfahrungen bei der Bauausführung

Der unverdichtete Einbau von Rekultivierungsschichten ist in der Praxis möglich; er ist jedoch im Einzelfall von der Böschungsneigung und den substratbedingten Scherparametern abhängig. Deshalb ist eine Prüfung der Schereigenschaften des verwendeten Bodenmaterials grundsätzlich notwendig. Großscherversuche ergaben, dass die maßgebenden Scherparameter der unverdichteten Substrate auch mittels klassischer Scherversuche im Labor erhoben werden können.

Das beim Bau der Testfelder eingesetzte neue Verfahren *Vor-Kopf-Einschieben der Rekultivierungssubstrate in einer Schicht* ist als Kompromisslösung für die Baupraxis zu sehen, um Verdichtungen im Unterboden zu vermeiden. Ein völlig verdichtungsfreier Einbau des Bodens kann nur ohne jegliches Befahren mit Bandabsetzer oder Teleskopbagger realisiert werden. Diese Verfahren werden - zumindest derzeit - in der normalen Baupraxis aus Kostengründen oder wegen fehlender Maschinen nur in Ausnahmefällen Anwendung finden und wurden deshalb auch beim Forschungsvorhaben nicht eingesetzt.

Durch das *Vor-Kopf-Einschieben* der Rekultivierungsschicht wird der Oberboden zwangsläufig befahren und verdichtet. Die Oberbodenverdichtungen sind aber weniger schädlich als solche im Untergrund, denn sie werden auf natürliche Weise allmählich aufgelöst oder können mit technischen Mitteln relativ leicht aufgelockert werden. Die verdichtete Bodenoberfläche der Versuchsfelder wurde mit dem ebenfalls neu entwickelten Verfahren *Umgraben mit dem Bagger* aufgelockert. Es schafft eine stark raue Bodenoberfläche, die Bodenerosion in der vegetationsfreien Zeit sehr effektiv unterbinden konnte.

Eigenschaften der Rekultivierungsschicht nach Fertigstellung der Felder

Die Ergebnisse der vor dem Bodeneinbau durchgeführten Laboruntersuchungen zum Standsicherheitsverhalten unverdichteter Rekultivierungsschichten werden durch die in-Situ-Messungen mit neu entwickelten *Karlsruher Schertestern* bestätigt.

Obwohl die Setzungen des unverdichteten Substrates im Testfeld nach 18 Monaten noch nicht vollständig abgeklungen sind, zeigt sich, dass mit dem praktizierten Einbauverfahren für unverdichtete Böden Trockenraumdichten unterhalb der Ausgangsdichte des Substrates erzielt werden konnten. Hingegen entstanden durch die lagenweise Verdichtung beim konventionellen Einbau „Sperrschichten“ im Unterboden. Diese weisen viel weniger Grobporen und damit deutlich höhere Trockenraumdichten als das Substrat beim unverdichteten Einbau in gleicher Tiefe auf.

In beiden Versuchsfeldern wurde durch die Bodenumlagerung die Kontinuität der Poren unterbrochen. Daher bestimmt die unterschiedliche Dichte der Böden die Infiltrationseigenschaften: Im verdichteten Substrat erfolgt die Wasserinfiltration fast nur in Rissen, im unverdichteten dagegen überwiegend flächig. Im Unterboden der verdichteten Rekulti-

vierungsschicht tritt häufig Staunässe und damit auch Sauerstoffmangel auf. Die Durchwurzelung wird zudem durch deutlich höhere Eindringwiderstände erschwert.

Als Folge der unterschiedlichen Einbauverfahren ist das Feld mit unverdichtetem Substrat ein günstigerer Pflanzenstandort. Die Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung belegen eine positive Reaktion der Pflanzen auf die Standortunterschiede, insbesondere durchwurzeln sie das unverdichtete Substrat erheblich tiefer und intensiver als das lagenweise verdichtete Material. Daher ist langfristig auch eine höhere Wasserentnahme aus dem Boden zu erwarten.

Die Regenwurmpopulation wurde durch die Bodenumlagerung beim Bau der Testfelder praktisch vollständig vernichtet. Eine schnelle Zunahme der Regenwurmzahlen ist aufgrund der Rahmenbedingungen nicht zu erwarten, so dass positive Wirkungen der Regenwürmer auf das Bodengefüge in absehbarer Zeit weitgehend fehlen werden. Untersuchungen zeigen, dass Regenwürmer auf rekultivierten Flächen mit günstigen Bodeneigenschaften durchaus große Populationen aufbauen können.

Erprobung von Wurzelsperren

Die vorläufigen Ergebnisse der Versuche zur Erprobung von Wurzelsperren in Freiburg legen den Schluss nahe, dass unter den gegebenen Bedingungen alle getesteten Materialvarianten *Kupfermatte*, *Dränbeton*, *verdichteter Sand* und *Glassplitt* nur bedingt als Wurzelsperren geeignet sind. Alle Varianten wiesen zwar einen Teil der Wurzeln ab, in jede Sperre konnten jedoch auch Wurzeln eindringen. Die Kupfer-Spermatte wurde aufgrund ihrer geringen Dicke als einzige durchdrungen. Zudem führten die drei Varianten *Kupfermatte*, *Dränbeton* und *Glassplitt* aufgrund eines Kapillarsperreneffektes zu Stauwasser in den darüberliegenden Rekultivierungsschichten. Nach dem derzeitigen Untersuchungsstand erscheint daher die Variante *verdichteter Sand* am geeignetsten.

