

Der Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Vegetationsentwicklung und den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten - Auswertung der Lysimeteruntersuchungen auf den Testfeldern der Deponie Leonberg (Baden-Württemberg)

Peter Wattendorf & Otto Ehrmann

1 Einleitung

Die Rekultivierungsschicht als äußerstes Element des Oberflächenabdichtungssystems ist die „Schnittstelle“ zwischen Deponie und Umgebung. Sie bestimmt das Aussehen des Bauwerks, das ein Landschaftselement werden soll, wesentlich mit, denn sie ist Tragschicht und damit Standort für den Bewuchs, der die Deponie in ihre Umgebung integriert. Möglichkeiten der Folgenutzung, in der Regel extensiver Art wie beispielsweise Forstwirtschaft, Freizeitaktivitäten oder Erholung hängen ebenfalls von ihrer Beschaffenheit ab.

Seit einigen Jahren wird auch dem Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt. Im Hintergrund steht die Frage, ob und unter welchen Bedingungen die Rekultivierungsschicht Funktionen von Abdichtungselementen, wie der mineralischen Dichtung, übernehmen und diese damit ganz oder teilweise ersetzen kann.

Konkret heißt das: Wie viel Wasser wird in der Rekultivierungsschicht unter gegebenen Klimabedingungen auf natürlichem Weg aufgefangen, gespeichert und verdunstet? Aus der Rekultivierungsschicht wird eine „Wasserhaushaltsschicht“ oder „Qualifizierte Rekultivierungsschicht“, deren besondere Aufgabe es ist, möglichst viel Niederschlagswasser von Dichtungssystem oder Deponiekörper fern zu halten. Besonders in Regionen mit unterdurchschnittlicher Niederschlagsmenge oder relativ ausgeglichener klimatischer Wasserbilanz ist diese Frage interessant.

In Zeiten knapper öffentlicher Mittel wird auch die Sicherung von Altlasten mit reduzierten Oberflächenabdichtungen oder ausschließlich mit dem System „Rekultivierungsschicht + Bewuchs“ diskutiert, weil aufwändige Sanierungen nur im Einzelfall bezahlbar erscheinen und sicher auch nicht jedem Einzelfall angemessen sind.

Unabhängig von diesen Fragen kann die Rekultivierungsschicht in jedem Fall einen wichtigen Beitrag zum Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtung leisten, weil sie einen Teil des Niederschlagswassers durch Verdunstung auf natürlichem Weg eliminiert. Auch gedämpfte Abflussspitzen und insgesamt gleichmäßigere Abflussraten können als Leistungen der Rekultivierungsschicht verbucht werden.

Es liegt auf der Hand, dass die Leistungsfähigkeit der Rekultivierungsschicht, vor allem als „Wasserhaushaltsschicht“, von der Qualität der Ausführung bestimmt wird.

Bereits in Punkt 10.4.1.4d) der TASI (1993) sind wesentliche Anforderungen an Rekultivierungsschichten genannt:

- Mächtigkeit mindestens 1 m kulturfähiger Boden¹
- Ausführung dergestalt, dass die Dichtung vor Frost und Wurzeleinwirkung geschützt ist
- Bepflanzen mit geeignetem Bewuchs, der ausreichenden Schutz vor Wind- und Wassererosion bieten muss
- Auswahl des Bewuchses – und zwar unter Einsatz von Wasserhaushaltsbetrachtungen – so, dass die Infiltration von Niederschlagswasser ins Entwässerungssystem minimiert wird

Aktuelle GDA-Empfehlungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten (E2-31) und ihres Bewuchses (E2-32) sowie zur Wasserhaushaltsmodellierung von Oberflächenabdichtungssystemen (E2-30) können und sollen eine fallbezogene Fachplanung beim Bau der Rekultivierungsschicht zwar nicht ersetzen, geben aber wichtige Hinweise zur Herangehensweise und liefern die Grundlagen zum Verständnis der Problematik.

Die Deponieverordnung von 2002 konkretisiert in Anhang 5 die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht dahin gehend, dass der systemare Gedanke stärker zum Tragen kommt. Inzwischen war die Erkenntnis gereift, dass Boden und Vegetation als System zu sehen sind, dessen Komponenten nicht unabhängig voneinander funktionieren können (siehe hierzu BRAUNS et al. 1997). Im Einzelnen heißt das:

- Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht soll sich an
 - der effektiven Durchwurzelungstiefe der Vegetation
 - der Höhe des pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats und
 - besonderen Schutzerfordernissen orientieren.
- Das Bodenmaterial soll eine hohe nutzbare Feldkapazität und eine ausreichende Luftkapazität besitzen, um einen hohen pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrat zu erreichen.
- Grenzen für chemische Eigenschaften (pH, Leitfähigkeit), Schadstoffgehalte und Eluatkonzentrationen werden definiert.

Bleibt schließlich der in letzter Zeit häufig strapazierte Aspekt „Nachhaltigkeit“. Die Lebensdauer aller technischen Dichtungselemente ist zeitlich begrenzt, die Funktion der mineralischen Abdichtung umstritten. Es ist nicht damit zu rechnen, dass Dichtungen abgeschlossener Deponien zukünftig über sehr lange Zeiträume gewartet und repariert werden. Demnach bleibt eines (fernen?) Tages wohl nur noch die Rekultivierungsschicht mit ihrer Pflanzendecke als Barriere zwischen Deponie und Umgebung übrig. Vor diesem Hintergrund nennt BOTHMANN (2005) letztlich mit Recht die Rekultivierungsschicht langfristig gesehen *das wichtigste Element im Oberflächenabdichtungssystem* von Deponien.

Eine Literaturstudie zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten mit Waldbewuchs (BRAUNS et al. 1997) offenbarte, dass praktische Erfahrungen zu wichtigen Fragen fehlten. Dies gab den Anlass, im Jahr 1999 ein Forschungsvorhaben² über die Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften und Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten zu starten. Insbesondere Auswirkungen des praxisüblichen Boden verdichtenden Einbaus sollten in Großlysimetern untersucht werden. Betrachtet wurden Aspekte der praktischen Ausführung, der Standsicherheit sowie der Boden- und Vegetationsentwicklung (siehe WATTENDORF et al. 2005). Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus den seit nunmehr sechs Jahren in den Leonberger Lysimeterfeldern laufenden Versuchen beschrieben.

¹ Kulturfähig = Das Substrat ist für Kulturpflanzen geeignet und verliert bei Umlagerung diese Eigenschaft nicht oder gewinnt sie in absehbarer Zeit wieder zurück (nach ZWÖLFER et al. 1994).

² Projektleitung: Prof. Dr. W. Konold, Finanzierung: Land Baden-Württemberg (Programm BWPLUS) und Landkreis Böblingen

2 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“ wurde im Herbst 2000 im Zuge der Rekultivierung der ehemaligen Kreismülldeponie Leonberg (Landkreis Böblingen) in eine bestehende Böschung integriert. Der Aufbau der beiden Großlysimeter entspricht einer Regel-Oberflächenabdichtung: Auf dem als mineralische Dichtung ausgeführten Untergrund liegt eine verschweißte 2,5 mm starke KDB. Sie wurde zur Begrenzung der Lysimeterfelder über Randdämme hochgezogen, so dass zwei nebeneinander liegende geschlossene Wannen entstanden. In diese Wannen wurden auf einer 30 cm starke mineralische Entwässerungsschicht mit Sickerwasserfassung die beiden Versuchsvarianten der Rekultivierungsschicht eingebaut:

- „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ **Feld U**
Der unverdichtete Einbau wurde mit einer leichten Raupe (D4) ausgeführt. Der Boden wurde hangabwärts Vor-Kopf in der vorgesehenen Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht ohne Zwischenverdichtung eingeschoben.
- „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ **Feld K**
Der konventionell eingebaute Boden wurde mit der gleichen Raupe sukzessive in drei Lagen aufgebracht und jeweils mit Vibrationswalze auf circa 0,95 ρ_{Pr} verdichtet.

Nach Abschluss der Bodenarbeiten wurden die Testfelder mit Winterweizen als Erosionsschutz sowie einer Gräser-Kräuter-Mischung eingesät und mit Aspen (*Populus tremula*) bepflanzt. Um eine zügige Bestandesentwicklung zu fördern, wurden Ausfälle durch Wühlmäuse und andere Schäden durch weitere Gehölzarten sukzessive ersetzt.

Tabelle 1: Eigenschaften der „Leonberger Lysimeterfelder“ (Stand 2004)

Lysimeterfeld	K	U	
Fläche	360		[m ²]
Exposition	Ost-Süd-Ost		
Hangneigung	< 1:2,7		
Mächtigkeit Rekultivierungsschicht (Ø)	2,1		[m]
Einbauverfahren	verdichtet 3 Lagen	unverdichtet	
Bodenart	Ut2, Ut3		
Steingehalt	< 1		[Vol-%]
Trockenraumdichte (25 – 100 cm Tiefe)*	1,57 - 1,71	1,57 - 1,67	[g/cm ³]
Feldkapazität**	34 – 35,5	35,3 – 35,9	[Vol-%]
Totwasseranteil ***	ca. 12		[Vol-%]

*: Ø der Tiefen 25, 50, 85 und 100 cm; **: in situ Messung; ***: aus AG BODEN (2005), Bodenart Ut3

Das Sickerwasser aus den Rekultivierungsschichten fließt in der Entwässerungsschicht auf der KDB hangabwärts und wird am tiefsten Punkt der Lysimeterfelder gesammelt. Der Oberflächenabfluss wird am Fuß des Feldes U³ in einer Rinne gefasst. Die Abflüsse aus den Lysimeterfeldern werden in einer Messstation unterhalb der Versuchsanlage mit einer zeitlichen Auflösung von in der Regel 10 Minuten registriert.

