

Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des Statusseminars BWPLUS

Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten

von

P. Wattendorf, O. Ehrmann & W. Konold

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Institut für Landespflege

Förderkennzeichen: BWU 26004

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

Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten (BWU 26004)

P. Wattendorf, O. Ehrmann & W. Konold

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Landespflege

1. Vorhaben

1.1. Ausgangslage

Seit einigen Jahren wird im Interesse einer nachhaltigen Umweltvorsorge der Wasserhaushaltsfunktion von Rekultivierungsschichten im System der Oberflächenabdichtung von Deponien vermehrte Beachtung geschenkt. Untersuchungen (z.B. BRAUNS et al. 1997) und Empfehlungen (z.B. DGGT 2000) zur Herstellung „qualifizierter Rekultivierungsschichten“ oder „Wasserhaushaltsschichten“ legen nahe, hierbei dem Erhalt der natürlichen Bodeneigenschaften besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Aufgabe der Wasserhaushaltsschicht ist es, möglichst viel Niederschlagswasser auf natürlichem Weg durch Verdunstung abzuführen, um die Absickerung zu minimieren. Hierbei ist es von Vorteil, wenn der Boden gut durchwurzelbar ist und eine möglichst hohe Wasserspeicherkapazität besitzt. Dies ist vor allem durch möglichst geringe Bodenverdichtung beim Baubetrieb zu erreichen.

Bislang wurden in der Deponiebaupraxis nur wenige qualifizierte Rekultivierungsschichten realisiert (WATTENDORF 2005); dies mag auch darin begründet sein, dass Vorteile, die überwiegend den Wasserhaushalt und die Vegetationsentwicklung betreffen, von Bauingenieuren nicht wahrgenommen werden. Deshalb soll mit den Leonberger Lysimeterfeldern gezeigt werden, wie ein bodenschonendes Einbauverfahren den Wirkungsgrad einer Rekultivierungsschicht verbessert. Dies kann dazu beitragen, ein Umdenken in der Baupraxis herbeizuführen. Auch durch den Nachweis der Praxistauglichkeit des Einbauverfahrens und der Standsicherheitsnachweise für die gegebenen Substrate und Böschungsneigungen wird die Umsetzung in die Praxis gefördert.

Im Zuge zweier aufeinander aufbauender Forschungsvorhaben wurde auf dem Gelände der Kreismülldeponie Leonberg eine aufwändige Versuchsanlage installiert. Die Einrichtung der Versuchsfelder sowie erste Untersuchungen in der Zeit von Dezember 2000 bis April 2004 wurden vom Land Baden-Württemberg (Projekte BWS 99003 und BWD 21010) und dem Landkreis Böblingen gefördert. Die Ziele dieser Vorhaben waren, qualifizierte Rekultivierungsschichten im praxisnahen Versuchsbetrieb bodenschonend herzustellen, den Wasserhaushalt unterschiedlich hergestellter Rekultivierungsschichten zu untersuchen und Erkenntnisse zu gewinnen, wie das Einbauverfahren und die weitere Standortentwicklung (Boden, Vegetation) den Wasserhaushalt und damit die Funktion der Wasserhaushaltsschicht innerhalb des Systems „Oberflächenabdichtung einer Deponie“ beeinflussen.

1.2. Versuchsanlage Leonberger Lysimeterfelder

Die Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“ besteht neben einigen kleineren Testfeldern aus zwei Großlysimetern mit jeweils circa 360 m² Fläche (Tabelle 1). Der Aufbau dieser Lysimeterfelder entspricht einer Regel-Oberflächenabdichtung: Auf dem als mineralische Abdichtung ausgeführten Auflager liegt eine verschweißte 2,5 mm starke Kunststoff-

dichtungsbahn. Sie wurde zur Begrenzung der Lysimeterfelder über Randdämme hochgezogen, so dass zwei nebeneinander liegende geschlossene Wannen entstanden. In diese Großlysimeter-Wannen wurden im Herbst 2000 eine 30 cm starke mineralische Entwässerungsschicht mit Sammeleinrichtung am tiefsten Punkt des Feldes und die beiden Versuchsvarianten der Rekultivierungsschicht eingebaut.

- „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ **Feld U**
Hier wurde der Boden mit einer leichten Raupe hangabwärts in der Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht ohne Zwischenverdichtung eingeschoben.
- „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ **Feld K**
Im K-Feld wurde der Boden mit der gleichen Raupe in vier Lagen eingeschoben, die drei unteren Lagen wurden mit einer Vibrationswalze auf circa 0,95 ρ_{Pr} verdichtet.

Nach dem Einbau des Bodens wurde in beiden Feldern die oberste Bodenschicht gelockert und eine geringe Menge Kompost (circa 2 cm) aufgetragen. In beiden Lysimeterfelder wurde der gleiche Boden (Löss-Unterbodenmaterial) eingebaut. Auf den Auftrag von teurem Mutterboden wurde verzichtet. Die Rekultivierungsschichten unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren und die daraus resultierenden Bodeneigenschaften (Tabelle 1). Nach Abschluss der Bodenarbeiten wurden die Testfelder mit einer Gräser-Kräuter-Mischung eingesät und mit Aspen (*Populus tremula*) bepflanzt. Um eine zügige Bestandesentwicklung zu fördern, wurden Ausfälle von Pappeln durch weitere Gehölzarten sukzessive ersetzt.

Tabelle 1: Eigenschaften der „Leonberger Lysimeterfelder“

| Lysimeterfeld | K | U | |
|--|-------------|-------------|-------------------|
| Fläche | 360 | 360 | [m ²] |
| Exposition | Ost-Süd-Ost | | |
| Hangneigung | < 1:2,7 | | |
| Mächtigkeit Rekultivierungsschicht | circa 2,1* | | [m] |
| Bodenart | Ut2 / Ut3 | | |
| Steingehalt | < 1 | | [V-%] |
| Feldkapazität*** | 34 – 35,5 | 35,3 – 35,9 | [V-%] |
| Totwasseranteil **** | ca. 12 | | [V-%] |
| * das U-Feld wurde 20 cm überhöht eingebaut. Durch Setzungen haben sich die Felder angeglichen. *** in situ Messung; **** aus AG BODEN (2005), Bodenart Ut3 | | | |

Die Lysimeterfelder sind mit folgenden Messeinrichtungen ausgerüstet: Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht werden in einer Messstation gesammelt und mit einer zeitlichen Auflösung von in der Regel 10 Minuten registriert. Der Bodenwassergehalt der Rekultivierungsschicht kann an drei Messstellen pro Lysimeterfeld mit TDR-Sonden in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe gemessen werden. Zusätzlich besteht im K-Feld ein Messprofil mit 10 Sonden, die gezielt in Schichten unterschiedlichen Verdichtungsgrades eingebaut wurden.

1.3. Ziele des Vorhabens

Hauptziel des Vorhabens BWU 26004 ist die Fortführung der Forschungsarbeiten zum Wasserhaushalt und zur Boden- und Vegetationsentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten, um möglichst vollständige Datenreihen vom Initialstadium der Boden- und Vegetationsentwicklung bis zum ausgebildeten Waldbestand zu gewinnen.

Weiterhin soll der Bestand der Leonberger Lysimeterfelder für den Langzeitbetrieb gesichert bleiben. Nur durch regelmäßige Kontrollen und Wartung ist es möglich, Funktionsstörungen rechtzeitig zu erkennen und zu beheben sowie eventuelle Reparaturen durchzuführen, um den Betrieb der Lysimeteranlage auf lange Sicht zu gewährleisten (siehe 2.2).

1.4. Arbeitsprogramm und Umfang des Vorhabens

BWU 26004 führt ein im Vergleich zu den vorangegangenen Vorhaben reduziertes Untersuchungsprogramm fort. Es sieht für den Förderzeitraum September 2006 bis August 2011 wissenschaftliche Untersuchungen sowie Wartungsarbeiten an der Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“ vor¹ und wird in diesem Zeitraum mit einer jährlichen Zuwendung in Höhe von circa 25.000 € gefördert. Das Arbeitsprogramm enthält folgende Untersuchungsschwerpunkte, detaillierte Ausführungen zu den einzelnen Arbeitsschritten finden sich in WATTENDORF et al. (2007):

- Kontinuierliche Messung der Absickerungsraten
- Dokumentation des lokalen Wettergeschehens
- Messungen der Bodenwassergehalte und der Stauwasserstände
- Dokumentation der Bodenstruktur
- Dokumentation der Entwicklung der Regenwurmpopulation
- Dokumentation der Vegetationsentwicklung
- Wartung der Lysimeteranlage

2. Arbeitsbericht

2.1. Laufende Arbeiten

Die laufenden Arbeiten wurden entsprechend des Arbeitsprogramms ausgeführt.