6.3 Forschungsbedarf

Die aus dem laufenden Vorhaben bis zum jetzigen Zeitpunkt gewonnenen Ergebnisse bestätigen sowohl die Realisierbarkeit als auch die aufgrund allgemeiner Erkenntnisse der Bodenkunde vermuteten günstigeren Standorteigenschaften unverdichtet eingebauter Rekultivierungsschichten. Sie werfen jedoch auch eine Reihe neuer Fragen auf, die im Hinblick auf eine praxisnahe Umsetzung der Erkenntnisse zukünftig beantwortet werden müssen:

1. Herkunft und Eigenschaften der bei einer Rekultivierung verwendeten Substrate sind aus baubetrieblichen Gründen in der Regel nicht im Voraus bekannt. Im Bauablauf ist eine kurzfristige Prüfung der angedienten Böden und eine schnelle Freigabe zur Anlieferung erforderlich. Somit sind selbst einfache Laborscherversuche zur Bestimmung der Scherparameter in der Praxis selten möglich. Für unverdichtete Rekultivierungsschichten wird aber die Prüfung der Scherparameter als notwendig erachtet. Um diesen Widerspruch aufzulösen, sollten die prinzipiellen Schereigenschaften für typische und verbreitete Substrate Baden-Württembergs („Referenzböden“) im Voraus ermittelt werden.
2. Der Bau der Testfelder hat gezeigt, dass auch beim *Einbau ohne zusätzliche Verdichtung* trotz Verwendung einer leichten Raupe mit Moorketten durch das Einschieben des Bodens Oberbodenverdichtungen entstehen. Diese sind positiv mit der Häufigkeit der Befahrungen der Bodenoberfläche korreliert. Daher ist zu prüfen, ob in der Praxis der Einsatz einer schweren Raupe sinnvoller ist, die mit einer geringeren Zahl von Überfahrten das gleiche Bodenvolumen einbauen kann. Dieses Verfahren wäre aufgrund der höheren Arbeitsleistung kostengünstiger, möglicherweise könnte auch das Ausmaß der Oberbodenverdichtung reduziert werden.
3. Aufgrund der langfristigen Ausrichtung des Gesamtvorhabens sowie der in den Testfeldern zu erwartenden großen Veränderung von Boden und Vegetation und damit auch des Wasserhaushaltes sollten die im Testfeld installierten Messeinrichtungen in regelmäßigen zeitlichen Abständen aktiviert werden.
4. Die praktisch vollständige Vernichtung der Regenwurmpopulation durch Bodenumlagerung wurde bisher nur in den Testfeldern in Leonberg dokumentiert. Wegen der grundsätzlichen Bedeutung der Ergebnisse - Bodenumlagerungen finden in vielen Bereichen der Bauwirtschaft statt - sind Untersuchungen bei weiteren Baumaßnahmen angezeigt. Weiterhin sollten Untersuchungen zur Wiederansiedlung von Regenwürmern nach Baumaßnahmen erfolgen.
5. Die im Jahre 1999 angelegten Testfelder zur Erprobung von Wurzelsperren konnten nur über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren untersucht werden. Dieser Zeitraum ist für eine intensive Durchwurzelung der Versuchsfelder - insbesondere durch Bäume - nicht ausreichend. Weiterhin sind die eingebauten Wurzelsperren auch auf ihre Langzeitbeständigkeit zu prüfen. Daher sollten zu einem späteren Termin weitere Untersuchungen erfolgen.

6.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

6.4.1 Voraussichtlicher Nutzen und praktische Verwertbarkeit

Rekultivierungsschichten als Komponenten der Oberflächenabdichtung von Deponien haben folgende Hauptfunktionen:

1. Sie sind Tragschicht für den Bewuchs und somit Grundlage für die langfristige Wiedereingliederung eines Deponiebauwerkes in die Landschaft sowie eine eventuelle Folgenutzung für Land-, Forstwirtschaft oder Freizeit/Erholung (siehe WATTENDORF & SOKOLLEK 2001). Sie erfüllen somit eine landschaftspflegerische Funktion.

Die bisherigen Ergebnisse des Vorhabens belegen, dass es unter bestimmten Annahmen (z.B. Bodenarten, Böschungsneigung) möglich ist, unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschichten herzustellen und somit einer schon seit Jahren erhobenen Forderung von Rekultivierungspraktikern, Forstwirten, Vegetations- und Bodenkundlern nachzukommen (siehe ZWÖLFER et al. (1994) u.v.a.). Die Vegetation reagierte bereits in der ersten Vegetationsperiode positiv im Sinne des Versuchsansatzes auf die günstigeren Bodenbedingungen im unverdichteten Einbau. Deshalb kann angenommen werden, dass auch die weitere Entwicklung, vor allem der Gehölze besser verlaufen wird als auf verdichteten Rekultivierungsschichten, obwohl die Unterschiede zwischen den Versuchsfeldern nicht sehr deutlich ausgeprägt sind.

Ein großer Teil der baden-württembergischen Deponien liegt im Waldverband. Die Wiederaufforstung ist somit im Sinne des Landeswaldgesetzes geboten. Es ist zu erwarten, dass Rekultivierungsschichten mit günstigeren Standorteigenschaften, wie sie von der Forstwirtschaft immer wieder gefordert werden (z.B. BÖNECKE 1994), die Wiedereingliederung von Deponien in die (Wald-)Landschaft erleichtern und die Zahl der Fehlschläge und Ausfälle bei Aufforstungen reduzieren.

2. Rekultivierungsschichten sollen den Zustrom von Niederschlagswasser in das Entwässerungssystem und die Deponie reduzieren (Funktion „Wasserhaushaltsschicht“). Tritt kein Wasser in den Deponiekörper ein, so können auch keine Sickerwässer ausgetragen werden, die in die Umgebung gelangen und möglicherweise Grundwasser, Vorfluter und Boden mit eluierten Schadstoffen belasten. Da die Funktionsdauer der technischen Dichtungskomponenten (siehe Abbildung 1-1) nicht absehbar ist (MÜLLER & AUGUST 1997, SCHNITTGER 1998), müssten schadstoffhaltige Deponien dauerhaft überwacht und deren Dichtungseinrichtungen gegebenenfalls ertüchtigt werden. Heute kann niemand garantieren, dass dies auf unbestimmte Zeit möglich sein wird.

Allgemeine Untersuchungen zur Grundwasserneubildung und zum Bodenwasserhaushalt sowie bisherige Untersuchungen abgedeckter Mülldeponien (z.B. WATTENDORF & BÖNECKE 1999) zeigen, dass bei entsprechend günstigen Bodeneigenschaften

(siehe 3.1) der höhere Wasserverbrauch der Vegetationsdecke die Absickerungsraten deutlich verringert. Deshalb kann eine als Wasserhaushaltsschicht gestaltete Rekultivierungsschicht mit optimalem Bewuchs zwar nur in wenigen Regionen Deutschlands den Zustrom von Sickerwasser in eine Deponie vollständig verhindern, sie kann ihn jedoch an den meisten Standorten maßgeblich reduzieren. Somit erfüllen qualifizierte Rekultivierungsschichten auf unbegrenzte Zeit eine Umweltschutzfunktion.