³ Aus Kostengründen wird nur der Oberflächenabfluss des U-Feldes gemessen. Da die Bodenoberfläche beider Versuchsfelder gleich gestaltet ist, sind gleiche Oberflächenabflussraten zu erwarten.

Im Zeitraum Juni 2001 bis April 2004 wurde der Bodenwassergehalt regelmäßig an vier Messstellen pro Lysimeterfeld mit TDR-Sonden in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe gemessen, an je zwei Messstellen pro Testfeld wurden die Bodenwasserspannung und der CO₂-Gehalt der Bodenluft in den gleichen Tiefenstufen bestimmt.

3 Funktion der Rekultivierungsschichten als Standort

Um die hypothetisch unterschiedlichen Standorteigenschaften der Lysimeterfelder zu untersuchen und qualitativ und quantitativ zu erfassen, wurde über mehrere Jahre die Entwicklung der Bodeneigenschaften, der Vegetation und der Regenwürmer dokumentiert.

3.1 Bodeneigenschaften

Die Rekultivierungsschichten der beiden Lysimeterfelder unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren. Bodenmaterial, Bodenbearbeitung und Bepflanzung sind gleich (siehe Tabelle 1 und WATTENDORF et al. 2005). Der sehr homogene Lösslehm ist bei Gehalten an organischer Substanz von 0,5 % fast humusfrei und praktisch steinfrei. Die Trockenraumdichte des Bodens im Entnahmestadium war relativ hoch und lag zwischen 1,44 und 1,77 g/cm³, im Mittel bei 1,57 g/cm³.

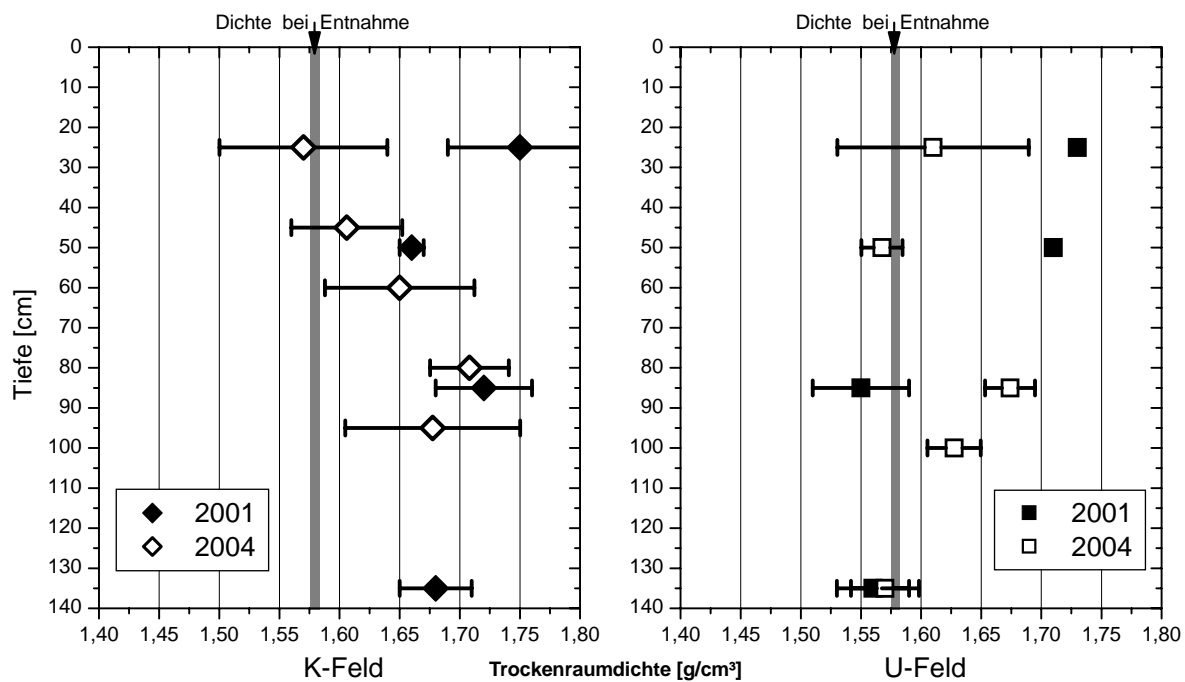


Abbildung 1: Tiefenverlauf und zeitliche Entwicklung der Trockenraumdichten am Beispiel je eines Profils des K- und des U-Feldes; Probenahme Januar/Juni 2001 und April 2004

In Folge natürlicher Setzungsprozesse hat der unverdichtete Boden des U-Feldes im Jahr 2004 die Trockenraumdichte des Entnahmestadiums mehr oder weniger wieder erreicht. Somit bestehen heute keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Trockenraumdichte der Felder U und K (Tabelle 1). Allerdings sind nach wie vor die Trockenraumdichten einzelner Tiefenstufen, vor allem des Unterbodens, (siehe Abbildung 1) sowie

die Eindringwiderstände des Bodens im K-Feld höher als im U-Feld (siehe EHRMANN & WATTENDORF 2005).

Wie Abbildung 1 zeigt, lösen sich Oberbodenverdichtungen in relativ kurzer Zeit auf, außerdem wird der Oberboden nach dem Einbau meist aufgelockert. Verdichtungen des Bodens in einer Tiefe von mehr als 60 cm sind jedoch technisch kaum mehr zu beseitigen und werden auch auf natürlichem Wege durch Gefügebildung nicht mehr oder nur extrem langsam aufgelöst. Sie sind deshalb von großer Bedeutung für die Rekultivierungspraxis (siehe ZWÖLFER et al. 1994).

3.2 Vegetationsentwicklung und Durchwurzelung

Die Vegetationsuntersuchungen an Gehölzen und krautigen Pflanzen belegen Unterschiede zwischen unverdichteter und verdichtet eingebauter Rekultivierungsschicht:

- Die nach Abschluss der Bauarbeiten im Dezember 2000 angepflanzten Aspen etablierten sich im Testfeld mit unverdichtet eingebauter Rekultivierungsschicht (Feld U) deutlich besser als im Feld mit verdichtetem Boden (Feld K). So betrug bei der Bonitierung des Anwuchserfolges der Gehölze im Sommer 2001 der Anteil abgestorbener Bäume im U-Feld 10 %, im K-Feld dagegen 32 %.
- Seit 2002 sind sowohl die Stammdurchmesser als auch die Raten des Dickenwachstums der verbliebenen Zitterpappeln im U-Feld immer noch geringfügig höher als im K-Feld. Der Gehölzbestand im U-Feld wirkt augenscheinlich kräftiger und vitaler als im K-Feld.

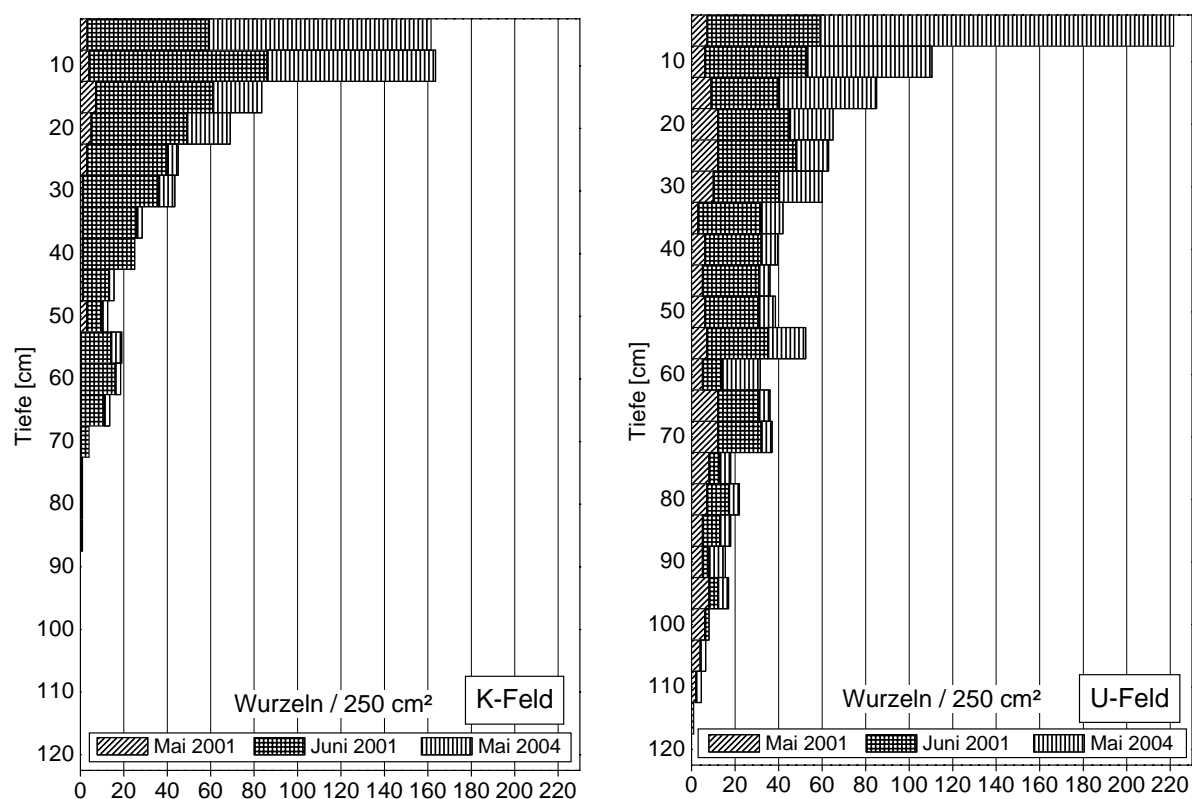


Abbildung 2: Durchwurzelung der Rekultivierungsschicht des K- (links) und des U-Feldes (rechts); Ergebnisse von drei Aufgrabungen im Mai/Juni 2001 und Mai 2004

- Sowohl die ersten Aufgrabungen im Jahr 2001 als auch spätere Untersuchungen im Jahr 2004 belegen eine tiefer reichende und intensivere Durchwurzelung des Bodens im U-Feld. Insbesondere die Tiefendurchwurzelung des unverdichteten Bodens ist deutlich besser (Abbildung 2). Dies ist sicher darauf zurückzuführen, dass im Unterboden des K-Feldes zeitweise anaerobe Verhältnisse⁴ und Staunässe (siehe 4.4.1) herrschen.