2.2. Reparaturarbeiten an den Testfeldern

Zusätzlich zum laufenden Arbeitsprogramm wurden 2008 umfangreiche Reparaturarbeiten an der Lysimeteranlage ausgeführt. Die Abdeckfolie der Trennstreifen am Rand der Testfelder musste trotz Nachbesserungen im Jahr 2003 vollständig erneuert werden. Die Abfallwirtschaft Landkreis Böblingen erklärte sich bereit, die Reparatur im Rahmen weiterer Baumaßnahmen auf der Kreismülldeponie auszuführen und die Kosten zu übernehmen. So konnten im Mai 2008 die Trennstreifen mit dem Bagger neu profiliert und anschließend die Folienab-

¹ Umfangreichere Untersuchungen sind zu einem späteren Zeitpunkt bei fortgeschrittener Vegetationsentwicklung in Richtung Waldbestand wieder vorgesehen.

deckungen erneuert werden (siehe Bild 1). Die Reparaturarbeiten wurden von den Projektmitarbeitern koordiniert und durchgehend überwacht. So war sichergestellt, dass die Besonderheiten der Versuchsanlage während der Baumaßnahme berücksichtigt und Schäden vermieden werden.

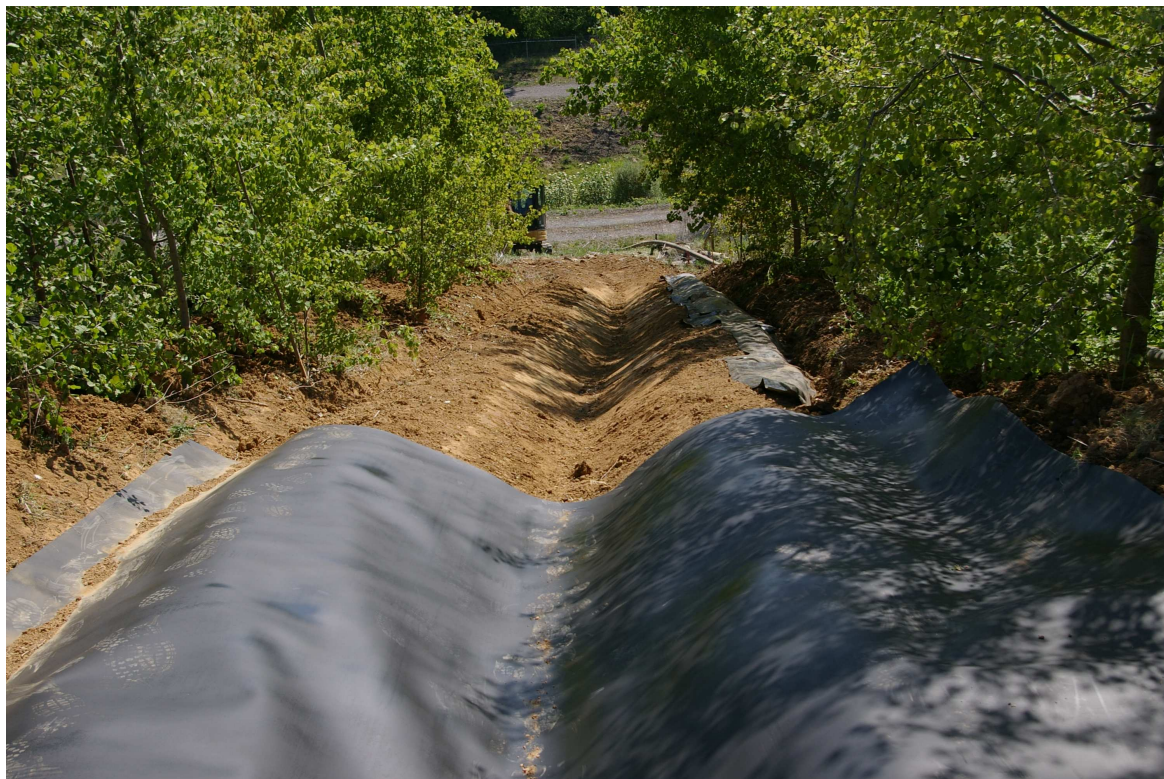


Bild 1: Reparaturarbeiten im Mai 2007: neu profilierter und mit HDPE-Folie belegter Trennstreifen

3. Ergebnisse

3.1. Bodeneigenschaften

Bei jeweils einer Aufgrabung pro Testfeld im Mai 2008 wurden die Trockenraumdichten in den drei Tiefenstufen 50, 85 und 100 cm und die Eindringwiderstände in 5-cm-Tiefenstufen mit dem Penetrometer gemessen. Einzelne Aufgrabungen vermitteln lediglich punktuelle Informationen über den Bodenzustand, deshalb ist es problematisch, die Ergebnisse auf die ganze Fläche zu übertragen. Weitere Aufgrabungen, um eine hinreichende Anzahl von Stichproben zu gewinnen, verbieten sich aber, da sonst der Bodenaufbau der Lysimeterfelder übermäßig gestört würde. Deshalb können die Untersuchungsergebnisse zu den Trockenraumdichten - auch aus den Vorjahren - lediglich Tendenzen aufzeigen. Der Oberboden in 25 cm Tiefe konnte 2008 nicht beprobt werden, da er zu trocken für eine Probenahme war.

Die 2008 gemessenen Trockenraumdichten sind im Vergleich mit früheren Werten in Abbildung 1 aufgetragen. Die Grafik vermittelt den Eindruck, als stiege die Trockenraumdichte des Bodens im U-Feld stetig an, was sich im Prinzip mit Setzungen des unverdichteten Bodens gut erklären ließe (siehe hierzu auch 3.2). Allerdings fanden nach BIEBERSTEIN et al. (2005) die größten Setzungen innerhalb der ersten beiden Jahre nach dem Bau der Testfelder

statt, nach 2003 erreichten sie nur noch marginale Beträge. Setzungen erklären demnach nur den Dichteanstieg von 2001 nach 2004. Auflastbedingte Setzungen und Verdichtungen müssten sich außerdem vor allem im Unterboden auswirken. Dies ist aber nicht der Fall, denn das Dichte-Maximum im U-Feld scheint in der Tiefe von circa 85 cm zu liegen. Außerdem ist der tiefere Unterboden des U-Feldes stets weniger dicht als der des K-Feldes. Es ist deshalb davon auszugehen, dass 2008 zufällig eine überdurchschnittlich dichte Stelle des U-Feldes beprobt wurde. Insgesamt liegen alle Trockenraumdichten im U- und K-Feld in der Bewertungsstufe *hoch* (1,6 bis <1,8 g/cm³) nach AG BODEN (2005).