3. Der Einbau von Rekultivierungsschichten ohne Verdichtung ist in der Regel kostengünstiger als das konventionelle Verfahren, da der zusätzliche Arbeitsschritt des Verdichtens entfällt. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass konventionelle Baumaschinen (Raupe mit hoher Verschiebeleistung) eingesetzt werden können. Zur Zeit besteht allerdings noch Forschungsbedarf zu der Frage, ob mit Maschinen höherer Leistung (und damit hohem Gewicht) die gleichen Ergebnisse erzielt werden können, wie beim Bau der Versuchsfelder auf der Kreismülldeponie Leonberg.

6.4.2 Empfehlungen für die Praxis

Standicherheit

Bei unverdichtetem Einbau müssen die Scherparameter des jeweils einzubauenden Rekultivierungsmaterials bekannt sein. Für locker geschüttete Substrate können die maßgebenden Scherparameter durch klassische Scherversuche im Labor ermittelt werden.

Substratauswahl

Die Verteilung der Bodenarten in der Bundesrepublik ist regional sehr unterschiedlich. Es wird deshalb nicht immer möglich sein, optimale Substratqualitäten für jeden Deponiestandort mit vertretbarem Aufwand zu beschaffen. In der Praxis werden deshalb oft Kompromisslösungen zwischen den Anforderungen der Bodenkunde und dem wirtschaftlich Vertretbaren notwendig. Soll die Qualität der Rekultivierungsschicht nicht dem Zufall überlassen bleiben, so ergibt sich die Aufgabe, bereits lange vor Ausführung größerer Rekultivierungsvorhaben die Bodenbeschaffung zu planen und gegebenenfalls ein Bodenmanagement zu betreiben.

Einbau

Aus boden- und vegetationskundlicher Sicht ist der Einbau ohne zusätzliche Verdichtung stets zu bevorzugen; er wirkt sich unabhängig von der Qualität der Substrate in jedem Fall günstiger auf die Standorteigenschaften der Rekultivierungsschicht aus.

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

Zielvorgabe beim Bodeneinbau sollte nicht das Erreichen der ursprünglichen Bodendichte sein. Auch eine Umlagerung ohne zusätzliche Verdichtung verschlechtert die Bodeneigenschaften, da kontinuierliche Poren fehlen und neu gebildete außerdem von geringerer Stabilität sind. Deshalb muss ein Boden, um ähnliche Eigenschaften wie im Ausgangszustand zu erreichen, deutlich lockerer eingebaut werden.

Bautechnik

Als Begleiterscheinung des unverdichteten Bodeneinbaus treten Setzungen auf. Da sich auf oder in der Rekultivierungsschicht meist diverse Baulichkeiten befinden, können konstruktive Vorkehrungen erforderlich sein, damit Setzungen nicht zu Schäden führen.

Kontrolle

Zusammenhänge zwischen der Leistungsfähigkeit der Vegetation und Bodeneigenschaften sind mit einer Vielzahl von Untersuchungen belegt. Bei üblichen Rekultivierungsverfahren werden die Bodeneigenschaften jedoch nicht dokumentiert, da die Kontrolle durch einen Bodenkundler beim Einbau fehlt. Deshalb ist sowohl eine laufende Kontrolle während des Einbaus als auch eine flächendeckende Eignungskartierung durch Boden-/Standortkundler (Standortgutachten) nach dem Abschluss der technischen Rekultivierung und vor einer Bepflanzung mit Gehölzen angezeigt. Standortgutachten werden in der Rekultivierung von Abbauflächen bereits heute vielfach durchgeführt, obwohl dort viel geringere Anforderungen an Boden und Vegetation gestellt werden.

6.4.3 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Programms BW-PLUS

Leitziel des Förderprogramms BWPLUS ist eine nachhaltige Entwicklung am Standort Baden-Württemberg durch Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen. ... Entwickelt werden sollen natur- und sozialwissenschaftliche, technische und methodische Beiträge und Instrumente zur Lösung von Problemen, um die Herausforderungen zu bestehen, eine dauerhaft lebenswerte Umwelt zu gestalten. ... Gefördert werden anwendungsorientierte Projekte, für die im Land Baden-Württemberg eine besondere Relevanz besteht. Über die Analyse hinaus sollen ökologisch, aber auch ökonomisch tragfähige Problemlösungen erarbeitet werden. (Zitate aus: www.bwplus.fzk.de/).

Aus dem eingangs dieses Kapitels Gesagten wird deutlich, dass die Optimierung von Rekultivierungsschichten sowohl landschaftspflegerischen als auch umweltschützerischen Zielen dient und somit dem Leitziel von BWPLUS „Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen“ entspricht. Kapitel 2 zeigt, dass die Konzeption des Vorhabens eine Kompromissfindung zwischen den Anforderungen aller beteiligten Fachbereiche vorsah und die Entwicklung eines praxisorientierten und ökonomisch realisierbaren Verfahrens zur Herstellung optimierter Rekultivierungsschichten im Vordergrund der Projektarbeit stand.

7 Veröffentlichungen

7.1 Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit

7.1.1 Seminarveranstaltung und „Tag der offenen Tür“

Am 18. Oktober 2001 wurde die Versuchsanlage einem Fachpublikum aus Behörden und Deponiebetreibern vorgestellt und erste Ergebnisse aus den Untersuchungen präsentiert und diskutiert. Die Veranstaltung war in einen Seminarteil am Vormittag und einen Exkursionsteil zur Versuchsanlage auf der Deponie Leonberg am Nachmittag gegliedert. Es wurden Seminarvorträge zu folgenden Themen gehalten:

1. Planung und Bau der Testfelder
2. Standsicherheit unverdichteter Rekultivierungsschichten
3. Bodeneigenschaften und Vegetationsentwicklung
4. Bodenbiologie und Bodenentwicklung
5. Forstliche Rekultivierung und Ingenieurbiologie

An der Veranstaltung nahmen rund 70 Gäste aus Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern teil.