3.3 Entwicklung des Bodenlebens: Regenwürmer

Für eine gelungene Rekultivierung ist ein vielfältiges Bodenleben notwendig, welches die Funktionen Streuabbau, Nährstofftransfer und Aufbau eines stabilen Bodengefüges erfüllt. Regenwürmer fördern durch ihre Aktivität diese Bodenentwicklung, sie sind deshalb gerade auf gestörten Standorten eine sehr wichtige Tiergruppe.

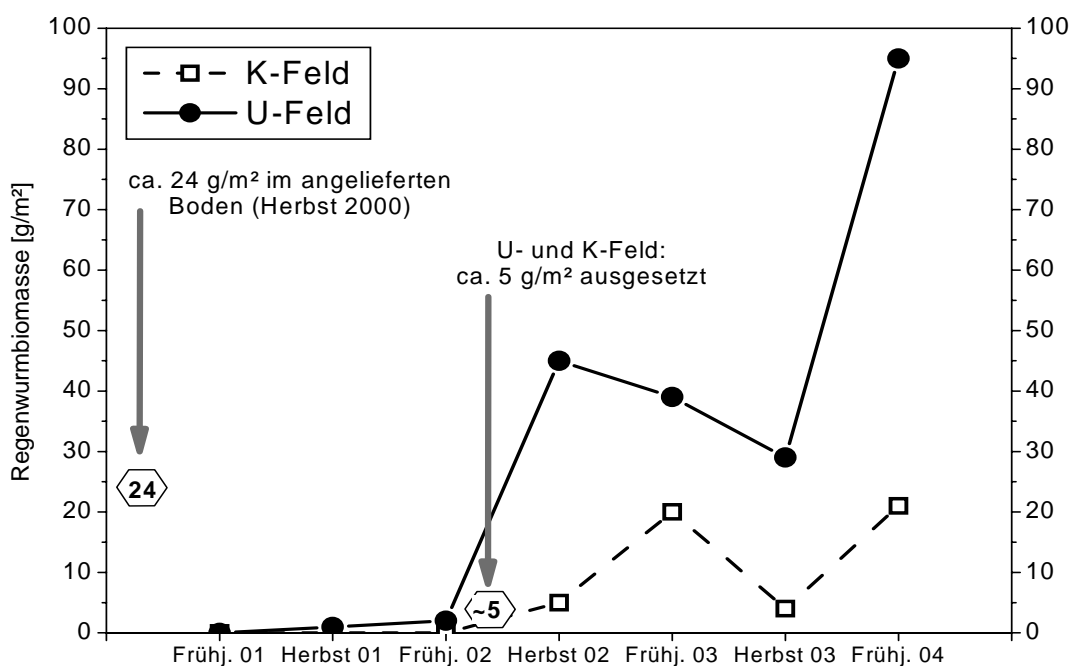


Abbildung 3: Entwicklung der Regenwurm-Biomasse in den Lysimeterfeldern U und K von Frühjahr 2001 bis Herbst 2003.

Durch den Bodeneinbau in die Lysimeterfelder wurde die im Bodenmaterial lebende Regenwurmpopulation (ca. 24 g/m²) fast vollständig vernichtet. Regenwurmpopulationen entwickeln sich prinzipiell sehr langsam. Trotz stetiger Zunahme der Biomasse, vor allem im U-Feld (Abbildung 3), war nicht zu erwarten, dass sich in absehbarer Zeit eine adäquate Population ausbilden würde. Um die Besiedlung zu beschleunigen, wurden im Frühjahr 2002 in jedem Testfeld Rasensoden aus einer Wiese mit reicher Regenwurmfauna ausgebracht (je 1 m² pro Lysimeterfeld). Die nächste Untersuchung im Herbst 2002 zeigte einen Anstieg der Regenwurmbiomassen im U-Feld von 2 auf 45 g/m² und im K-Feld von 0 auf 5 g/m² (Abbildung 3). Diese Entwicklung kann nicht durch die Vermehrung der im Bodenmaterial vorhandenen Regenwürmer verursacht sein, denn derart hohe Zuwachsraten sind bisher nicht bekannt.

⁴ Quelle: Untersuchung des Bodengashaushalts, siehe SCHACK-KIRCHNER (2005)

Weiterhin wurde eine zuvor nicht auf der Fläche gefundene Regenwurmart eingebracht und später wieder gefunden. Das Einbringen von Regenwürmern ist demnach geeignet, um die Entwicklung nach Rekultivierungen zu beschleunigen. Die extreme Trockenheit im Sommer 2003 führte zu einem deutlichen Rückgang der Regenwürmer. Im U-Feld war der Verlust an Biomasse mit circa 25 % jedoch erheblich geringer als im K-Feld mit ungefähr 90 %.

Die Untersuchungen in Leonberg zeigen schon nach wenigen Jahren, dass unverdichteter Bodeneinbau für Regenwürmer deutlich günstiger ist, denn nach den Erdbaumaßnahmen baute sich die Population schneller auf als in einer verdichteten Rekultivierungsschicht.

4 Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten

4.1 Oberflächenabfluss

Nach dem Einbau der Rekultivierungsschichten in die Leonberger Lysimeterfelder wurde der durch Befahren mit der Raupe verdichtete Oberboden mit der Baggerschaufel aufgelockert. Das Ergebnis war eine sehr raue Oberfläche mit einer hohen Rückhaltekapazität für Regenwasser. Dies allein reichte aus, um die im Winter 2000/01 noch praktisch unbegrünte Rekultivierungsschicht vor Oberflächenabfluss und Erosion zu schützen.

Meist wird der Oberflächenabfluss von Deponieböschungen stark überschätzt. Hat sich erst ein dichter Bewuchs etabliert und ist der Oberboden durch Gefüge- und Humusbildung und biologische Aktivität gelockert, so wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers vermindert und es infiltriert in den Boden. Auch in Leonberg fließt trotz der relativ steilen Böschung mit einer Neigung bis 1: 2,7 praktisch kein Wasser an der Oberfläche aus den Lysimeterfeldern ab. Bisher wurde nur einmalig im Sommer 2001 bei einem Starkregen Oberflächenabfluss registriert, er kann demnach bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt werden kann.

4.2 Sickerwassermengen

Der wichtigste Aspekt bei der Beurteilung der Wirksamkeit einer Rekultivierungsschicht ist die Betrachtung der Sickerwassermengen. Hier unterscheiden sich die beiden Lysimeterfelder U (unverdichtete Rekultivierungsschicht) und K (konventionell verdichtet) inzwischen deutlich. Die Summenkurven der Absickerung beider Felder ab Juni 2003 sind in Abbildung 4 zusammen mit dem Niederschlag aufgetragen. Bis September 2004 zeigen beide Absickerungskurven einen sehr ähnlichen Verlauf, nur kurzzeitig übersteigt die Sickerwassermenge des K-Feldes die des U-Feldes. Die Summenkurve des K-Feldes verläuft fast gleichmäßig um circa 10 mm über der des U-Feldes. Auf Grund der trockenen Witterung des Jahres 2003 summiert sich die Sickerwassermenge in den ersten 16 Monaten der Aufzeichnung auf insgesamt nur ungefähr 100 mm. Erst im Herbst und Winter 2004/05 versickerte im K-Feld deutlich mehr Wasser, so dass die Differenz zwischen den Feldern im April 2005 bereits circa 90 mm beträgt. An diesem Verhältnis ändert sich während des Sommers 2005 wegen der relativ geringen Absickerungsraten nur wenig. Im Winter 2005/06 steigen die Absickerungsraten beider Felder wieder an, die des U-Feldes stärker als die des K-Feldes.

Die Gesamt-Sickerwassermenge zwischen Juni 2003 und Februar 2006 (33 Monate) beträgt im K-Feld 369 mm und im U-Feld 263 mm, das sind circa 24 % beziehungsweise 17,7 % des Niederschlags von 1544 mm in diesem Zeitraum. Die Sickerwassermenge des Lysimeterfeldes U beträgt somit nur circa 71 % der Wassermenge des K-Feldes.