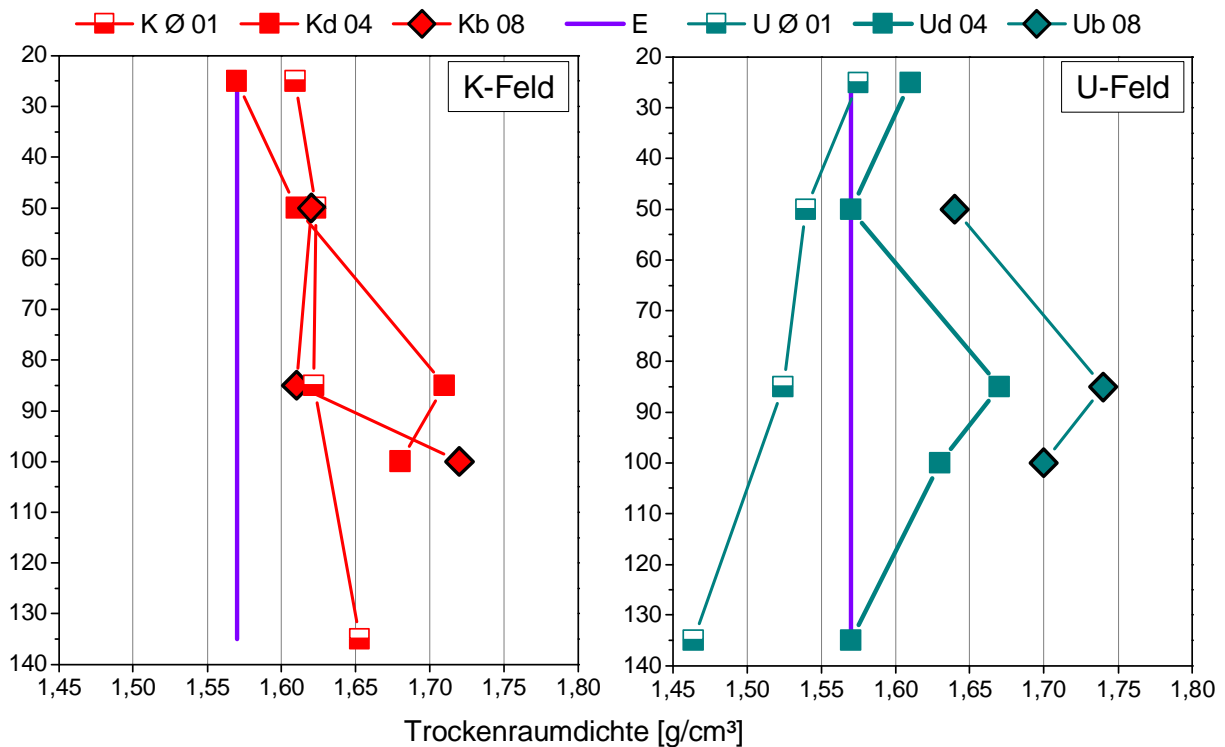


Abbildung 1: Trockenraumdichten in den Jahren 2001 (Ø 01 = Mittel von 4 Probestellen), 2004 und 2008; die Kleinbuchstaben geben die Lage im Testfeld an: b = Unterhang, d = Oberhang, E = mittlere Dichte des Bodenmaterials im Einbauzustand

3.2. Entwicklung der Bodenstruktur

Der zur Herstellung der Rekultivierungsschichten in Leonberg verwendete Lösslehm besaß im ungestörten Zustand ein ausgeprägtes biogenes Bodengefüge, das durch die Bodenumlagerung weitgehend zerstört wurde. Durch die unvermeidliche Zerstörung der Kontinuität des Porensystems sind Transportprozesse wie die Infiltration von Niederschlägen und die Belüftung des Unterbodens stark beeinträchtigt. Untersuchungen in Leonberg im Jahr 2007 zeigten, dass sich in der obersten Bodenschicht bis in circa 5 - 10 cm Tiefe vor allem durch die Tätigkeit von Regenwürmern ein krümeliges Bodengefüge entwickelt hat (WATTENDORF et al. 2008). Im Folgenden soll die Entwicklung des Unterbodens betrachtet werden.

Im Frühjahr 2001, fünf Monate nach dem Bau der Rekultivierungsschichten, wurden jedem Testfeld in einem Bodenprofil in unterschiedlichen Tiefen Proben zur Herstellung von Dünnschliffen für mikromorphologische Untersuchungen entnommen. Sieben Jahre später, im Frühjahr 2008, fand eine Wiederholungsbeprobung statt und es wurde jeweils ein Dünnschliff aus der gleichen Tiefenstufe angefertigt². So kann verglichen werden, wie sich das Bodengefüge im Lauf der Jahre verändert hat. Dabei zeigte sich:

- Der Boden im K-Feld ist weiterhin dicht. Sowohl in 40 cm Tiefe (Bilder 2a und 2b) als auch in 90 cm Tiefe (Bilder 5a und 5b) wurde die einbaubedingte Verdichtung nicht aufgelöst. Die für Transportprozesse in vertikaler Richtung wie Infiltration, kapillarer Aufstieg in Trockenphasen, Durchlüftung und Durchwurzelung extrem hinderliche horizontale Orientierung des Bodengefüges (siehe vor allem Bilder 5a und 5b) besteht fort.
- Der Boden im U-Feld ist 2008 deutlich dichter als unmittelbar nach dem Einbau im Jahr 2001 (siehe auch Abbildung 1). Die zahlreichen künstlichen Hohlräume sind kollabiert (Bild 6a und 6b sowie Bild 3a und 3b [außer Bildmitte, dort Regenwurm-röhre]). Der Boden im U-Feld ist ähnlich dicht wie im K-Feld, allerdings ist er weniger stark horizontal eingeregelt.
- Die Bodenentwicklung braucht Zeit. Sie erfolgt in den Unterböden aus Lösslehm vor allem durch Organismen und Rissbildung. In 40 cm Tiefe sind neben einer großen Regenwurm-röhre (Mitte Bild 3b) krümelige Regenwurmlosungen (Bild 4a) und neue Wurzelröhren (Bild 4b) zu sehen. Am Rand der großen Regenwurm-röhre finden sich ebenfalls Losungen von Regenwürmern und punktförmig erscheinende Losungen von Enchyträen. Kleinere Risse aufgrund von Austrocknung wurden in den Proben von 2008 vor allem in 40 cm Tiefe gefunden. Allerdings sind diese Schrumpfrisse weniger stabil als Wurzel- oder Regenwurm-röhren, denn bei Wiederbefeuchtung schließen sie sich weitgehend. Diese Prozesse finden aber nicht flächig, sondern nur punktuell statt. Daher werden vermutlich langfristig auch nur Teile des Unterbodens verbessert.
- Die Bodenentwicklung beschränkt sich bisher vor allem auf den Oberboden. In 40 cm Tiefe wurden viel weniger Spuren einer Gefügeentwicklung gefunden. In 90 cm Tiefe war nur eine Selbstverdichtung des Bodens im U-Feld durch Auflast zu erkennen.
- Gefügebildung durch Frost hat im Unterboden keine Bedeutung. Dies überrascht nicht, weil auch in den Proben des Oberboden aus dem Jahr 2007 keine Auswirkungen von Frost zu erkennen waren (WATTENDORF et al. 2008).

Auch unter günstigen Bedingungen braucht die Entwicklung eines neuen Bodengefüges im Unterboden viel Zeit. In den Versuchsfeldern sind bisher keine Prozesse erkennbar, die flächig Verdichtungen im Unterboden auflösen könnten. Stark verdichtete Unterböden sind daher vermutlich für lange Zeit (Dekaden bis Jahrhunderte) nur eingeschränkt von der Vegetation nutzbar.

² Die Probenahme erfolgt mittels Kubienakasten (Aluminiumrahmen von 6 x 8 cm). Der in seiner Lagerung ungestörte Boden wird im Labor in Kunstharz getränkt. Nach dem Aushärten wird eine Scheibe auf eine Glasplatte geklebt und bis zu einer Stärke von 30 µm abgeschliffen.

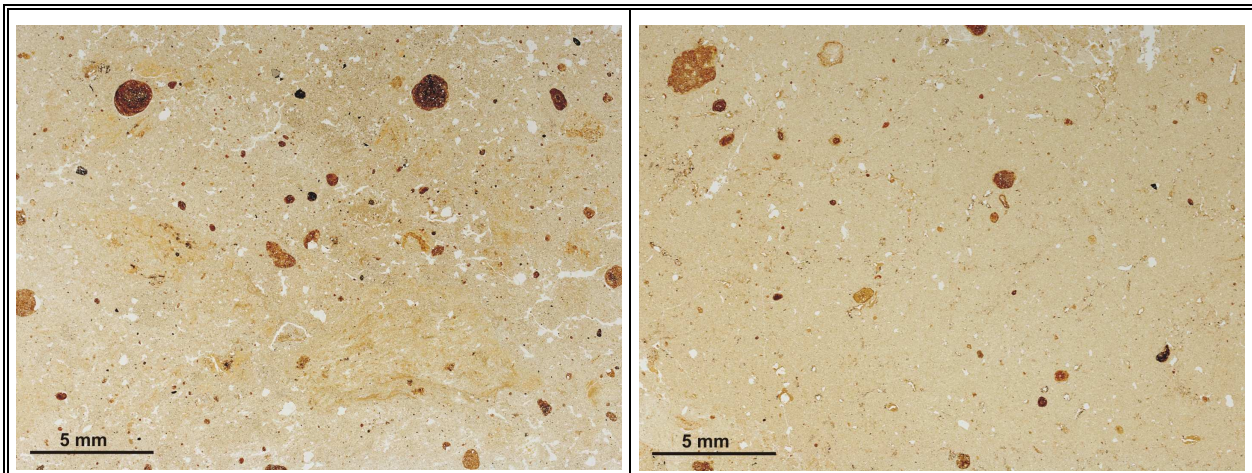


Bild 2a / 2b: **K-Feld** Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge ist jeweils dicht, größere kontinuierliche Hohlräume fehlen. Die rundlichen rotbraunen Objekte sind Eisenkonkretionen. Spuren einer rezenten Besiedlung durch Tiere (Röhren, Losungen) oder Wurzeln (lebende Wurzeln oder Wurzelreste) sind nicht zu finden.