7.1.2 Veröffentlichungen

Auf das laufende Untersuchungsvorhaben und seine ersten Ergebnisse wurde mit einer Reihe von Vorträgen, Publikationen und Präsentationen aufmerksam gemacht. Neben den jährlichen Berichten im Rahmen der BW-PLUS-Statuskolloquien (WATTENDORF & KONOLD 2000, 2001 und 2002) sind besonders erwähnenswert:

1. Zwei Poster zu den Themen Fragestellung des Vorhabens/Bau der Versuchsfelder und Bodenmechanik/bodenphysikalische Eigenschaften einschliesslich je einer Kurzfassung der Posterinhalte im Tagungsband (BIEBERSTEIN et al. 2001 a+b) beim 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz in Mainz, 28. März 2001
2. HAUBRICH, E. (2001): Forschungsvorhaben „Gestaltung von Rekultivierungsschichten“, Vertiefersseminar Zeitgemäße Deponietechnik: 13. Februar 2001, Vortrag und Beitrag im Tagungsband
3. HAUBRICH, E. (2002): Neue Erkenntnisse bei der Rekultivierung von Deponien - Bau von Testfeldern im Rahmen eines Forschungsvorhabens, 10. Braunschweiger

Deponie- und Dichtwandseminar, 21./22.03.2002, Braunschweig, Vortrag und Beitrag im Tagungsband

4. HAUBRICH, E. & WATTENDORF, P. (2002): Forschungsvorhaben „Rekultivierung von Deponien“ - Ergebnisse aus Testfeldern in Baden-Württemberg, in: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt [Hrsg.]: Fachinformation 3/2002: H 1 - 26, Vortrag auf der Fachtagung „Deponietechnik 2002 - Abschlussplanung und Sicherung von Deponien“, 11.04.2002, Halle

7.2 Geplante Veröffentlichungen

Zur Zeit sind folgende Publikationen von Ergebnissen aus dem vorliegenden Forschungsvorhaben geplant:

1. Es ist vorgesehen, den vorliegenden Endbericht in modifizierter Form in der Schriftenreihe des Instituts für Landespflege „Culterra“, voraussichtlich als Band 31, zu veröffentlichen. Die Bände der Schriftenreihe erscheinen in einer Auflage von 200 Exemplaren.
2. Die Arbeitsgruppe der Universität Karlsruhe bereitet eine Publikation über die Standesicherheitsaspekte für eine entsprechende Fachzeitschrift (Bautechnik, Geotechnik) vor.
3. Wattendorf, P. & O. Ehrmann: Erprobung von Wurzelsperren zum Schutz von Drainage- und Abdichtungsschichten vor Durchwurzelung

Der Thematik der Wurzelsperren wird in letzter Zeit großes Interesse entgegengebracht. Es ist deshalb vorgesehen, die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wirkung von Wurzelsperren beim 12. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar am 9. und 10. Oktober 2002 („Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten“) vorzustellen. Eine entsprechende Einladung des Veranstalters (ICP Ingenieurgesellschaft, Karlsruhe) liegt vor. Die Seminarbeiträge werden in der Schriftenreihe „Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis“ publiziert.

4. Eine Publikation der Ergebnisse der ingenieurbioologischen Versuche (Wurzelaufgrabungen an Buschlagen) ist ebenfalls vorgesehen.

8 Literatur

- AKS = Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (1996): Forstliche Standortaufnahme, 352 S., Eching
- Barner, J. (1978): Rekultivierung zerstörter Landschaften - Ökologie, Meliorationswesen und Anbautechnik, 220 S., Stuttgart
- Baumgartner, A. & H.-J. Liebscher (1996): Allgemeine Hydrologie - quantitative Hydrologie, Lehrbuch Hydrologie Band 1, Stuttgart, 694 S.
- Begemann, W. & H.M. Schiechl (1994): Ingenieurbiologie: Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau, Wiesbaden, 216 S.
- Berger, K. & V. Sokollek (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
- Berger, K. (1999): Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse, Hrsg.: Umweltbundesamt, 557 S., Berlin
- Bieberstein, A., G. Bönecke, J. Brauns, O. Ehrmann, E. Haubrich, W. Konold, M. Koser, H. Reith & P. Wattendorf (2001a): Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten, Teil 1: Fragestellung, Aufbau der Versuchsfelder, in: Maier-Harth, U. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz: 295 – 298
- Bieberstein, A., G. Bönecke, J. Brauns, O. Ehrmann, E. Haubrich, W. Konold, M. Koser, H. Reith & P. Wattendorf (2001b): Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten, Teil 2: Standsicherheit und bodenphysikalische Eigenschaften, in: Maier-Harth, U. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz: 299 – 302
- BLW = Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1990): Gehölze auf Deichen, Informationsberichte Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft 5/89, 102 S. München
- BMU = Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.] (2001): Hydrologischer Atlas von Deutschland, Bonn
- Bönecke, G. (1994): Forstwirtschaftliche Belange bei der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien, Schriftenreihe Angewandte Geologie (AGK) 34: 409 – 425, Karlsruhe
- Bönecke, G. (1997a): Forstwirtschaftliche Aspekte der Rekultivierung kombinationsgedichteter Deponien. In: Egloffstein, T. & Burkhardt, G. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten, Planung - Bau – Kosten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band. 103: 171 – 178