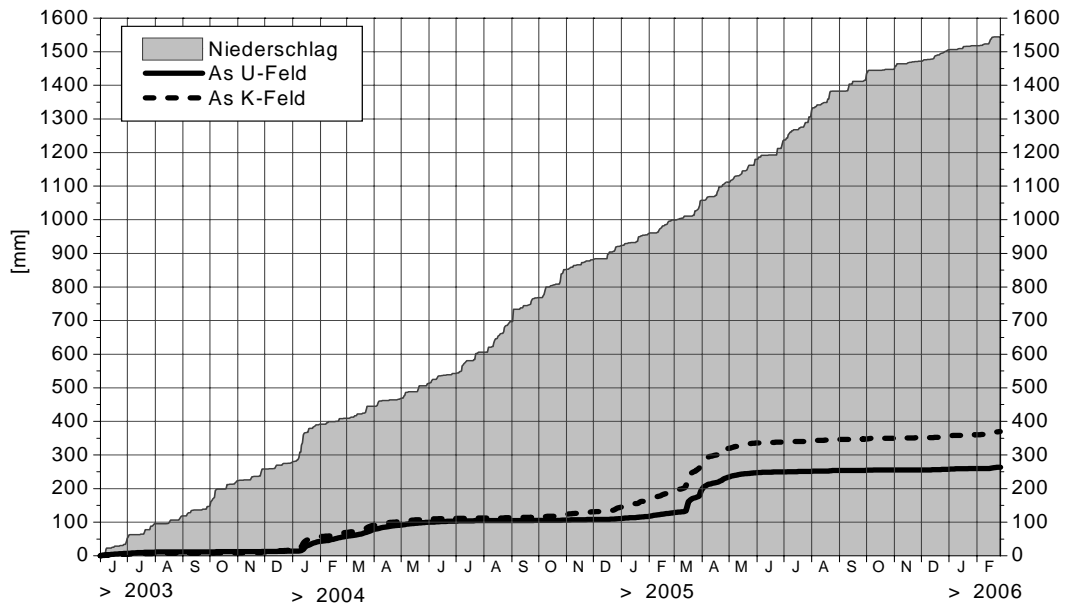


Abbildung 4: Summenkurven von Niederschlag und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K von Juni 2003 bis Februar 2006; Niederschlagsdaten DWD-Station Renningen, ab 1.01.2006 DWD-Station Stuttgart-Echterdingen (Im Juli 2005 keine Daten aus dem K-Feld, zur Fortführung der Summenkurve deshalb Werte des U-Feldes eingesetzt)

Die Relation Niederschlag/Absickerung ist von der Niederschlagsmenge und -verteilung abhängig. In Abbildung 5 sind Niederschlag und Absickerung für die hydrologischen Jahre (1.11. bis 31.10.) 2003/04 und 2004/05 aufgetragen. Im gegenwärtigen Zustand der Rekultivierung versickern selbst im günstigen Fall (U-Feld 2003/04) noch 15 % des Niederschlages, absolut in diesem Zeitraum 94 mm. Damit ist die unverdichtete Rekultivierungsschicht bei gleichem Materialeinsatz erheblich wirkungsvoller als die verdichtete Variante. Von einer leistungsfähigen Wasserhaushaltsschicht werden aber höhere Wirkungsgrade erwartet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Verdunstung und damit der Wirkungsgrad mit dem weiteren Wachstum der Gehölzbestände auf den Versuchsfeldern ansteigt.

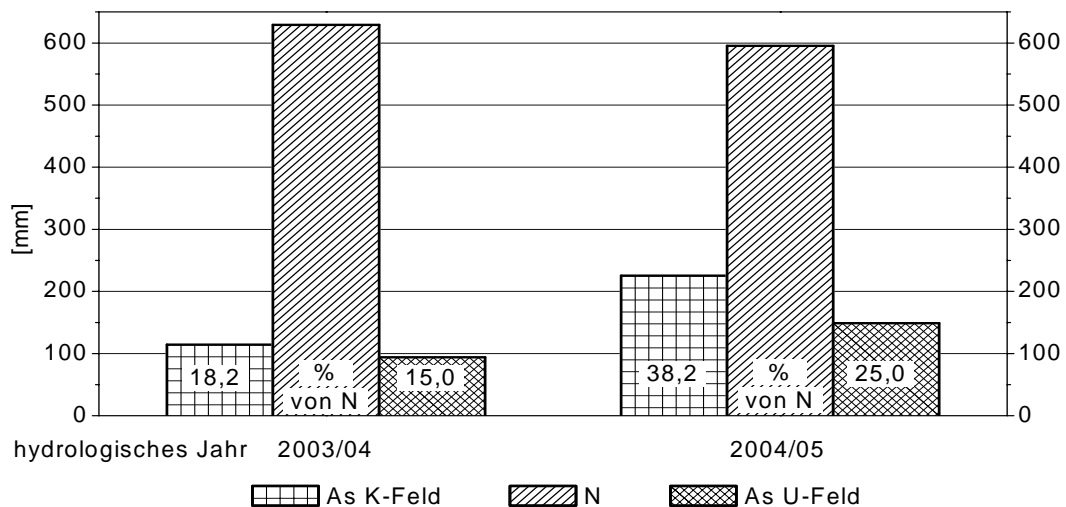


Abbildung 5: Niederschlag (N), Absickerung (As) und prozentualer Anteil von As an N aus den Testfeldern K und U; Zeitraum: hydrologische Jahre 2003/04 und 2004/05

4.3 Abflussverhalten der Testfelder

In Abbildung 6 sind die täglichen Niederschlagsmengen sowie die Absickerungsraten der beiden Lysimeterfelder aufgetragen. Bei dieser hohen zeitlichen Auflösung zeigen sich Gemeinsamkeiten, aber auch erhebliche Unterschiede zwischen beiden Feldern:

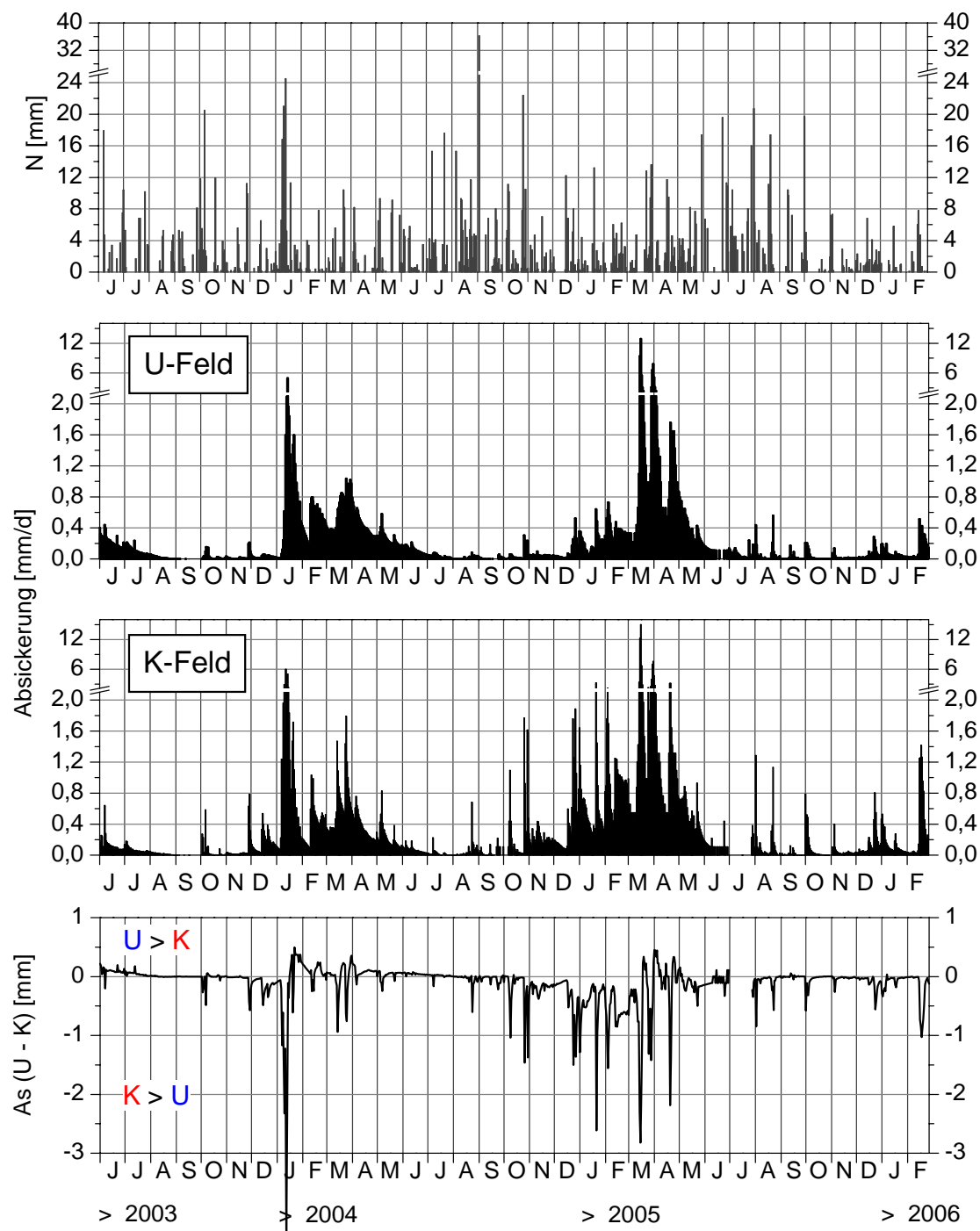


Abbildung 6: Tagessummen von Niederschlag (N) und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K sowie Differenz der täglichen Absickerungsraten (AsU - AsK) von Juni 2003 bis Februar 2006; Niederschlag: DWD-Station Renningen, ab 1.1.2006 DWD-Station Stuttgart-Echterdingen; Juli 2005: keine Werte aus Lysimeterfeld K