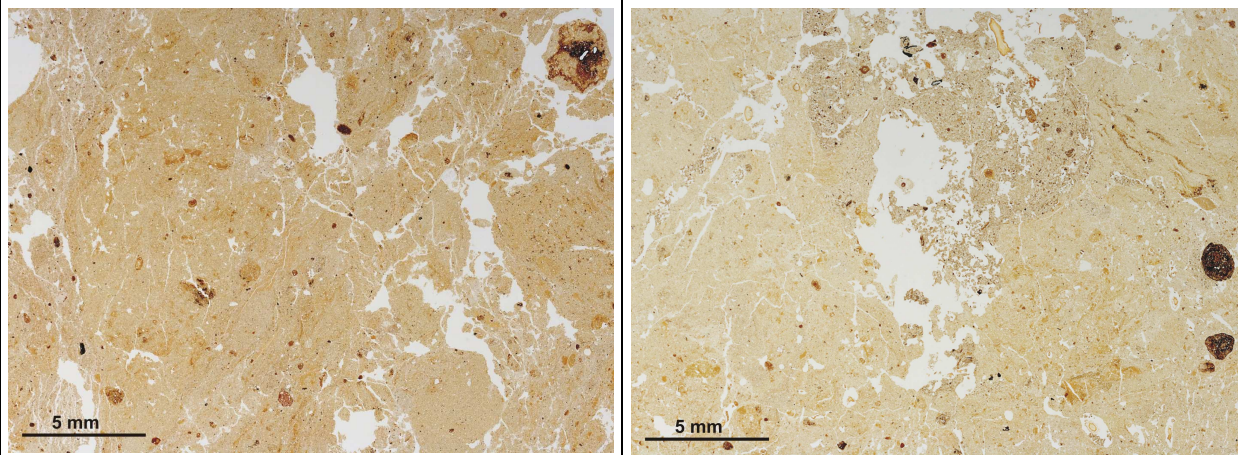


Bild 3a / 3b: **U-Feld** im Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge links ist in Folge des unverdichteten Einbaus hohlraumreich. Die künstlichen Hohlräume waren aber nicht stabil, das Gefüge wurde wieder dichter. Im rechten Bild (Probe von 2008) sind aber zahlreiche Hohlräume zu erkennen. Bei der Probenahme wurde der Rand einer Regenwurmröhre angeschnitten. Das Umfeld der Röhre ist besser belüftet als der restliche Boden. Daher finden sich dort neben Regenwurmlosungen auch Spuren anderer Tiere (z.B. Enchyträenlosungen) und Wurzeln (Details siehe unten).

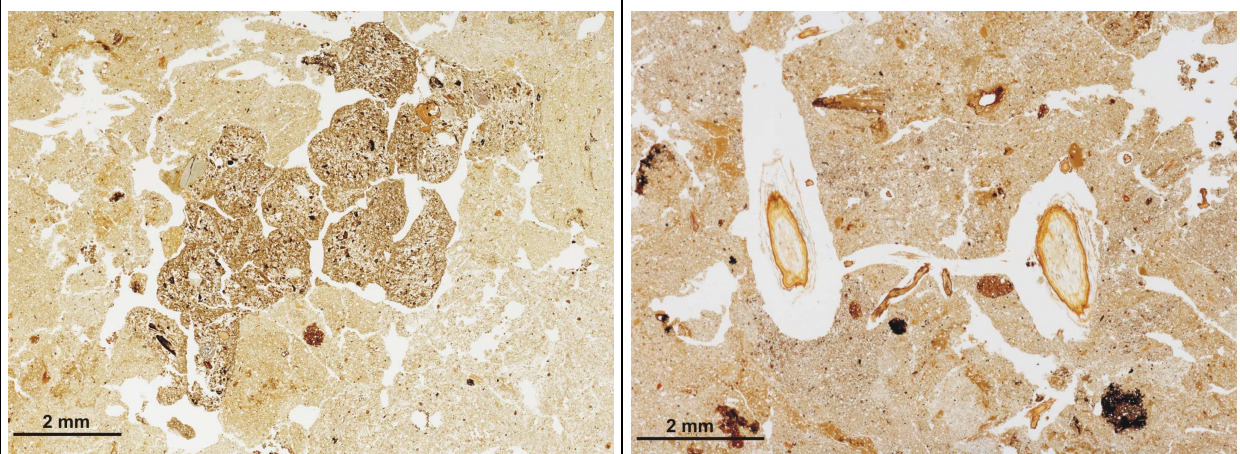


Bild 4a / 4b: Details der Gefügebildung im U-Feld Frühjahr 2008: Im linken Foto sind dunkle (= humusreiche) Regenwurmaggregate zu sehen. Rechts sind zwei größere und mehrere kleinere Wurzeln zu erkennen. Die Wurzeln hinterlassen nach ihrem Absterben vernetzte Hohlräume, die die Durchlüftung und Wasserinfiltration verbessern.

Bilder 2 bis 4: Dünnschliffe aus circa 40 cm Tiefe (Vertikalschnitte)

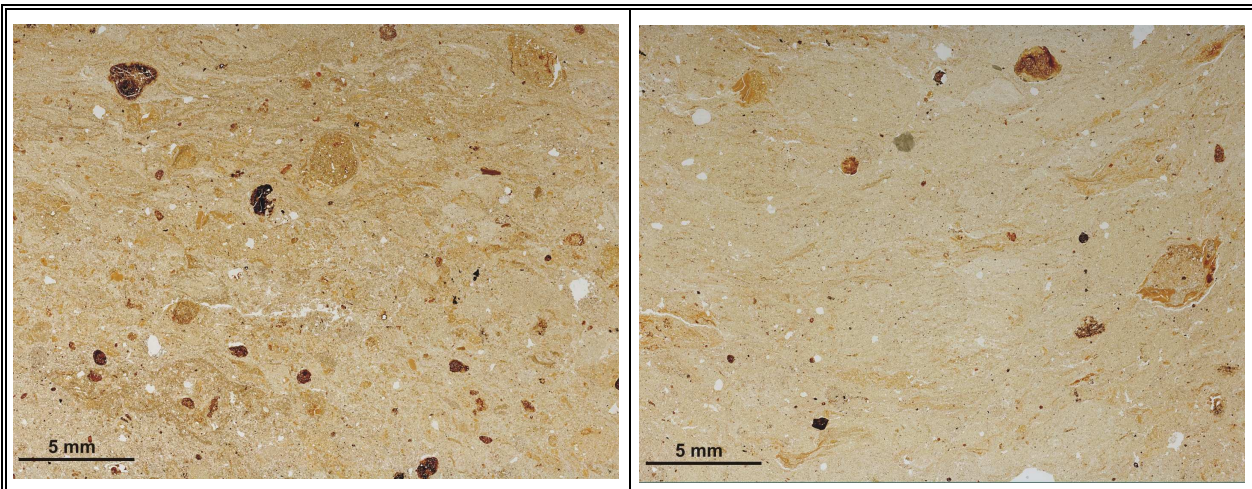


Bild 5a / 5b: **K-Feld** Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge ist jeweils dicht, größere kontinuierliche Hohlräume fehlen. Aufgrund der starken Verdichtung ist der Boden mehr oder weniger horizontal eingeregelt. Die Probe vom Frühjahr 2008 weist keinerlei Spuren von Organismen auf.