- Bönecke, G. (1997b): Hinweise zur Aufforstung von Deponien mit Oberflächenabdichtung. In: Bönecke, G. u. Weiß, E. [Hrsg.]: Rekultivierung von Deponien, FVA-Arbeitsberichte 1/97, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg: 39 – 50b.
- Bönecke, G. (2001): Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien – Deponiewald statt Oberflächenabdichtung? In: Egloffstein, T., Burkhardt, G., Czurda, K. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2001, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 122: 263 – 280
- Bouche, M.B. (1972): Lombriciens de France, Ecologie et Systematique, INRA Publ. 72-2, 672 S.
- Bouche, M.B. (1977): Strategies lombriciennes, In: Lohm, U. & T. Persson (ed.): Soil organisms as components of ecosystems, Ecol. Bull. (Stockholm) 25: 122-132
- Brauns, J., K. Kast, H. Schneider, W. Konold, P. Wattendorf & B. Leisner (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfallkonformer Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall Band 13, 97 S. + Anhang, Karlsruhe
- Brechtel, H.M. (1984): Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Deponien, Loseblattsammlung Müll und Abfall Nr. 4623, Berlin
- Breh, W., V. Giurgea & H. Hötzl (2002): Langzeitbeobachtung zum Verhalten einer verstärkten mineralischen Dichtungsschicht in einer kombinierten Oberflächenabdichtung, Status-Workshop „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“, Arbeitsgruppe 7 - Oberflächenabdichtungssysteme des AK 6.1 & Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik der Fachhochschule Lippe und Höxter, Höxter, 14 S.
- Coppin, N.J. & I.G. Richards, (1990): Use of Vegetation in Civil Engineering, Construction Industry research and Information Association, London, 292 S.
- DGGT (1998) = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: GDA-Empfehlung E 2-30, Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, Bautechnik 75 (9)
- DGGT (2000) = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617 – 626
- DGGT (2000a) = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2000): GDA-Empfehlung E 2-32 Gestaltung von Bewuchs auf Abfaldeponien (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 627 – 629
- Drinkgern, G. (1999): Dränbeton, Schriftenreihe Spezialbetone Band 2: 49 - 68, Düsseldorf
- Dunger, W. (1983): Tiere im Boden. Die Neue Brehm Bücherei 327, Wittenberg
- Graff, O. (1971): Stickstoff, Phosphor und Kalium in der Regenwurmlosung auf der Wiesenversuchsfläche des Sollingprojektes, In: D'Aguilar, J. (ed.): IV Colloquium Pedobiologiae, INRA Publ. 71-7: 503 - 511
- DVWK (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern, DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft Heft 114, 52 S., Hamburg & Berlin

- Ehlers, W. (1975): Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soils, *Soil Sci.* 119: 242-249
- Ehrmann, O. & U. Babel (1991): Quantitative Regenwurmerfassung - ein Methodenvergleich. *Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch.* 66, I: 475-478.
- Ehrmann, O., Sommer, M. & T. Vollmer (2000): Regenwürmer. In: Sommer, M., Ehrmann, O., Friedel, J.K., Martin, T. & G. Turian [Hrsg.]: Böden als Lebensraum für Organismen - Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart
- Eppinger, M., H. Schack-Kirchner & E. Hildebrand (2002): Rückegassen als Wurzelraum? *Allg. Forstzeitschrift - Der Wald*: 489 - 491
- Evans, A.C. & W.J. McL. Guild (1948): Studies on the relationships between earthworms and soil fertility. IV. On the life cycles of some british lumbricidae. *Ann. Appl. Biol.* 35: 471-484
- Fein, W. & E. Manz (2001): Bau einer Wasserhaushaltsschicht - die Praxis zur Theorie am Beispiel der Deponie Eisenberg (Donnersbergkreis), in: Maier-Harth, U. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz: 227 - 245
- Flury, M. & H. Flühler (1994): Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies - a toxicological overview. *J. Environ. Qual.* 23: 1108 - 1112
- Flury, M. & H. Flühler (1995): Tracer characteristics of brilliant blue FCF. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 22 - 27
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenwesen (1983): Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Landschaftsgestaltung, Abschnitt 3: Lebendverbau, 39 S.
- Friedel, J.K. & M. Sommer: Mikroorganismen. In: Sommer, M., Ehrmann, O., Friedel, J.K., Martin, T. & G. Turian (2002): Böden als Lebensraum für Organismen - Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart
- Gaertig, T., H. Schack-Kirchner, E. Hildebrand & v. Wilpert, K. (2002): The impact of soil aeration on oak decline in south-western Germany, *Forest Ecology and Management*, 159 (1-2): 15 - 25
- Glinski, J. & W. Stepniowski (1985): Soil aeration and its role for plants, CRC Press, Boca-Raton FL, 229 S.
- Grohmann, J. (2000): Erhöhung der Artenvielfalt an Fließgewässern und Hängen durch Untersuchung der biotechnischen Eigenschaften von Gehölzen. *Ingenieurbiologie* 2: 32 - 35
- HAD (2000): = Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Hydrologischer Atlas von Deutschland, Loseblattsammlung, Berlin

- Hähne, K. (1997): Berechnung der standsicherheitserhöhenden Wirkung von Gehölzen, Gesellschaft für Ingenieurbioogie e.V., Mitteilungen 9: 3 – 18
- Haider, K. (1992): Biochemische Prozesse der Bildung und der Dynamik von Huminstoffen im Boden. Berichte über Landwirtschaft, 206: 45 - 62
- Hartge, K. H. & R. Horn (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden, 177 S., Stuttgart
- Hartge, K. H. & R. Horn (1999): Einführung in die Bodenphysik, 304 S., Stuttgart
- Haubrich, E. (1997): Temporäre Oberflächenabdichtungen im Verlauf verfüllbegleitender Baumaßnahmen, Vertiefersseminar Zeitgemäße Deponietechnik, FEI Stuttgart
- Hoogerkamp, M. H. Roogar & H.J. Eijsackers (1983): Effect of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: Satchell, J. E. [Hrsg.]: Earthworm Ecology, London, 85 - 105.
- Hütter, M., B. Rehlinghaus, A. Roth, R. Scherbeck & J. Flacke (1993): Wirkungsweise von Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen, unveröffentl. Gutachten im Auftrag der Umweltagentur Ruhrgebiet, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Physische Geografie/Geoökologie, 167 S. + Anhang, Bochum
- Jäggi, W. (1976): Die Bestimmung der CO₂-Bildung als Maß der bodenbiologischen Aktivität. Schw. Landw. Forschung, 15: 371 - 380
- Janetschek, H. (1982): Ökologische Feldmethoden, 175 S., Stuttgart
- Judd, K.W. & C.F. Mason (1995): Earthworm populations of a restored landfill site. Pedobiologia 39: 107 - 115
- Kent, M. & Coker, P. (1992): Vegetation Description and Analysis, 363 S., Chichester
- Konold, W. & H. Zeltner (1981): Untersuchungen zur Vegetation angedeckter Mülldeponien, Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden - Württemberg 24, 83 S., Karlsruhe
- Konold, W. (1981): Anleitung zur Rekultivierung von Deponien (Teil 1), Texte Umweltbundesamt (UBA) 13: 161 S., Berlin
- Konold, W., Wattendorf, P. & Leisner, B. (1997): Anforderungen an die Rekultivierungsschicht beim Rekultivierungsziel "Wald", in: Egloffstein, T. & Burkhardt, G. (Hrsg.): Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 103: 179-188, Berlin
- Köstler, J., E. Brückner & H. Bibelriether (1968): Die Wurzeln der Waldbäume, 284 S., Hamburg & Berlin
- Krath, U. (2001): Oberflächenabdichtung der Deponie Fernthal (Kreis Neuwied) - Wasserhaltungsoptimierung und KDB-Abdichtung im Systemverbund, in: Maier-Harth, U. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz: 227 – 245