- In Zeiten mit geringer Verdunstung und hoher Bodenwassersättigung (v.a. im Winter) treten die höchsten Absickerungsraten auf. Anhaltende Niederschläge zu anderen Jahreszeiten verursachen nur kurzzeitig erhöhte Werte. Die maximalen täglichen Absickerungsraten der Lysimeterfelder unterscheiden sich nicht sehr deutlich; so beträgt der höchste Tagesabfluss - gemessen am 16.03.05 - aus dem K-Feld 15,0 mm und aus dem U-Feld 12,8 mm.
- Es zeichnet sich eine unterschiedliche Reaktion auf Niederschläge ab. Das K-Feld reagiert mit schnellerem Ansteigen und Absinken der Abflussmenge auf Niederschläge. Während die Absickerungsraten des U-Feldes meist langsam steigen und sinken, treten im K-Feld öfter einzelne Tage mit erheblich höherer Absickerung auf.
- Das U-Feld dämpft die Abflussspitzen nach Niederschlagsereignissen stärker als das K-Feld. Dies wird besonders im Oktober und Dezember 2004 sowie im Januar und Februar 2005 deutlich. Zum Beispiel regnete es am 23. und 24. August 2004 insgesamt 21,7 mm, die Absickerungsrate des U-Feldes stieg in diesen beiden Tagen von 0,02 mm/d auf 0,08 mm/d, die des K-Feldes von 0,01 mm/d auf 0,68 mm/d.
- Die Kurve der Differenz zwischen Absickerung U-Feld und K-Feld (Abbildung 6, unten) macht das unterschiedliche Abflussverhalten nochmals deutlich: Die Abflüsse aus Lysimeterfeld U sind 2003/04 oft über längere Zeiträume geringfügig höher als die des K-Feldes (Kurve liegt im positiven Bereich), deutlich ausgeprägt beispielsweise im Juni und Juli 2003 oder März bis Juli 2004. Im Gegensatz dazu schlägt die Kurve – außer im Januar 2004 – meist nur kurzzeitig in den negativen Bereich aus, wenn Spitzenabflüsse aus Lysimeterfeld K die des U-Feldes weit übersteigen.
- Erst seit Frühsommer 2005 verläuft die Differenzkurve fast durchgehend im negativen Bereich. Sie zeigt damit an, dass im U-Feld unabhängig von aktuellen Ereignissen nunmehr weniger Wasser versickert. Die höhere Verdunstung des U-Feldes aufgrund günstigerer Bodeneigenschaften verbessert den Wirkungsgrad.

4.4 Bodenwasserhaushalt

4.4.1 Stauwasser

Stauwasser kann sich vor allem in Zeiten hoher Wassersättigung des Bodens bilden. Die Wasserspannungskurven der Tiefenstufen 135 und 185 cm (Abbildung 7) zeigen einen wesentlichen Unterschied im Wasserhaushalt der beiden Lysimeterfelder: Bei hohen Bodenwassergehalten, wie sie im Winter 2001/02, von Ende Oktober 2002 bis Mai 2003 sowie kurzfristig im April 2004 gemessen wurden, zeigen alle Messstellen des K-Feldes in 135 und 185 cm Tiefe durchgehend Bodenwasserspannungen $< 0 \text{ hPa}^5$ an. Im Gegensatz dazu unterschreiten die Wasserspannungswerte in den Messstellen des U-Feldes in 135 und 185 cm Tiefe nur einmalig die 0-hPa-Grenze⁶ und steigen danach sofort wieder an.

Die in Testfeld K in den Herbst- und Wintermonaten gemessenen negativen Wasserspannungen im Unterboden belegen, dass sich zu Zeiten hoher Wassersättigung Stauwasser auf den verdichteten Lagen der Rekultivierungsschicht ausgebildet hat. Zeitweise wirkt dieser Stauwassereinfluss in abgeschwächter Form bis auf die in 85 cm Tiefe eingesetzten Tensiometer.

⁵ Minimum: -58 bis -65 hPa in 185 cm Tiefe, vom 25.10. – 25.01.2003 (Messzeitraum Juni 2001 – April 2004)

⁶ Minimum: -21 hPa in 135 cm Tiefe, am 08.01.2003 (Messzeitraum Juni 2001 – April 2004)

Dieses Stauwasser tritt sowohl am Unterhang als auch - weniger ausgeprägt – am Oberhang des K-Feldes auf. Somit ist davon auszugehen, dass sich zeitweise eine durchgehende Stauschicht auf der gesamten Böschung ausbildet. Da sich das Stauwasser meist außerhalb der Vegetationszeit überwiegend in mehr als 1 m Tiefe bildet und aufgrund des Gefälles abziehen kann, ist sein Einfluss auf die Vegetation zumindest vorläufig noch gering. In ebener Lage wären Wuchsschäden zu befürchten. Aus Gründen der Standsicherheit sollte Stauwasser in Rekultivierungsschichten jedoch vermieden werden.

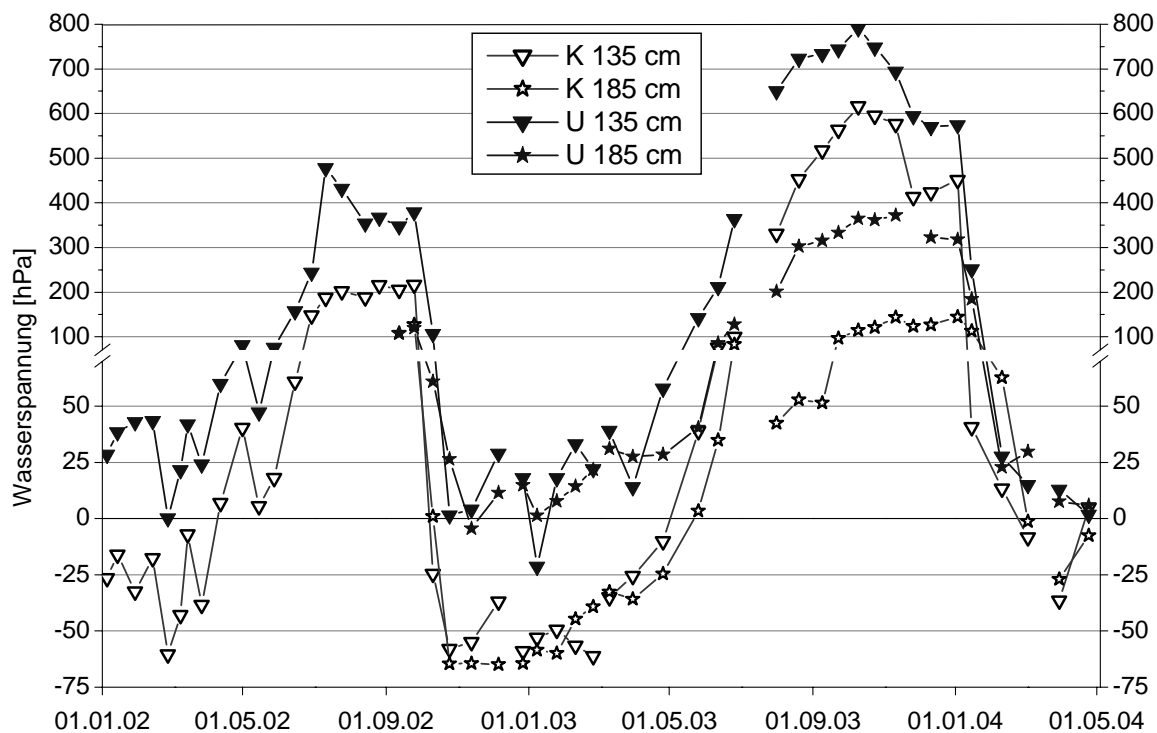


Abbildung 7: Bodenwasserspannung im Unterboden der Versuchsfelder; Mittelwerte aus jeweils zwei Messstellen

4.4.2 Verdichtung und Wassergehalte im K-Feld

Im August 2002 wurde ein Profil in der lagenweise verdichteten Rekultivierungsschicht des K-Feldes mit insgesamt zehn TDR-Sonden bestückt. Diese Sonden wurden gezielt in und zwischen den Verdichtungszone des Bodens eingebracht. Die Ergebnisse der Messungen sind jeweils für die zweite Jahreshälfte 2002 und 2003 in Abbildung 8 dargestellt.

Im feuchten Sommer 2002 (Abbildung 8, oben) weichen die Wassergehalte im Tiefenprofil nur um wenige Volumen-Prozent voneinander ab. Charakteristisch für das Profil im K-Feld sind geringfügig höhere Wassergehalte in den am stärksten verdichteten Zonen (in Abbildung 8 grau unterlegt). Hier ist das Volumen der luftführenden weiten Grobporen reduziert, und bei starker Verdichtung der Anteil an fest gebundenem „Totwasser“ in Feinporen größer. Auch in der weniger stark verdichteten Bodenschicht unmittelbar darüber sind die Wassergehalte meist erhöht, weil das Wasser nur langsam versickern kann. So wird im Herbst und Winter, zumindest in 91 und 154 cm Tiefe, die Feldkapazität von circa 36 Vol-% überschritten. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, führt dieser Wasserüberschuss zu zeitweise stauartigen Bedingungen (Abbildung 7).