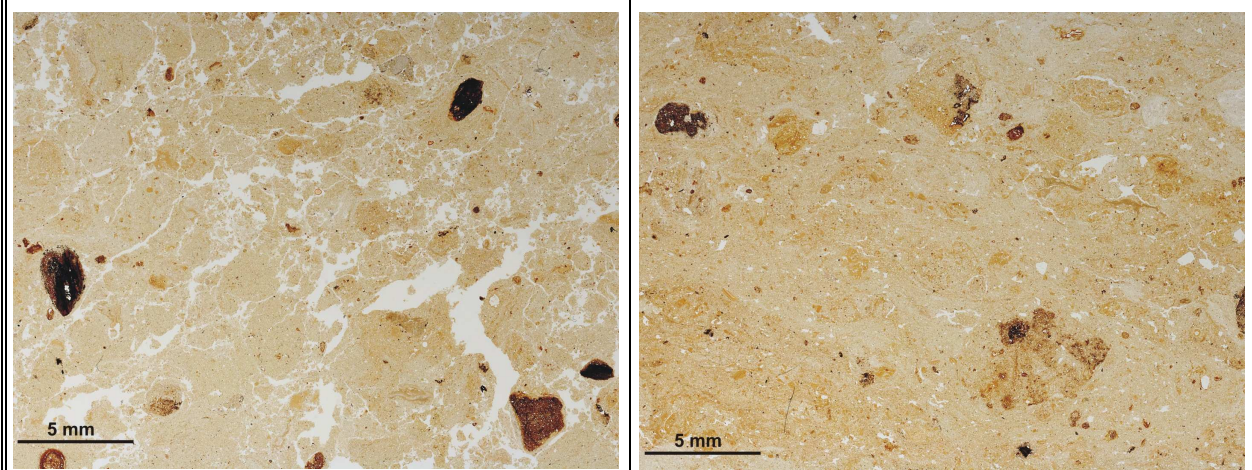


Bild 6a / 6b: **U-Feld** Frühjahr 2001 (links) und 2008 (rechts). Das Gefüge 2001 ist in Folge des unverdichteten Einbaus hohlraumreich. Diese künstlichen Hohlräume waren aber nicht stabil, im Frühjahr 2008 ist der Boden ähnlich dicht wie im K-Feld, allerdings ist im U-Feld der Boden nicht horizontal eingeregelt. Auch im U-Feld sind keine Spuren von Organismen zu finden. Wie im K-Feld zeigen auch die Eisenoxide keinen Bezug zum Hohlraumsystem. Sie liegen noch so da wie abgelagert. Der Boden in dieser Tiefe ist an den meisten Stellen inert.

Bilder 5 und 6: Dünnschliffe aus circa 90 cm Tiefe (Vertikalschnitte)

3.3. Entwicklung der Vegetation

3.3.1. Durchwurzelung

In den Schürfen wurde im Mai 2008 auch die Durchwurzelungsintensität an der Profilwand ermittelt. In beiden Feldern zeigt sich ein klassischer tiefenabgestufter Verlauf der Durchwurzelung (Abbildung 2). Die Bewertung der Intensität gemäß AG BODEN (2005) ergibt in den Oberböden beider Testfelder eine *starke bis sehr starke* Durchwurzelung (Stufen W4 und W5 = 11 - 50 Wurzeln/dm²) bis in 30 cm Tiefe. Im Unterboden ist die Durchwurzelung im U-Feld überwiegend *mittel* (6 - 10 Wurzeln/dm²) bis *schwach* (3 - 5 Wurzeln/dm²), im K-Feld *mittel* bis *sehr schwach* (1 - 2 Wurzeln/dm²) ausgeprägt.

Die bisherigen Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und -intensität (z.B. WATTENDORF et al. 2005) erbrachten deutlichere Unterschiede zwischen den Testfeldern. Während die Wur-

zelzahlen der Oberböden beider Felder vergleichbar hoch waren, fehlten Wurzeln im Unterboden des K-Feldes in den Jahren 2001 und 2004 weitgehend (Abbildung 2). In Tiefen unterhalb 50 cm wurden im U-Feld bei diesen Untersuchungen deutlich mehr Wurzeln gefunden. Diese Tendenzen sind zwar auch jetzt noch zu erkennen, die Aufgrabung im Mai 2008 erbrachte aber erstmals auch im K-Feld Wurzeln unterhalb 70 cm Tiefe. Ein Vergleich mit der Trockenraumdicke (Abbildung 1, Kb 08) zeigt, dass der Unterboden der Probestelle vergleichsweise weniger dicht ist und vermutlich deshalb bis in 80 - 90 cm Tiefe gut von Wurzeln erschlossen werden kann. In größerer Tiefe nimmt die Dichte des Bodens im K-Feld zu, hier wurden deshalb wiederum weniger Wurzeln als im U-Feld nachgewiesen.

Es ist anhand einer Probestelle nicht eindeutig zu beurteilen, ob der Unterboden des K-Feldes nun überall langsam von Wurzeln erschlossen werden kann, oder ob die 2008 festgestellte Durchwurzelung als Reaktion auf eine Stelle mit besonders günstigen Bodeneigenschaften gesehen werden muss.

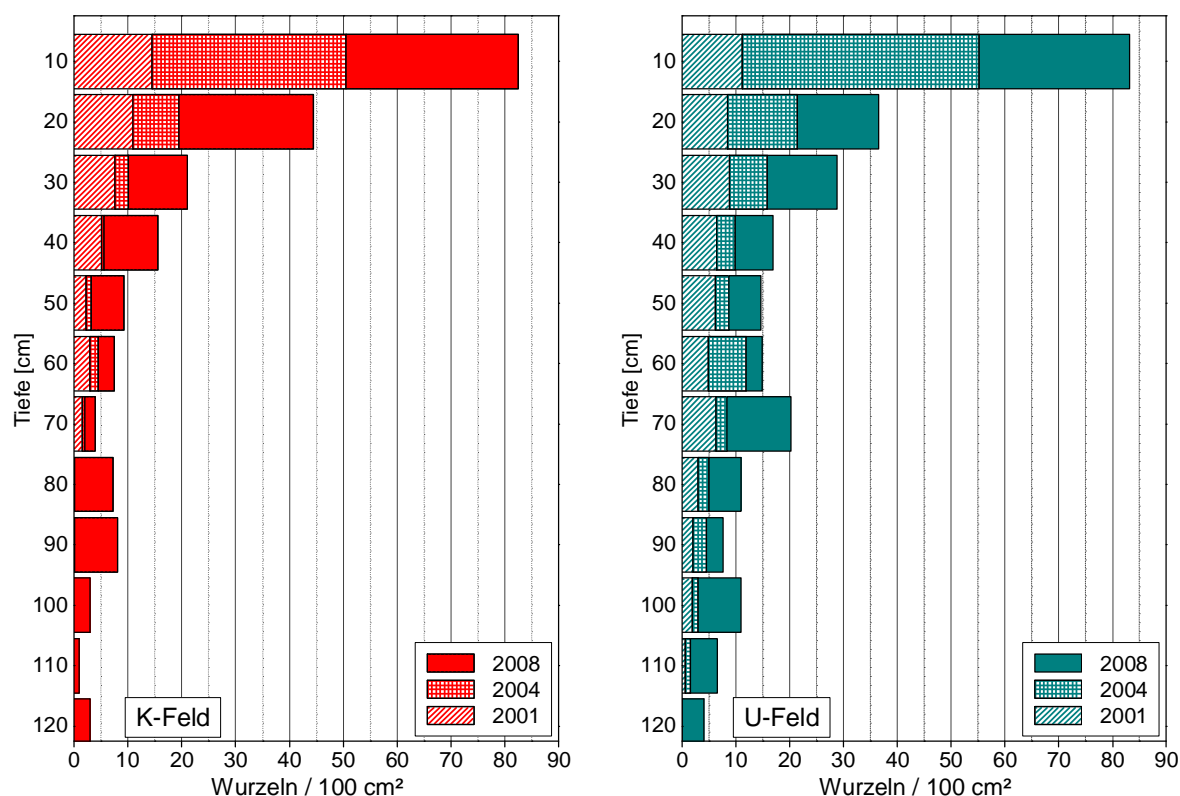


Abbildung 2: Durchwurzelungsintensität der Rekultivierungsschicht des K- (links) und des U-Feldes (rechts); Ergebnisse von Aufgrabungen im Mai/Juni 2001, Mai 2004 und Mai 2008

3.3.2. Gehölzwachstum

In die Versuchsfelder wurden im Frühjahr 2001 je 54 Zitterpappeln (*Populus tremula*) gleicher Herkunft gepflanzt. Im Rahmen der kontinuierlichen Untersuchungen wird jährlich der Stammdurchmesser und/oder Stammumfang dieser Bäume bestimmt. Im Folgejahr der Pflanzung starben im K-Feld (17 Stück) erheblich mehr Pappeln ab, als im U-Feld (5 Stück, siehe WATTENDORF et al. 2005). Weitere Verluste resultieren aus Beschädigung der Bäume

durch Wild, Bau- und Pflegemaßnahmen. Heute stehen in jedem Feld noch 18 Pappeln. Die verbliebenen Bäume entwickeln sich in den Versuchsfeldern unterschiedlich. Die Bestände unterscheiden sich augenscheinlich - die größeren Bäume stehen im Feld mit unverdichtetem Boden - aber auch messbar: Im Herbst 2008 betrug der Mittelwert des Stammumfangs in 20 cm Höhe über dem Boden im U-Feld 454 mm und im K-Feld 300 mm. Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des Stammumfangs aller jeweils lebenden Pappeln von 2002 bis 2008. Die Abbildung macht deutlich, wie sich die beiden Kollektive mit anfänglich gleichen Merkmalen immer weiter auseinander entwickeln.