- Krebs, M. (1995): Biogene Bodengefüge: Pflanzenartspezifische Oberboden-Mikrogefüge und Aspekte ihrer Entstehung. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 26, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart
- Kuntze, H., G. Roeschmann & G. Schwerdtfeger (1994): Bodenkunde, 424 S., Stuttgart
- Kutschera, L. & E. Lichtenegger (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen, Band 2 Pteridophyta und Dicotyledoneae, Teil I, 851 S., Stuttgart, Jena & New York
- LAK = Landesarbeitskreis Forstliche Rekultivierung von Abbaustätten (2000): Forstliche Rekultivierung, Schriftenreihe der Umweltberatung im ISTE, Band 3, 69 S., Ostfildern
- Larcher, W. (1984): Ökologie der Pflanzen, 403 S., Stuttgart
- Lee, K.E. (1985): Earthworms - Their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press, Sydney
- Lehnhardt, F. & H.-M. Brechtel (1980): Durchwurzelungs- und Schöpftiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen, Allg. Forst- und Jagd-Zeitschrift 151(6/7): 120 - 127
- Linert, U. (1995): Verhalten von Pflanzenwurzeln in Oberflächenabdichtungssystemen, In: Egloffstein, Th & Burkhardt, G.: Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten - Abdichtung oder Abdeckung?, Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe 37: 15 S.
- Linn D.M., & J.W. Doran (1984): Effect of water-filled pore space on Carbondioxide and Nitrous oxide Production in tilled and non-tilled soils, Soil Sci. Am. J. 48: 1267 - 1272.
- Lyr, H., Fiedler, H.-J. & Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze, 620 S., Jena & Stuttgart
- Maier-Kühne, H.M. (1986): Morphometrische Messungen für die Bodenmikromorphologie. Dissertation Univ. Hohenheim, 133 S.
- Marinissen, J.C.Y. & F. Van Den Bosch (1992): Colonization of new habitats by earthworms, Oecologia 91: 371 - 376.
- Martin, A. (1991): Short-term and long-term effect of the endogeic earthworm *Millsonia anomala* (Omodeo) (Megascolecidae Oligochaeta) of tropical savannas on soil organic matter. Biol. Fert. Soils 11: 234-238
- Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten, Hamburger bodenkundliche Arbeiten Band 22, 330 S.
- Melchior, S., B. Steinert, K. Burger & G. Miehlich (1996): Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten, Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 37: 3 - 8
- Melchior, S., K. Berger, B. Vielhaber & G. Miehlich (2002): Großlysimeter Deponie Hamburg-Georgswerder: Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Dichtungen, Status-Workshop „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“, Arbeitsgruppe 7 - Oberflächenabdichtungssysteme des AK 6.1 & Fach-

- gebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik der Fachhochschule Lippe und Höxter, Höxter, 14 S.
- Mitscherlich, G. (1981): Wald, Wachstum und Umwelt, Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums, Band 2: Waldklima und Wasserhaushalt, 402 S., Frankfurt/Main
- Moritz, R. (1997): Erträge messen oder schätzen?, Top-Agrar 5/97: 78-81
- Müller, W. & August, H. (1997): Abdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen für die Oberfläche von Deponien, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 103: S. 49 - 58
- Münch, C. (2001): Ingenieurbioologische Verfahren bei der Rekultivierung von Deponien – eine Untersuchung zum Buschlagenbau anhand von zwei Fallbeispielen, Diplomarbeit am Institut für Landespflege der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg. 111 S.
- Murach, D., L. Ilse, F. Klaproth, A. Parth & H. Wiedemann (1993): Rhizotron-Experimente zur Wurzelausbreitung der Fichte, Forstarchiv 64: 191 - 194
- Neumann, U. (1971): Möglichkeiten der Rekultivierung von Mülldeponien, Müll und Abfall 1: 15 - 18
- Neumann, U. (1981): Anleitung zur Rekultivierung von Deponien Teil II, Texte des Umweltbundesamtes 13/81, Teil II, 103 S., Berlin
- Neururer, H. (1997a): Prüfung der LINTECO-Wurzelschutzmatte, unv. Gutachten, 3 S. + Anhang, Wien
- Neururer, H. (1997b): Prüfung der LINTECO-Wurzelschutzmatte im Freien, unv. Gutachten, 4 S. + Anhang, Wien
- Polomski, J. & N. Kuhn (1998): Wurzelsysteme, 290 S., Bern & Stuttgart
- Proksch, W. (1990): Lysimeterauswertungen zur flächendifferenzierten Ermittlung mittlerer Grundwasserneubildungsraten, Bes. Mitt. zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch 55, 74 S. + Anhang, Koblenz
- Qi, J., J.D. Marshall & K.G. Mattson (1994): High soil carbondioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir. *New Phytol.* 128: 435 - 442.
- Reichle, D.E. (1977). The role of soil invertebrates in nutrient cycling. In: U. Lohm & T. Persson (Eds.), *Soil organisms as components of ecosystems.* (pp. 145 - 156). Stockholm: Swedish Natural Science Research Council
- Rowell, D. L.(1997): *Bodenkunde : Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen*, 614 S., Berlin & Heidelberg
- Sands, R., P.B. Nugroho, D.V. Leung, O.J. Sun & P.W. Clinton (2000): Changes in soil CO₂ and O₂ concentrations when radiata pine is grown in competition with pasture or weeds and possible feedbacks with radiata pine root growth and respiration, *Plant and soil*, Vol. 225: 213 - 225.