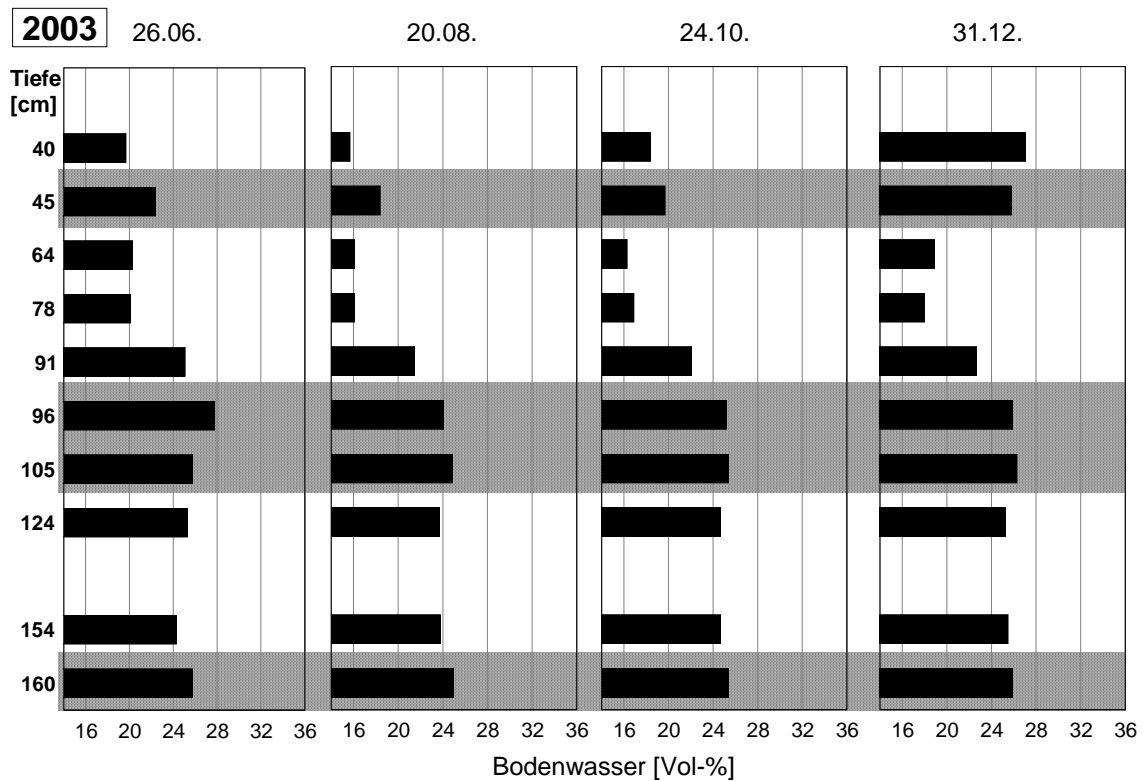
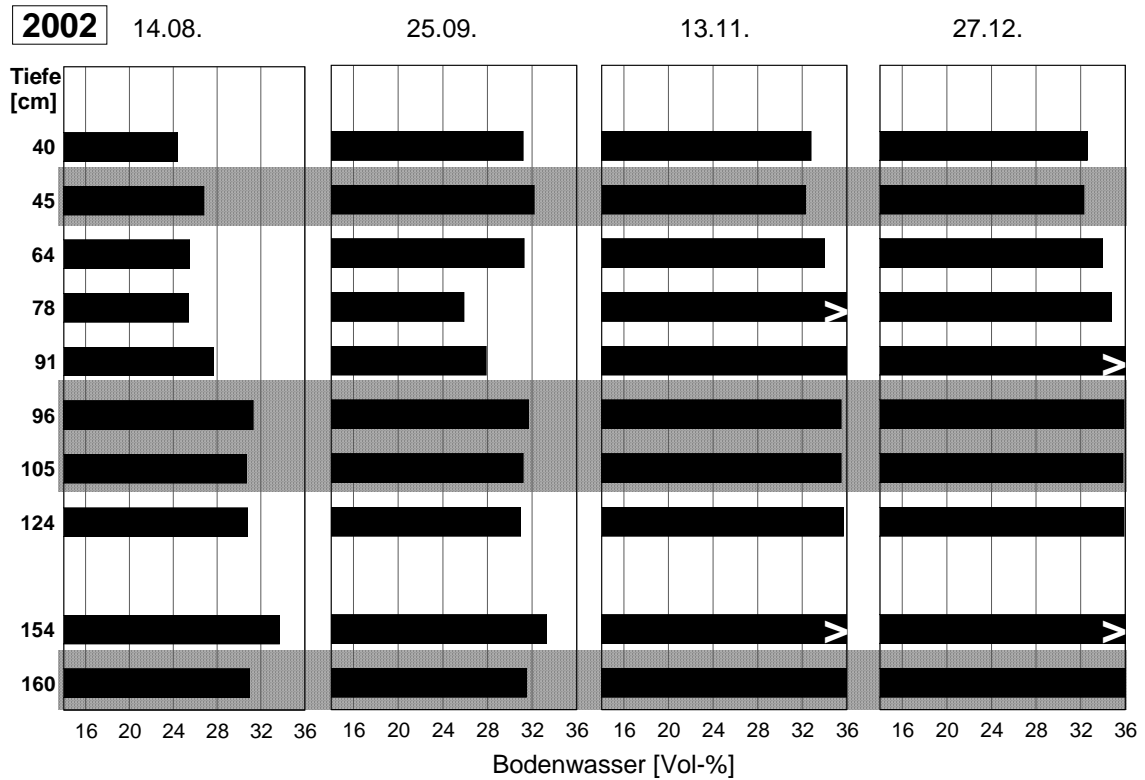


Abbildung 8: Bodenwassergehalte [Vol-%] in einem hoch auflösenden Messprofil in Testfeld K; grau unterlegt = Verdichtungszone, ▸ = Wassergehalt über 36 Vol-%

Der anhaltend trockene Sommer 2003 (Abbildung 8, unten) lässt die unterschiedlichen Eigenschaften der Schichten im Profil deutlicher zu Tage treten. Bis in circa 1 m Tiefe sind die höchsten Wassergehalte in und unmittelbar über den Verdichtungszone vorhanden. Der Bereich zwischen den beiden oberen Verdichtungszone ist in 64 und 78 cm Tiefe stark ausgetrocknet. Hier haben die Pflanzen bereits im August das meiste Wasser verdunstet, es steht ihnen nur noch wenig Wasser zur Verfügung. Bei Wiederbefeuchtung ab Oktober ändert sich dies bis Ende Dezember nur sehr langsam. Die Wassergehalte steigen vor allem im Bereich in und über der ersten Verdichtungszone an. Der unterhalb der obersten Verdichtungszone liegende Boden wird nur sehr langsam wieder mit Wasser gesättigt. Das Verhalten des K-Feldes - deutliche Absickerung vor Aufsättigung des gesamten Bodenwasserspeichers – legt die Vermutung nahe, dass hier bereits auf der Sohle der ersten Verdichtungsschicht Wasser aus der Rekultivierungsschicht abgeführt wird und damit für die Pflanzen auf der Böschung verloren geht.

4.4.3 Wasserversorgung der Pflanzen

Die Absickerungsmenge aus der Rekultivierungsschicht hängt wesentlich von der Verdunstung ab. Wenig Sickerwasser setzt eine möglichst hohe Transpirationsleistung der Pflanzen voraus. Während der Sommermonate ist die potentielle Verdunstung am höchsten, denn die Pflanzen sind belaubt, verbrauchen viel Wasser für ihr Wachstum und die Strahlungsenergie ist hoch. Deshalb muss gerade im Sommer eine möglichst kontinuierliche Wasserversorgung gewährleistet sein, denn bei Wassermangel schränken die Pflanzen ihre Transpiration ein. Menge und Verfügbarkeit des Bodenwassers hängen bei gegebenen klimatischen Bedingungen vor allem von den Bodeneigenschaften ab.

In Abbildung 9 zeigt neben den aus je vier Messpunkten gemittelten Bodenwassergehalten in 50 und 85 cm Tiefe Eckwerte des Bodenwasserhaushalts. Die Höchstwerte der Wassergehaltskurven markieren ungefähr die *Feldkapazität* (FK), sie beträgt in den Testfeldern circa 34 - 36 Vol-% (Tabelle 1). Der *permanente Welkepunkt* (PWP), die untere Grenze der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen, wird in den Böden der Testfelder ungefähr bei 12 Vol-%⁷ erreicht. Wassergehalte zwischen 12 und 36 Vol-% sind für Pflanzen gut verfügbar (*nutzbare Feldkapazität*, nFk). Ist die nutzbare Feldkapazität zu circa 50 % ausgeschöpft (50 % nFK in Abbildung 9), so beginnen Waldbäume bereits, ihren Wasserverbrauch einzuschränken (AKS 1996). Kurz gefasst bedeuten für den Boden der Lysimeterfelder Wassergehalte zwischen 24 und 36 Vol-% uneingeschränkt gute Wasserversorgung, Gehalte zwischen 12 und 24 Vol-% eingeschränkte Wasserverfügbarkeit für Gehölze und unter 12 Vol-% Wassergehalt ist praktisch kein Wasserentzug mehr möglich.

Im Jahr 2002 (Abbildung 9, oben) mit 889 mm Niederschlag liegen die Wassergehalte im Unterboden meist nahe der Feldkapazität. Sie sinken nur zwischen Anfang Juni und Mitte September in den Bereich der Wassersättigung bis 50 % der nutzbaren Feldkapazität ab. Unterschritten wird die 50 %-nFK-Marke in beiden Lysimeterfeldern hierbei nur in 50 cm Tiefe. Der Boden im K-Feld trocknet hierbei allerdings stärker und vor allem länger aus als im U-Feld (ca. 50 Tage gegenüber 33 Tagen). Die Unterböden unterhalb 85 cm Tiefe sind in beiden Feldern stets ausreichend mit Wasser gesättigt. Für die Versorgung der Pflanzen im K-Feld ist dieses Wasser jedoch weniger gut erreichbar, denn in dieser Tiefe finden sich fast keine Wurzeln (siehe Abbildung 2).