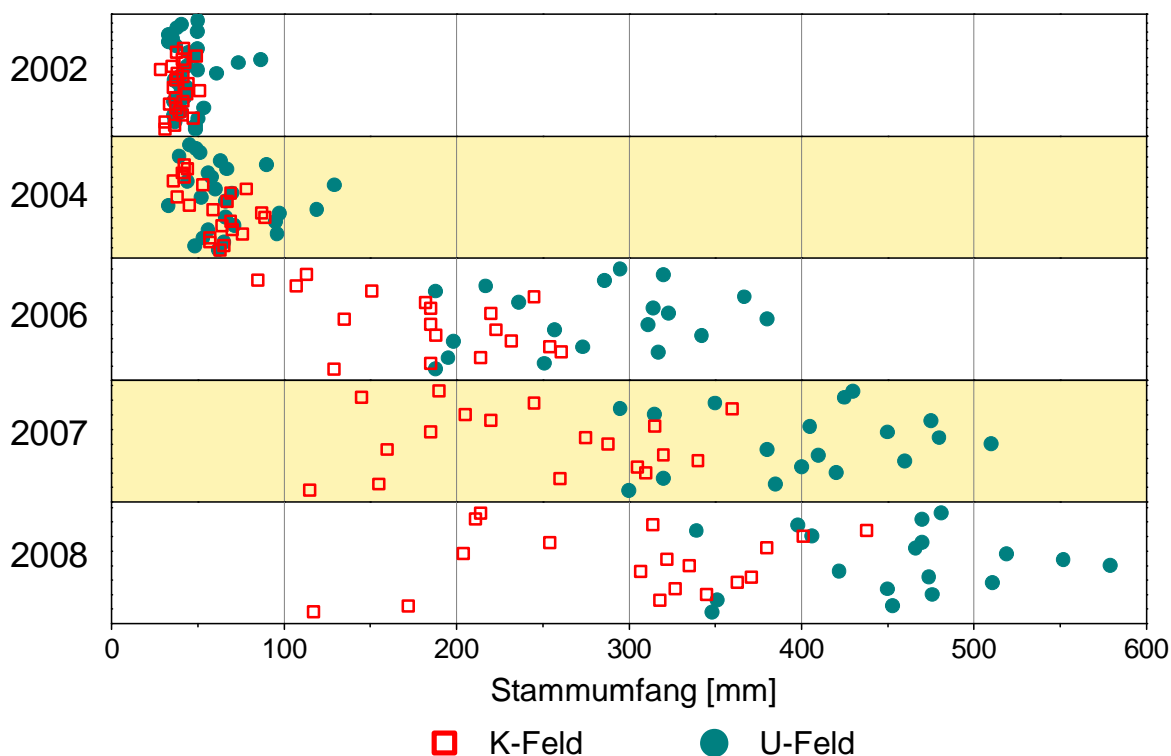


Abbildung 3: Stammumfang der Pappeln (*Populus tremula*) auf den Versuchsfeldern von 2002 bis 2008, gemessen in 20 cm Höhe. Die Einzelbäume sind in den fünf Zeilen wie auf den Versuchsfeldern jeweils von unten nach oben angeordnet.

Das nahezu flächendeckend bessere Wachstum der Bäume im U-Feld kann als Indiz für insgesamt günstigere Standorteigenschaften dieses Testfelds gewertet werden. Außerdem beeinflusst das bessere Wachstum den Wasserhaushalt der Lysimeterfelder. Durch höhere Interzeption und Transpiration des besser entwickelten Gehölzbestandes verringert sich im U-Feld auch die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht (siehe 3.5).

3.4. Entwicklung der Regenwurmpopulation

Regenwürmer haben in den meisten Böden Mitteleuropas einen großen Einfluss auf den Abbau der organischen Substanz und den Aufbau des Bodengefüges. Bodenumlagerung und der Einbau der Rekultivierungssubstrate schädigen die Regenwurmfaua des Bodens schwer:

- Auf der Versuchsfläche Leonberg wurden im Frühjahr 2001, ein halbes Jahr nach der Baumaßnahme, keine Regenwürmer mehr gefunden, obwohl im eingebauten Boden circa 24 Regenwürmer je m² enthalten waren (Abbildung 4).
- Auf der Kreismülledeponie Böblingen wurde im Frühjahr 2008 auf einer 2,5 ha großen rekultivierten Fläche in 25 Schürfen (20 x 20 x 25 cm) kein Regenwurm gefunden obwohl aufgrund der Herkunft des Substrates Regenwürmer zu erwarten gewesen wären.

Der Aufbau von Regenwurmpopulationen in rekultivierten Flächen ist daher auf Zuwanderung aus der Umgebung angewiesen. Aufgrund der geringen Wanderungsgeschwindigkeit der Tiere von fünf bis zehn Meter pro Jahr und der Schwierigkeit, Straßen und andere Hindernisse zu überqueren, kann dies vor allem bei größeren Flächen und ungünstigen Rahmenbedingungen sehr lange dauern. Um die Besiedlung der Leonberger Lysimeterfelder zu beschleunigen, wurden im Frühjahr 2002 gezielt Regenwürmer in die Versuchsfläche eingebracht. Diese Maßnahme war erfolgreich, die Regenwurmbiomassen stiegen danach deutlich an (Abbildung 4, EHRMANN 2005) und erholten sich auch nach einem trockenheitsbedingten Einbruch im Sommer 2003 wieder.

Im Frühjahr 2008 wurden in Leonberg erneut Regenwurmuntersuchungen durchgeführt (zur Methodik siehe EHRMANN 2005). In beiden Versuchsfeldern wurden erstmals annähernd gleich große Biomassen gefunden (Abbildung 4). Die 2008 ermittelten Regenwurmbiomassen sind relativ hoch, sie liegen unter den Mittelwerten von Dauergrünland, aber deutlich über den Werten von Wäldern³ auf Löss in Baden-Württemberg (EHRMANN et al. 2002).

Gleich große Biomassen in den Testfeldern bedeuten aber nicht, dass die Bodeneigenschaften der Versuchsflächen gleich günstig für Regenwürmer sein müssen. Die Vegetationsentwicklung ist im U-Feld weiter in Richtung Wald fortgeschritten und Wälder liefern aufgrund der im Vergleich zum Grünland schlechter abbaubaren Streu auch weniger geeignete Nahrung für Regenwürmer. Daher profitiert möglicherweise die Regenwurmpopulation im K-Feld von der langsameren Entwicklung des Baumbestandes und damit höheren Anteilen von Kräutern und Gräsern. Ohne Zweifel ist das K-Feld derzeit kein schlechter Standort für Regenwürmer. Der Oberboden wurde in beiden Feldern tiefreichend aufgelockert. Damit steht den Tieren auch im K-Feld ohne den verdichteten Unterboden circa 50 cm guter Lösslehm zur Verfügung, der in Jahren ohne ausgeprägte Trockenphasen ausreichend Lebensraum bietet. Spannend bleibt die Entwicklung in Extremjahren. Im Trockenjahr 2003 wurde die Regenwurmfaua im K-Feld – vermutlich aufgrund des weniger tief nutzbaren Bodens – wesentlich stärker geschädigt als im U-Feld.