- Satchell, J.E. (1967): Lumbricidae. In: Burges, A. und F. Raw (eds.): Soil biology. Academic Press London, 259 - 322
- Schaarschmidt, G. (1974): Zur ingenieurbioologischen Sicherung von Straßenböschungen durch Bewuchs und Lebendverbau, Dissert. TH Aachen, 166 S.
- Schaarschmidt, G. (1974): Zur ingenieurbioologischen Sicherung von Straßenböschungen durch Bewuchs und Lebendverbau, Diss. Fak. für Bauwesen d. Techn. Hochschule Aachen
- Schack-Kirchner, H. (1996): Holzernte und Bodenschutz: Wie ernst muß man das Vorsorgeprinzip nehmen?, Agrarforschung in Baden-Württemberg 26: 259 - 267, Stuttgart
- Schack-Kirchner, H., & E. Hildebrand (1998): Prozessmonitoring mit Gaskonzentrationsmessungen in Waldböden in: Hildebrand E. (Hrsg.) Der Gashaushalt von Waldböden: Messung, Modellierung und ökologische Bedeutung, Freiburger Bodenkundl. Abhandlungen 37: 9 - 149, Freiburg
- Schack-Kirchner, H., E. Hildebrand & K. v. Wilpert (1993): Ein konvektionsfreies Sammelsystem für Bodenluft, Zeitschr. Pflanzenernährung und Bodenkunde 156: 307 - 310.
- Scheffer, F. & P. Schachtschabel (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 491 S., Stuttgart
- Schiechtl, H. M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau, München, 244 S.
- Schiechtl, H. M. (1992): Weiden in der Praxis: Die Weiden Mitteleuropas, ihre Verwendung und ihre Bestimmung, Berlin, 130 S.
- Schlichting, E., Blume, H.-P. & Stahr, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum, 295 S., Berlin & Wien
- Schnittger, P. (1998): Oberflächenabdichtung für Altdeponien – Sind TA Siedlungsabfall und TA Abfall noch auf dem Stand der Technik?, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 109: S. 1 – 8
- Schriefer, T. (1981): Regenwürmer (Lumbricidae) auf unterschiedlich abgedeckten Mülldeponien - Bestandsaufnahme und Besiedlungsmechanismen, Pedobiologie 22: 153 -166
- Schroeder, P.R. & K. Berger (2001): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell, Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3, 90 S., Institut für Bodenkunde, Hamburg
- Schuppener, B. & J. Hoffmann (2000): Wirkungsweise von Gehölzen zur Stabilisierung von Hängen und Böschungen, Ingenieurbioologie 2: 47 – 53
- Schuppener, B. & J. Hoffmann (2000): Wirkungsweise von Gehölzen zur Stabilisierung von Hängen und Böschungen, Ingenieurbioologie 2: 47 – 53
- Schuppener, B. (1994): Die statische Berechnung der Bauweise Lebend Bewehrte Erde, Geotechnik 18: 204 – 213
- Soilmoisture Equipment Corp. (1996): Operating instructions TRASE 6050X1, Goleta, USA

- Stockdill, S.M.J. (1982): Effects of introduced earthworms on the productivity of New Zealand pastures, *Pedobiologia* 24: 29 - 35.
- Thielemann, U. (1986): Elektrischer Regenwurmfang mit der Oktett-Methode. *Pedobiologia* 29: 296 - 302
- v. Wilpert, K., U. Nell, M. Lukes & H. Schack-Kirchner (1998): Genauigkeit von Bodenfeuchtemessungen mit „Time Domain-Reflektrometrie“ und „Frequency Domain-Sensoren“, *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 161: 179 - 185
- Vance, E.D., Brookes, P.C. & D.S. Jenkinson (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19: 703 - 707
- Walter, H. (1990): *Vegetation und Klimazonen*, 381 S., Stuttgart
- Wattendorf, P. & G. Bönecke (1999): *Rekultivierung der Kreismülldeponie Neuenburg - Betriebsabschnitt 1 -, Teil 1: Bestandsaufnahme und Bewertung, unv. Gutachten*, Institut für Landespflege, 47 S. + Anhang, Freiburg
- Wattendorf, P. & V. Sokollek (2000): Gestaltung und Entwicklung von standortgerechtem Bewuchs auf Rekultivierungsschichten, *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* 47: 225 – 234
- Wattendorf, P. & W. Konold (2000): Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, *Zwischenbericht*, 11 S., <http://www.bwplus.fzk.de>
- Wattendorf, P. & W. Konold (2001): Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, *Zwischenbericht*, 13 S., <http://www.bwplus.fzk.de>
- Wattendorf, P. & W. Konold (2002): Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, *Zwischenbericht*, 15 S., <http://www.bwplus.fzk.de>
- Wattendorf, P. (2001): Anforderungen an die Bepflanzung von Deponien aus deponietechnischer, forstwirtschaftlicher und landespflegerischer Sicht – eine Gratwanderung zwischen landespflegerischen Zielen und langfristiger Sicherung des Deponiebauwerks, in: Maier-Harth, U. [Hrsg.]: *Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien*, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz: 213 – 226
- Wohlrab, B. (1997): Rekultivierung von Abbauflächen für den landwirtschaftlichen Pflanzenbau, in: Keller, R., Hanus, H. & Heyland, K.-U., [Hrsg.]: *Handbuch des Pflanzenbaues*, Band 1: Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion, S. 703 - 726
- Wohlrab, B., H. Ernstberger, A. Meuser & V. Sokollek (1992): *Landschaftswasserhaushalt*, 352 S., Hamburg & Berlin
- Wolf, G. (2000): Der Einfluss des Diasporengehaltes im Boden auf die Vegetationsentwicklung forstlicher Rekultivierungsflächen, in: Bönecke, G & P. Seiffert [Hrsg.]: *Spontane Vegetationsentwicklung und Rekultivierung von Auskiesungsflächen*, *Culterra* 26: 77 - 92
- Zeh, H. (1996): Biotechnische Entwässerungen und Hangstabilisierung für Mülldeponien, *Ingenieurbiologie* 4: 8 - 12

- Zimmermann, P. (o.J.): Bauen mit Altglas, Produktbeschreibung Recycling-Glassplitt incl. Gutachten der Bundesanstalt für Straßenwesen und DEKRA ETS GmbH, unveröffentlichter Bericht, 6 S. + Anhang, Bad Säckingen
- Zischak, R. (1997): Alternatives Oberflächenabdichtungssystem "Verstärkte mineralische Abdichtung mit untenliegender Kapillarsperre" - Wasserbilanz und Gleichwertigkeit -, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe 47, 149 S., Karlsruhe
- Zuidema, P. K. (1985): Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen, Diss. ETH Zürich Nr. 7667, 151 S., Zürich
- Zwölfer, F., M. Geiß, P. Adam, K. Heinrichsmeier & H. Hermann (1994): Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen, 41 S., Stuttgart

9 Anhang

Anhang 9-1: Düngung und Einsatz der Versuchsfelder

Testfeld B (Buschlagen) wurde bei der Düngung und allen Einsaaten ausgespart.