⁷ Werte für den PWP nach AG BODEN (2005): Bodenart Ut3, mittlere Trockenraumdichtestufe (1,45 – 1,65 g/cm³)

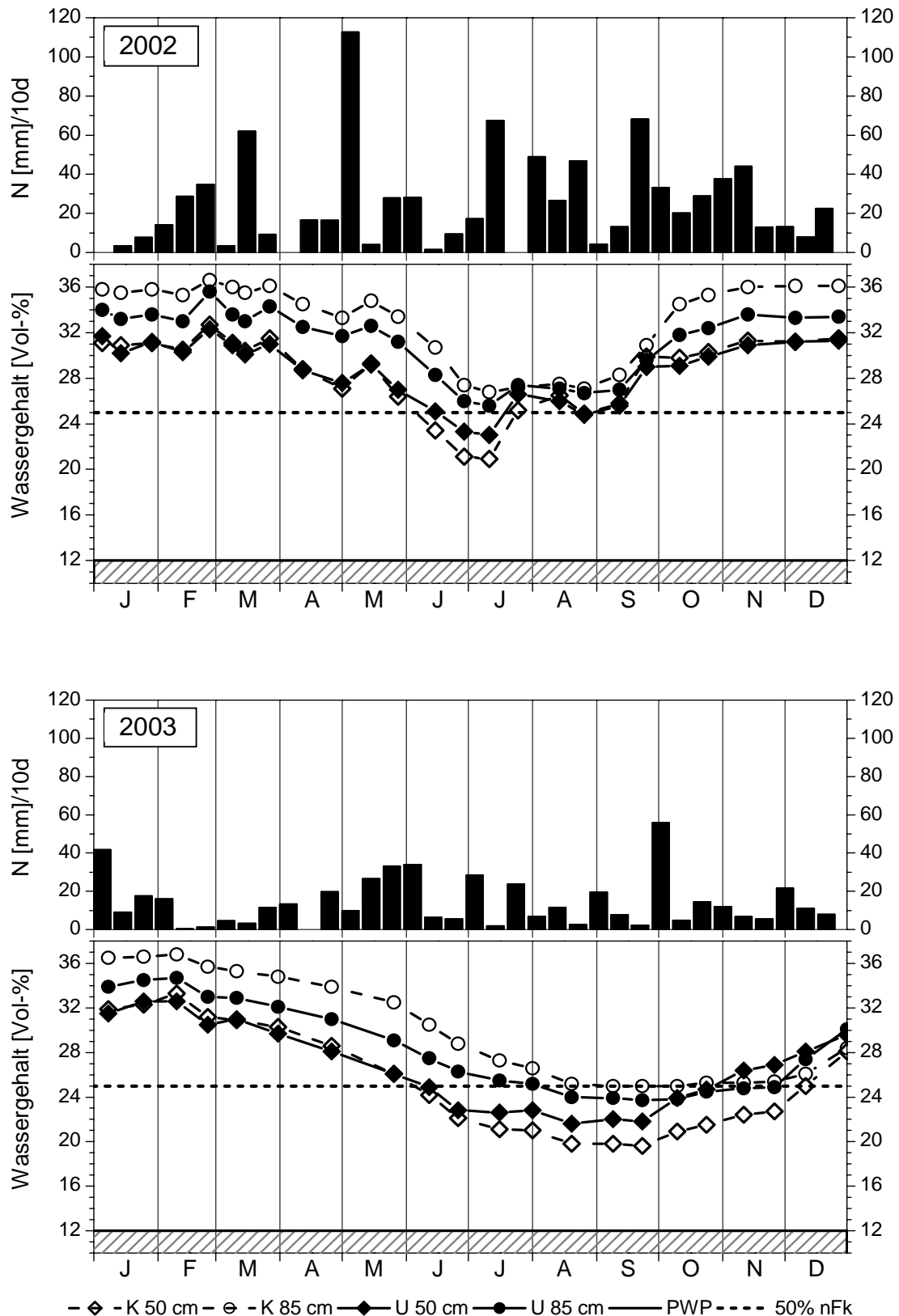


Abbildung 9: Niederschlag (10-Tages-Summen) und Bodenwassergehalte in 50 und 85 cm Tiefe im K- und U-Feld 2002 (oben) und 2003 (unten), PWP = permanenter Welkepunkt, 50 % nFK = Wassergehalt von 50 % der nutzbaren Feldkapazität

Das mit nur 495 mm Regen sehr trockene Jahr 2003 (Abbildung 9, unten) beginnt ebenfalls mit Bodenwassergehalten im Bereich der Sättigung, die jedoch bereits ab Ende Februar kontinuierlich absinken. Wie im Vorjahr unterschreiten die Wassergehalte in 50 cm Tiefe Anfang Juni (K-Feld) beziehungsweise Mitte Juni (U-Feld) die 50 %-nFK-Marke. Allerdings hält 2003 dieser Zustand länger an und die Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern sind deutlicher: Bereits ab Mitte Oktober ist der Unterboden im U-Feld wieder ausreichend mit Wasser versorgt, im K-Feld ist er dies erst ab Mitte Dezember.

Dass die Wiederbefeuchtung des Bodens im K-Feld in 50 cm Tiefe viel länger dauert als im U-Feld, kann ebenso wie das stärkere Austrocknen mit der Schichtung des Testfeldes (s.o.) begründet werden: Bei Wiederbefeuchten fließt ein Teil des eindringenden Regenwasser auf der obersten Verdichtungsschicht ab, ohne den Unterboden zu erreichen.

Die Wassergehalte in 85 cm Tiefe sinken in beiden Lysimeterfeldern auch im Trockenjahr 2003 nur geringfügig unter die 50 %-nFK-Marke. Insgesamt sind die Wasserdefizite nach dem „Jahrhundertsummer“ ausgeprägter; bis Jahresende 2003 wird an keiner Stelle die Sättigung bis zur Feldkapazität erreicht. Weiterhin ist charakteristisch, dass die Differenz der Wassergehalte zwischen 50 und 85 cm Bodentiefe im K-Feld meist viel größer als im U-Feld ist. Auch dies erklärt sich durch die unterschiedliche Bodendichte und den Einfluss der Verdichtungszone auf den Wasserfluss in der Rekultivierungsschicht des K-Feldes.

5 Fazit aus den Leonberger Versuchen

1. Es ist in der Rekultivierungspraxis grundsätzlich möglich, Böden so einzubauen, dass Verdichtungen auf das unvermeidbare Maß beschränkt bleiben und keine verdichtete Schichtoberflächen innerhalb der Rekultivierungsschicht geschaffen werden. Die Grundlagen zur Beurteilung der Standsicherheit des unverdichteten Materials an sehr steilen Böschungen müssen allerdings noch für eine Reihe von Bodenarten ermittelt werden.
2. Schichtenweise verdichtender Einbau von Bodenmaterial schafft ungünstigere Standortverhältnisse und verschlechtert damit unnötig die Wachstumsbedingungen der Vegetation und die Entwicklung eines leistungsfähigen Bodenlebens.
3. Dies äußert sich in höheren Ausfällen bei der Gehölzpflanzung, geringerer Vitalität der Pflanzen sowie einer reduzierten Durchwurzelungstiefe und -intensität. Hieraus resultiert eine insgesamt niedrigere Transpirationsleistung der Pflanzen.
4. Die unverdichtete Rekultivierungsschicht kann Abflussspitzen in der Folge von Niederschlägen besser dämpfen und liefert kontinuierlichere Abflussraten.
5. Die Schichten unterschiedlicher Dichte des Bodens zeigen ein differierendes Befeuchtungs- und Austrocknungsverhalten. Da der Wasserspeicher des verdichteten Bodens nach Niederschlagsereignissen nicht kontinuierlich und ungehindert aufgesättigt werden kann, steigen die Absickerungsraten meist schneller und höher an und sinken schnell wieder ab. Das Leonberger Lysimeterfeld mit verdichtetem Boden liefert Sickerwasser, auch wenn die Rekultivierungsschicht noch nicht bis zur Feldkapazität aufgesättigt ist.
6. Auf den verdichteten Schichtoberflächen bildet sich Stauwasser.
7. In Folge der geringeren Wuchsleistung der Vegetation und des de facto reduzierten Bodenwasserspeichers liefert die verdichtete Rekultivierungsschicht deutlich höhere Sickerwassermengen. Im Fall der Leonberger Lysimeterfelder ist die Absickerung des verdichteten Bodens um circa 40 % höher.

6 Empfehlungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten

Lange Zeit war es üblich, Rekultivierungen mit beliebigem Bodenmaterial und ohne besondere Anforderungen an das Einbauverfahren auszuführen. Das Augenmerk lag allein auf dem Bedecken des Mülls und dem „Begrünen“ der neu hergestellten Oberfläche. Trotz entsprechender Vorgaben und Empfehlungen wird auch heute noch dem Bodenmaterial und der Herstellung der Rekultivierungsschicht oft zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet.

Besondere Funktionen und Ansprüche an die Rekultivierungsschicht bedingen jedoch ein Mindestmaß an Qualität. Wie bei jedem technischen Bauwerk werden auch die Eigenschaften der Rekultivierungsschicht als „natürliches“ Bauwerk von Materialwahl und baulicher Ausführung beeinflusst. Diese Erkenntnis ist nicht neu und leicht nachzuvollziehen, sie muss sich trotzdem erst noch im Bewusstsein vieler Verantwortlicher verankern.

Steht die Wasserhaushaltsfunktion der Rekultivierungsschicht – so wie dies eigentlich nach 13 Jahren TASI (siehe 1.) selbstverständlich sein sollte – im Mittelpunkt, so ist Folgendes zu bedenken:

- Wasser“verbrauch“, d.h. der Entzug von Wasser aus dem Oberflächenabdichtungssystem bedeutet Verdunstung. Wasser, das nicht verdunstet werden kann, versickert früher oder später⁸.
- Hohe Verdunstungsraten sind nur mit dichten Pflanzenbeständen möglich, das spricht für Wald als Bewuchs der Rekultivierungsschicht. Wald auf Deponien ist zudem sehr gut mit dem Ziel langfristig möglichst geringer Pflegeeingriffe zu vereinbaren. Ausführliche Hinweise zur Gestaltung optimierter „Deponiewälder“ finden sich bei SCHABER-SCHOOR (2006).
- Hohe Verdunstung setzt aktive, vitale Pflanzen und die nach Möglichkeit uneingeschränkte Verfügbarkeit von Wasser im Boden voraus. Vor allem während der Vegetationszeit kann potentiell viel Wasser verdunstet werden. Ist ein großer Bodenwasserspeicher (hohe „nutzbare Feldkapazität“) vorhanden, so kann der Wasserüberschuss aus Winter und Frühjahr in die Vegetationszeit „gerettet“ und dann verdunstet werden.
- „Verfügbar“ ist Bodenwasser nur dann, wenn es zu den Wurzeln der Pflanzen gelangt. Hierzu sollte der gesamte Bodenraum gut durchwurzelbar und gut durchwurzelt sein, vor allem auch in der Tiefe.
- Eine gute Durchwurzelbarkeit des Bodens ist nur zu erreichen, wenn eine hinreichende Bodendurchlüftung gewährleistet ist und der Durchwurzelung keine mechanischen und chemischen Hindernisse entgegenstehen.
- Die Durchwurzelungstiefe wird sehr viel stärker von den Bodeneigenschaften geprägt, als üblicherweise angenommen. Die Unterscheidung von Wurzeltypen („Tiefwurzler“/„Flachwurzler“, „Herzwurzelsystem“ etc.) ist in der Praxis wenig hilfreich, da bei geeignetem Boden und entsprechendem Klima praktisch alle Gehölze sehr tief wurzeln können (siehe hierzu KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002). Deutliche Unterschiede zwischen den Gehölzarten bestehen jedoch bezüglich ihrer Fähigkeit mit Rohböden oder wenig luftdurchlässigen Böden zurecht zu kommen.