Ebenfalls im Frühjahr 2007 und 2008 wurden Bauten tiefgrabender Regenwürmer in beiden Testfeldern erfasst. Es wurde jeweils 10 Flächen à 1 m² untersucht. 2008 wurden im U-Feld mit durchschnittlich 9,8 Bauten je m² fast doppelt so viele wie im K-Feld (5,4 je m²) gezählt. Unter jedem Bau befindet sich eine Röhre, die in Lössböden über einen Meter tief reichen

³ Die Flächen waren zu Versuchsbeginn eher Grünland, mittlerweile haben sie mehr Ähnlichkeit mit einem Wäldchen.

kann. Diese Röhren sind wichtige Wege für Wurzeln, Wasser und Luft. Für die tiefgrabenden Regenwürmer ist das weniger verdichtete U-Feld vermutlich noch der bessere Standort.

Die große Regenwurmpopulation wird das Bodengefüge in beiden Feldern langfristig verbessern. Im Oberboden sind die Effekte bereits deutlich zu sehen (WATTENDORF et al. 2008). Unklar ist bislang allerdings, ob und in welchem Umfang die Regenwürmer Bodenverdichtungen auflösen können und mit welcher Geschwindigkeit die Prozesse der Bodenverbesserung durch die Regenwürmer ablaufen werden.

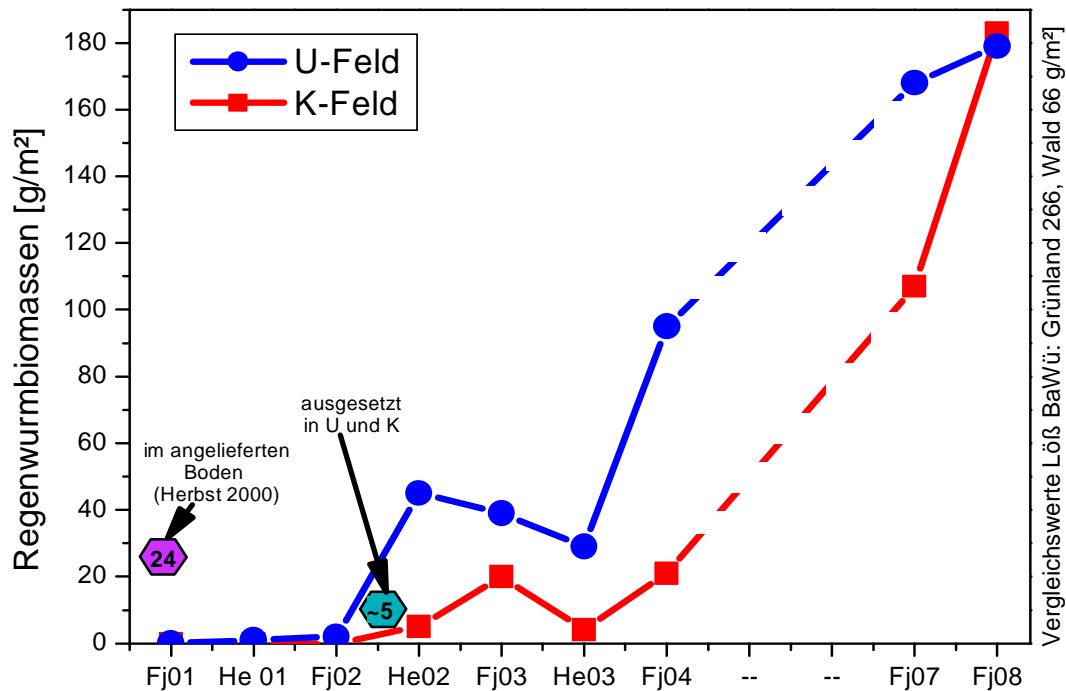


Abbildung 4: Entwicklung der Regenwurmpopulation nach Anlage der Testfelder im Herbst 2000 bis zum Frühjahr 2008; Fj = Frühjahr, He = Herbst

3.5. Absickerung aus den Lysimeterfeldern

Der Vergleich der laufend fortgeschriebenen Summen der Absickerung des U- und des K-Feldes zeigt, dass beide Absickerungskurven nahezu synchron, aber nicht genau parallel verlaufen (Abbildung 5), so dass sich ihre Distanz stetig vergrößert. Deutliche Unterschiede zeigen sich vor allem außerhalb der Vegetationsperiode, zu Zeiten hoher Absickerungsraten: Hier sind im K-Feld deutlich größere Sickerwassermengen zu verzeichnen, während in den Sommermonaten die Verdunstung den Niederschlag weitgehend aufbraucht und beide Felder nur geringe Sickerwassermengen liefern (Tabelle 2). In dieser Zeit kann die Absickerung des U-Feldes größer als die des K-Feldes werden, wie die Monate VI und VII 2008 zeigen (Tabelle 2). Die Tabelle belegt darüber hinaus gut die Wirkung der Verdunstung durch die Vegetation auf den Wasserhaushalt. Während bei überdurchschnittlichen Niederschlägen im April 2008 in Höhe von 95,4 mm die Sickerwassermengen deutlich ansteigen, wirkt sich starker Regen im Juni (117,4 mm) oder August (91,7 mm) kaum auf die Absickerung aus.

Tabelle 2: Monatssummen von Niederschlag (N, gemessen am Rand der Versuchsanlage) und Sickerwasser aus den Leonberger Lysimeterfeldern U und K, Jahr 2008

| [mm] | Σ Jahr | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|----------|---------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| N | 731,5 | 57,4 | 17,8 | 56,8 | 95,4 | 75,8 | 117,4 | 65,5 | 91,7 | 39,2 | 41,8 | 23,7 | 49,0 |
| U | 74,6 | 3,4 | 2,6 | 13,3 | 31,6 | 4,9 | 5,6 | 2,3 | 0,8 | 0,8 | 4,3 | 1,5 | 3,5 |
| K | 124,5 | 8,3 | 4,2 | 26,0 | 55,0 | 7,7 | 5,2 | 0,9 | 1,5 | 0,8 | 4,7 | 2,6 | 7,6 |

Im Zeitraum seit Beginn der kontinuierlichen Messungen im Juni 2003 bis Dezember 2008 waren auf der Versuchsanlage in Leonberg insgesamt 3723 mm Niederschlag zu verzeichnen. Davon gelangen im K-Feld 712 mm, also circa 19 % zur Absickerung. Der entsprechende Wert für das U-Feld liegt bei 494 mm, dies sind nur circa 13 % der Niederschlagsmenge. Aus dem U-Feld versickert demnach fast 1/3 weniger Wasser als aus dem K-Feld.

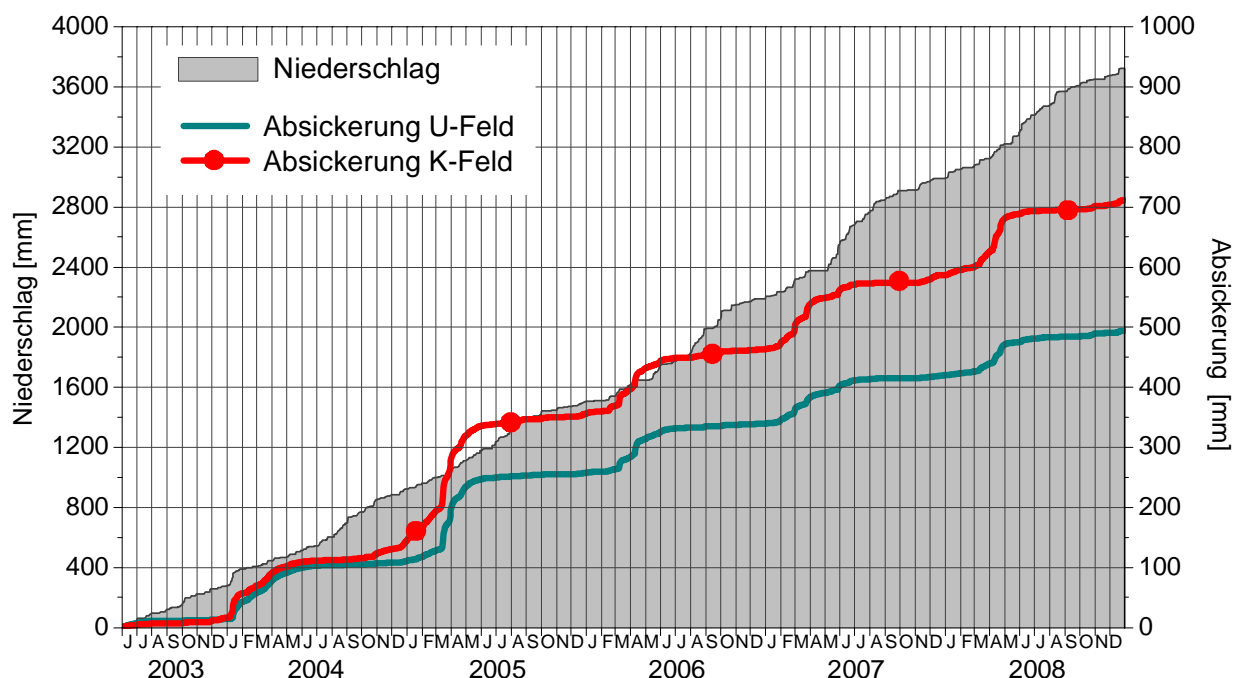


Abbildung 5: Niederschlag in Leonberg (Ordinate links) und Absickerung (rechts) aus U-Feld und K-Feld von Juni 2003 bis Dezember 2008; die Ordinaten sind unterschiedlich skaliert.