Düngung

Auf der Gesamtfläche der Testfelder K, U und D (ca. 1000 m²) wurde folgende Gesamt-Düngermenge in zwei gleichen Portionen am 30. März und 4. April 2001 ausgebracht:

	N	P₂O₅	K₂O	S
[g/m ²]	7,5	19,0	7,5	4,0

Einsatz und Pflanzungen

Auf den Versuchsfeldern K, U und D wurden folgende Einsaaten und Pflanzungen ausgeführt:

Termin	Einsatz	[kg]	= [g/m²]
Dezember 2000	Winterweizen	20	20
4. April 2001	Schoell-Saatmischung Nr. 28 (s.u.)	5	5
	Luzerne	2	2
10. April 2001	Steinklee weiß	1	1
	Pflanzung	Stk.	Raster
7. Dezember 2000	Aspe, Zitterpappel (<i>Populus tremula</i>)	135	3 x 2 m
8. November 2001	Roterle (<i>Alnus glutinosa</i>)	30	3 x 2 m
	Linde (<i>Tilia cordata</i>)	30	

Zusammensetzung der Schoell-Saatmischung Nr.28:

%	Art/Sorte	%	Art/Sorte
3	Esparsette	10	Rotschwengel <i>Tridano</i>
3	Rotklee <i>Marino</i>	10	Knaulgras <i>Baraula</i>
3	Weißklee <i>Muka</i>	5	Wiesenrispe <i>Balin</i>
2	Hornschotenklee <i>Leo</i>	2	Wiesenfuchsschwanz <i>Alco</i>
3	Schwedenklee <i>Odenwälder</i>	13	Lieschgras <i>Phlewiola</i>
2	Gelbklee <i>Virgo</i>	1	Goldhafer <i>Trisett</i>
10	Dt. Weidelgras <i>Parcour</i>	20	Wiesenschwengel <i>Cosmos</i>

Das Umfeld der Versuchsanlage wurde jeweils zeitgleich mit 5 kg Rasenmischung und 1 kg gelben Steinklee eingesät sowie mit Zitterpappeln bepflanzt.

Anhang 9-2: Eingabedaten der Wasserhaushaltsmodellierung - Boden -

Boden- und Aufbaudaten										Kurvenzahlberechnung				
	m ²	%		cm		[Vol/Vol]				%	m			
Profil/Horizont	Fläche	Anteil Ao	Schichttyp	Mächtigkeit	Texture No.	PV - Steingehalt	FC- Steingehalt	WP- Steingehalt	Gesätt. Leitfähigkeit	Neigung	Hanglänge	US-Texture.	LAI	Kurvenzahl
Kb														
1	360	100	1	35	517	0,345	0,310	0,190	0,000069	40	38	23	5	
2			1	30	517	0,379	0,310	0,190	0,000069					
3			1	45	517	0,383	0,310	0,190	0,000069					
4			1	90	517	0,375	0,312	0,190	0,000069					
Kd														
1	360	100	1	35	517	0,345	0,310	0,190	0,000069	42	38	23	5	
2			1	30	517	0,371	0,310	0,190	0,000069					
3			1	45	517	0,348	0,310	0,190	0,000280					
4			1	90	517	0,364	0,312	0,190	0,000280					
Ub														
1	360	100	1	35	517	0,395	0,287	0,190	0,000069	38	38	23	5	
2			1	30	517	0,405	0,287	0,190	0,000069					
3			1	45	317	0,447	0,301	0,195	0,000069					
4			1	90	317	0,443	0,332	0,195	0,000069					
Ud														
1	360	100	1	35	517	0,337	0,287	0,190	0,000069	42	38	23	5	
2			1	30	517	0,352	0,287	0,190	0,000069					
3			1	45	517	0,413	0,287	0,190	0,000069					
4			1	90	517	0,409	0,297	0,190	0,000069					
P1														
1		100	1	24	111	0,312	0,235	0,137	0,000475	29	15	22	5	
2			1	28	111	0,312	0,235	0,137	0,000475					
3			1	58	111	0,356	0,268	0,156	0,000475					
4			1	40	113	0,320	0,264	0,152	0,000231					
5			1	15	323	0,342	0,295	0,147	0,000104					

Anhang 9-2:
Eingabedaten der Wasserhaushaltsmodellierung - Evapotranspiration -

Profil Nr.	Geo. Breite	Tiefe Evaporationszone [cm]	Maximaler LAI	2001						
				Veget.-Zeit		[km/h]	rel. Luftfeuchte [%]			
				Beginn	Ende		1. Quartal	2. Quartal	3. Quartal	4. Quartal
Kb	48,8	70 ¹ +30 ²	5	117	304	11,2	77,9	67,0	69,0	82,0
Kd	48,8	20 +30	5	117	304	11,2	77,9	67,0	69,0	82,0
Ub	48,8	90 +30	5	117	304	11,2	77,9	67,0	69,0	82,0
Ud	48,8	100 +30	5	117	304	11,2	77,9	67,0	69,0	82,0
P1	48,8	24 +30	5	117	304	11,2	77,9	67,0	69,0	82,0

¹: Durchwurzelungstiefe mit mindestens Stufe W2 (nach AG BODEN 1994)

²: zuzüglich kapillare Nachlieferung aus dem Unterboden

Anhang 9-3: Wassergehalt-/Wasserspannungskurven