⁸ Die Zwischenspeicherung von Wasser im Boden ist in der Wasserhaushaltsbilanz über längere Zeiträume betrachtet zu vernachlässigen. Eine sehr mächtige Bodenlage unterhalb der Verdunstungszone kann die Versickerung zwar verzögern, aber nicht verhindern.

Die Leonberger Versuche zeigen, dass eine bodenschonend eingebaute Rekultivierungsschicht bei gleichem Bodenmaterial erheblich leistungsfähiger sein kann. Als Konsequenz aus den Erfahrungen der Leonberger Versuche werden folgende Grundsätze zur ökonomischen Herstellung leistungsfähiger Rekultivierungsschichten in der Praxis abgeleitet – das *Freiburger RekuVerfahren*. Der grundlegende Gedanke ist, dass durch einen schonenden Bodeneinbau die natürliche Bodenentwicklung ermöglicht wird. Werden die zur Verfügung stehenden Mittel und Ressourcen auf die wesentlichen Aufgaben konzentriert eingesetzt, so sollte es möglich sein, mit diesem Verfahren ohne oder mit vertretbarem Mehraufwand eine nachhaltig leistungsfähige Rekultivierungsschicht herzustellen.

Grundsätze des *Freiburger RekuVerfahrens*:

1. Die Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht wird bis zur Endhöhe in einem Zug eingebracht, um Schichtungen und Verdichtungen zu vermeiden. Hierdurch werden die Prozesse Durchlüftung, Wasserspeicherung und Durchwurzelung langfristig und nachhaltig sichergestellt. Zwar wird die Bodenoberfläche durch Befahren verdichtet, irreparable Unterbodenverdichtungen werden jedoch vermieden.
2. Auch der Auftrag von Mutterboden ist als Schichtung zu verstehen. Er ist nicht nur kostenintensiv, sondern kann auch dazu führen, dass die Durchwurzelung weitgehend auf den Oberboden beschränkt bleibt. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn beim Auftrag der darunter liegende Boden zusätzlich befahren wird. Steht geeignetes (siehe 3.) Bodenmaterial für den Unterboden zur Verfügung, muss kein Mutterboden aufgebracht werden. Nährstoffdefizite können durch eine geringe Kompostgabe und/oder mineralische Düngung behoben werden.
3. Zur Rekultivierung ist geeignetes Bodenmaterial mit möglichst geringen Steingehalten (≤ 10 Vol-%) zu verwenden, um einen möglichst großen Bodenwasserspeicher aufzubauen.
Eignung: siehe z.B. DIN 19731, BÖNECKE (1997)
Vorab-Kontrolle: Sieblinie (Labor)
laufende Kontrolle: Geländemethode (z.B. nach AG BODEN 2005)
4. Bei allen Bodenarbeiten ist die Bearbeitbarkeit zu beachten, stark feuchte und nasse Böden dürfen nicht bearbeitet werden.
Vorab-Kontrolle vor Bodenentnahme: Umlagerungseignung (siehe DIN 19731)
laufende Kontrolle: Umlagerungseignung (siehe DIN 19731)
5. Unabhängig von der Qualität des Bodenmaterials wird ein möglichst bodenschonender Einbau bevorzugt. Störungen des Bodens wie Umlagern, Befahren und Verdichtung werden auf das unvermeidbare Maß reduziert.
6. Der Boden kann mit einer im Erdbau üblichen Raupe eingeschoben werden. Ein wirklich bodenschonender Auftrag mit Bagger oder Bandabsetzer ist nach Möglichkeit vorzuziehen.
7. Die verdichtete Bodenoberfläche ist im Anschluss an den Bodeneinbau tief reichend (circa 50 cm) aufzulockern. Nach Möglichkeit ist hierzu kein gezogenes Gerät, sondern ein grabendes Werkzeug (Baggerschaufel etc.) zu verwenden.
8. Zur Qualitätssicherung der Punkte 1 - 7 empfiehlt es sich einen Fachgutachter Erdbau zu bestellen.

Die Praxis der Deponie-Rekultivierung nicht nur in Baden-Württemberg zeigt, dass der Stand der Technik, wie er zum Beispiel in GDA-Empfehlung E2-31 definiert ist, nicht berücksichtigt wird, weil Mehrkosten befürchtet und gescheut werden. Von Seiten der Behörden werden nur in Ausnahmen konkrete Qualitätsanforderungen an die Rekultivierungsschicht eingefordert (MAIER-HARTH 2005, WATTENDORF 2005). Auf Baustellen herrscht ein immenser Zeit- und Kostendruck. Mit den Grundsätzen des *Freiburger RekuVerfahrens* sollen Arbeitsabläufe optimiert und an der Praxis orientierte Vorgaben für einen qualitativ hochwertigen Erdbau definiert werden. Es wird darauf verzichtet, vorab exakte Soll-Werte, beispielsweise für Einbau-Trockenraumdichte u.a. zu empfehlen, denn diese sind nicht jedem Einzelfall angemessen⁹. Vorschriften werden in der Praxis nur eingehalten, wenn eine Verpflichtung dazu besteht. Die Grundsätze des *Freiburger RekuVerfahrens* definieren deshalb das Minimum essentieller Vorgaben. Sie sollen für alle Bauausführenden nachvollziehbar und vor Ort stets und zeitnah kontrollierbar sein. So können schwer wiegende Bodenschäden und die damit verbundene Leistungsminderung der Rekultivierungsschicht verhindert werden.

7 Literatur

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl., 4 38 S., Hannover

AKS = ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (1996): Forstliche Standortsaufnahme, 352 S., Eching

BÖNECKE, G. (1997): Hinweise zur Aufforstung von Deponien mit Oberflächenabdichtung, in: BÖNECKE, G. & E. WEIß [Hrsg.]: Rekultivierung von Deponien, FVA-Arbeitsberichte 1/97, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg: 39 - 50, Freiburg

BOTHMANN, P. (2005): Die Bedeutung von Rekultivierungsschichten für Deponien, in: Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung „Qualifizierte Rekultivierungsschichten“: 4 - 11, Freiburg (www.landespflege-freiburg.de)

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

E 2-30 - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (1998): GDA-Empfehlung E 2-30, Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, Bautechnik 75 (9)

E 2-31 - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2000): GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617 – 626

E 2-32 - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2000): GDA-Empfehlung E 2-32 Gestaltung von Bewuchs auf Abfalldeponien (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 627 – 629

DIN 19731: Bodenbeschaffenheit – Verwendung von Bodenmaterial (1998)

⁹ Bodenumlagerung, Befahrung und Verdichtung verändern die Luftkapazität und die nutzbare Wasserspeicherkapazität des Bodens. Das Ausmaß dieser Auswirkungen hängt unter anderem stark von der Bodenart (Körnung) und der Bodenfeuchte bei der Bearbeitung ab. Umfangreiche Laborversuche (z.B. ZWÖLFER et al. 1994) zeigen, dass Böden auf Verdichtung unterschiedlich reagieren.

- EHRMANN, O. & P. WATTENDORF (2005): Bodenphysik, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.]: Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 41: 72 – 96
- KUTSCHERA, L. & E. LICHTENEGGER (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher, 604 S., Graz und Stuttgart
- MAIER-HARTH, U. (2005): Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushaltsschichten auf Deponien in Rheinland-Pfalz, in: Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung Qualifizierte Rekultivierungsschichten: 92 – 116, Freiburg
- SCHABER-SCHOOR, G. (2006): Regulierung des Wasserhaushalts von Deponien durch Gehölzbewuchs, Teil 1: Planung, Teil 2: Begründung und Gestaltung, AFZ (im Druck)
- SCHACK-KIRCHNER, H. (2005): Bodenlufthaushalt, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.]: Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 41: 97 – 107
- WATTENDORF, P. (2005): Konzeption einer Wasserhaushaltsschicht für die Deponie Neuenburg (BA I), in: Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung Qualifizierte Rekultivierungsschichten: 130 – 145, Freiburg
- WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2005): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 41, 268 S., Freiburg
- ZWÖLFER, F., M. GEIß, P. ADAM, K. HEINRICHSMEIER & H. HERMANN (1994): Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen, 41 S., Stuttgart

Anschriften der Autoren:

Dr. Peter Wattendorf
Institut für Landespflege,
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Tennenbacher Str. 4
79106 Freiburg
peter.wattendorf@landespflege.uni-freiburg.de

Dr. Otto Ehrmann
Büro für Bodenbiologie und Bodenmikromorphologie
Münster 12
97993 Creglingen
otto.ehrmann@gmx.de