Insgesamt wird der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag immer geringer und der "Wirkungsgrad" der Lysimeterfelder immer höher. Ursache für die relativ abnehmenden Sickerwassermengen ist die fortschreitende Gehölzentwicklung. Die tiefer wurzelnden und immer größer werdenden Bäume können mehr Wasser aus dem Unterboden nutzen und mit steigender Blattfläche mehr Regenwasser zurückhalten. So geht mehr Wasser durch Transpiration und Interzeption in die Atmosphäre zurück.

4. Literatur

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 438 S., Hannover

BIEBERSTEIN, A., J. BRAUNS & H. REITH (2005): Standsicherheit und Setzungsverhalten der Rekultivierungsschicht, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.]: Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra Band 41: 42 - 57, Freiburg

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

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

EHRMANN, O. (2005): Bodenleben: Regenwürmer und Mikroorganismen, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.]: Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra Band 41: 108 - 134, Freiburg

EHRMANN, O., M. SOMMER & T. VOLLMER (2002): Regenwürmer. In: SOMMER, M., O. EHRMANN, J.K. FRIEDEL, T. MARTIN & G. TURIAN [Hrsg.]: Böden als Lebensraum für Organismen - Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs, Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Universität Hohenheim, Stuttgart

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, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra Band 41, 269 S., Freiburg

WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN (2007): Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten (BWU 26004), 11 S., <http://www.bwplus.fzk.de>

WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN (2008): Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten (BWU 26004), 15 S., http://bwplus.fzk.de/inhalt_berichte_zwischen2008.html

Vorhaben BWU 26004

Zusammenfassung

Forschungsvorhaben BWU 26004 befasst sich mit der Optimierung von Rekultivierungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen. Durch bodenschonenden Einbau soll die Evapotranspiration gesteigert und die Absickerung reduziert werden. In vorangegangenen Vorhaben wurden auf der Kreismülldeponie Leonberg (Landkreis Böblingen) zwei Großlysimeterfelder eingerichtet und mit Bäumen bepflanzt. Das erste Feld enthält eine unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht, das zweite zum Vergleich eine konventionell verdichtet eingebaute Variante. Die beiden Lysimeterfelder unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren; Bodenmaterial, Bepflanzung und Behandlung der Felder sind identisch. Mit dieser Versuchsanlage kann der Wasserhaushalt unterschiedlich verdichteter Rekultivierungsschichten sowie die ihn beeinflussenden Faktoren qualitativ und quantitativ von Beginn an untersucht werden.

Das laufende Vorhaben hat zum Ziel, die Forschungsarbeiten zum Wasserhaushalt und zur Boden- und Vegetationsentwicklung fortzuführen, um lückenlose Datenreihen vom Initialstadium der Boden- und Vegetationsentwicklung bis zum ausgebildeten Waldbestand zu gewinnen und durch regelmäßige Kontrollen und Wartung den Bestand der Leonberger Lysimeteranlage für den Langzeitbetrieb zu sichern. Das Arbeitsprogramm des Vorhabens beinhaltet das Erfassen von Wetterdaten, Absickerungsraten und Bodenwassergehalten einschließlich der Stauwasserhöhen in den Lysimeterfeldern sowie Untersuchungen zur Entwicklung der Vegetation, der Regenwurmpopulation und der Bodenstruktur.

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschichten wurden nach 2001 und 2004 auch im Jahr 2008 exemplarisch in jeweils einem Profil pro Lysimeterfeld untersucht. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass der unverdichtete Boden acht Jahre nach dem Einbau - vermutlich bedingt durch Setzungen - in Tiefen zwischen 0,5 und 1,3 m ähnlich hohe Trockenraumdichten wie der mechanisch verdichtete Boden aufweist. Außer diesen Setzungen sind nur wenige Anzeichen einer Gefügeentwicklung erkennbar, insbesondere ist im verdichtet eingebauten Boden noch keine Auflösung der Verdichtungen und der horizontalen Orientierung des Gefüges zu erkennen. Erstmals konnten 2008 im beim Einbau verdichteten Boden Wurzeln unterhalb 70 cm Tiefe nachgewiesen werden. Die Regenwurmpopulationen erreichten 2008 in beiden Versuchsfeldern gleiche Biomassen, jedoch ist die Anzahl der Bauten tiefgrabender Regenwürmer im unverdichteten Boden höher.

Höhere Zuwachsraten der Gehölze im Feld mit unverdichtetem Boden stützen die Hypothese, dass die unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht ein günstigerer Standort ist, auch wenn sich die exemplarisch gemessenen physikalischen Bodeneigenschaften beider Felder angenähert haben. Das günstigere Wachstum der Gehölze beeinflusst auch den Wasserhaushalt. Die Annahme liegt nahe, dass die beim lagenweisen Verdichten des Bodens entstandenen Schichten und Schichtgrenzen sowohl vertikale Wasser- und Luftbewegungen als auch die Durchwurzelung hemmen und damit die Entwicklung der Gehölzpflanzen einschränken. Hieraus resultiert eine geringere Verdunstungsleistung der Vegetation und in der Konsequenz eine um circa 30 % höhere Sickerwassermenge aus dem Lysimeterfeld mit verdichtetem Boden.

Project BWU 26004

Summary

The considered research project deals with characters and water balance of recultivation layers in waste dump surface sealing systems. Optimized recultivation layers with uncompacted soil should minimize the leakage by means of evapotranspiration. In preceding projects on the Kreismülldeponie Leonberg (Landkreis Böblingen) two large lysimeter fields were constructed and planted with trees. The only difference between the two lysimeter fields is the manner of the installation of the recultivation layers. In the first field the soil installed was not compacted, whereas in the second field it was mechanically compacted. Employing this experimental set-up, the water balances of the two different recultivation layers as well as the most important factors influencing it can be ascertained and compared.

Targets of the project are to continue the examinations on the water regime and the development of site characters (soil, vegetation) to obtain continuous data series from the outset of soil and vegetation development and to control and maintain the test field facility for long-term operations. The working program includes the collecting of weather data, leakage rates and soil moisture values including backwater levels in the lysimeter fields as well as examinations of the vegetation development, the earthworm population and the soil structure.

The latest examinations of soil characteristics were conducted in the year 2008, eight years after installation of the recultivation layers, in each a soil profile per lysimeter field. It turns out, that in the zone between 0,5 and 1,3 m the uncompacted soil featured just as high bulk densities as the mechanical compacted soil. This effect may probably be caused by soil subsidence. Except this subsidence only marginal signs of further development of soil structures are recognizably, in particular no dissolution of compactions and horizontal orientated structures in the testfield with mechanically compacted soil was detected. For the first time in 2008 roots could be discovered in the Field with compacted soil below a depth of 70 cm. The earthworm populations reached in 2008 in both test fields equal biomasses, however the composition of the populations differs.

Higher growth rates of woody species reinforce the hypothesis that the non-compacted recultivation layer provides favourable site conditions, even if the exemplary measured physical soil characteristics of both fields may have approximated over the years. Better growth of trees also affects the water balance. The leakage rates from the test fields render obvious that soil compaction generates layers and layer boundaries, which restrain both vertical water and air movement as well as root penetration and thus the development of the trees. The outcome of this are a lower evapotranspiration and therefore about 30 % higher leakage rates in the lysimeter field with compacted soil.