

Programm Lebensgrundlage Umwelt
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des
Statusseminars des BWPLUS am 2. und 3.3.2004 im
Forschungszentrum Karlsruhe

Wasserhaushalt und Bodenentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten

Wattendorf, P. & W. Konold

**Arbeitsgruppe: W. Konold¹, P. Wattendorf¹, G. Bönecke¹, A. Bieberstein², H. Reith²,
O. Ehrmann³, E. Haubrich⁴, M. Koser⁴ und H. Schack-Kirchner**

¹ : Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Landespflege; ² : Universität Karlsruhe,
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abt. Erddamm- und Deponiebau; ³ :
Bodenbiologie, Neuffen, ⁴ : Umweltwirtschaft GmbH, Stuttgart; ⁵ : Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg, Institut für Bodenkunde und Waldernährung

Förderkennzeichen: BWD 21010

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

Wasserhaushalt und Bodenentwicklung qualifizierter Rekultivierungsschichten

Wattendorf, P. & W. Konold

Arbeitsgruppe: W. Konold¹, P. Wattendorf¹, G. Bönecke¹, A. Bieberstein², H. Reith², O. Ehrmann³, E. Haubrich⁴, M. Koser⁴ und H. Schack-Kirchner⁵

¹: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Landespflege; ²: Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abt. Erddammbau und Deponiebau; ³: Bodenbiologie, Neuffen, ⁴: Umweltwirtschaft GmbH, Stuttgart; ⁵: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Bodenkunde und Waldernährung

Finanzierung: Land Baden-Württemberg und Landkreis Böblingen

1 Einführung

1.1 Ausgangslage

Die Rekultivierungsschicht ist eine wichtige Komponente im Oberflächenabdichtungssystem von Deponien, denn sie dient nicht nur als Tragschicht von Bewuchs, sondern soll als „Wasserhaushaltsschicht“ Sickerwasserzuflüsse reduzieren und vergleichmäßigen (z.B. DGGT 2000). Eine optimierte Rekultivierungsschicht als einziges Dichtungselement kann zwar nur in niederschlagsarmen Gebieten die Absickerung vollständig verhindern, sie reduziert die Absickerungsraten jedoch an allen Standorten deutlich. Weiterhin wirkt sie im Gegensatz zu technischen Dichtungselementen auf unbegrenzte Zeit.

Die Wasserhaushaltsfunktionen der Rekultivierungsschicht ist von den Eigenschaften des Bodens und der Vegetationsdecke abhängig. Der Substratqualität, dem Bodeneinbau und der Bepflanzung bzw. Vegetationssteuerung kommt somit eine große Bedeutung zu (z.B. BRAUNS et al. 1997, BÖNECKE 2001). Um eine möglichst weitgehende Sickerwasserreduzierung zu erreichen, ist ein standortgerecht aufgebauter Bewuchs, meist Wald, erforderlich, der die Rekultivierungsschicht intensiv durchwurzelt und Bodenwasser auch aus größerer Tiefe aufnimmt.

Hierzu muss die Rekultivierungsschicht besonderen Anforderungen genügen, insbesondere müssen die Substrate möglichst locker gelagert sein (z.B. BÖNECKE 1994). Bislang waren die Anforderungen an solche Rekultivierungsschichten von Seiten der Boden- und Vegetations-

kunde nicht mit bautechnischen Vorgaben vereinbar, insbesondere fehlten Grundlagen zur Bewertung der Standsicherheit. In einem vorangegangenen Forschungsvorhaben (BWSO 99003, siehe WATTENDORF et al. 2003) wurden grundlegende Erkenntnisse zur Gestaltung qualifizierter Rekultivierungsschichten beispielhaft auf der Kreismülldeponie Leonberg gewonnen.

Da bislang keine praktischen Erfahrungen mit unverdichtet eingebauten Rekultivierungsschichten vorliegen, ist nicht bekannt, wie sich die bodenmechanischen und -physikalischen Eigenschaften der Substrate durch Setzungen im Lauf der Zeit verändern. Es kann beispielsweise angenommen werden, dass sich die Lagerungsdichten bei unverdichtetem Einbau durch Setzungen erhöhen. Langfristig – zumindest in den oberen Bodenschichten – wirken die Gefügeentwicklung, Wurzeln und Bodenorganismen eher gegenläufig.

Mischungen aus Unterbodenmaterial und Kompost werden in der Rekultivierung oft zum Aufbau von Oberböden verwendet. Sie besitzen zwar ähnlich hohe Gehalte an organischer Substanz wie natürliche Böden, aber auf keinen Fall deren Organismengemeinschaft. Obwohl Bodenorganismen, vor allem Regenwürmer, großen Einfluss auf die Bodenentwicklung nehmen, wurden Rekultivierungsschichten von Deponien bisher kaum bodenbiologisch bearbeitet.

Ziel des Vorhabens ist es, die Entwicklung des Bodens und der Vegetation unterschiedlich gestalteter Rekultivierungsschichten zu untersuchen und zu dokumentieren sowie gegebenenfalls Unterschiede zwischen unverdichtet und verdichtet eingebauten Substraten nachzuweisen. Es sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie diese Entwicklungen den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten beeinflussen, weil hierdurch in der Praxis auch das langfristige Funktionieren des Systems „Oberflächenabdichtung“ berührt wird.

1.2 Untersuchungsprogramm und Versuchsanlage

Die Versuchsanlage auf der Kreismülldeponie Leonberg des Landkreises Böblingen besteht aus vier Versuchsfeldern an einer südöstlich exponierten Böschung mit einer mittleren Neigung von etwa 1 : 2,7. Das Rekultivierungssubstrat der Felder - toniger Schluff (Ut2/Ut3) - stammt aus einer einzigen Entnahmestelle, ist sehr homogen und weitgehend steinfrei.

Wichtigster Bestandteil der Anlage sind zwei Großlysimeterfelder mit jeweils ca. 360 m² Fläche, in die im Herbst 2000 die Versuchsvarianten „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ (Feld U) und „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ (Feld K) eingebaut wurden. Die Rekultivierungsschichten der beiden Lysimeterfelder unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren; Substrate, Bodenbearbeitung und Bepflanzung sind identisch. In den Testfeldern wird neben den bodenphysikalischen Eigenschaften auch die Entwicklung der Ansaaten und Gehölze sowie die Populationsdynamik der Regenwürmer untersucht.

Die Absickerung (A_s) aus den Rekultivierungsschichten der Lysimeterfelder U und K sowie der Oberflächenabfluss (A_o) können kontinuierlich aufgezeichnet werden. Begleitend wird in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe regelmäßig der Bodenwassergehalt mit TDR-Sonden an vier Messstellen pro Lysimeterfeld gemessen. An je zwei Messstellen pro Lysimeterfeld werden Bodenwasserspannung mit konventionellen Tensiometern, Bodentemperatur und Boden- CO_2 -Gehalt bestimmt.

Zur Beurteilung des Setzungs- und Verformungsverhaltens des unverdichtet geschütteten Rekultivierungssubstrates wurden insgesamt 6 Vermarkungen auf dem betreffenden Testfeld U installiert. Um die Entwicklung der bodenmechanischen Eigenschaften unverdichteter Substrate zu dokumentieren, wurden weiterhin Einrichtungen zur in-situ-Ermittlung der Scherparameter unverdichteter Substrate eingebaut („Karlsruher Schertester“, siehe WATTENDORF et al. 2003).

Bisher wurden nur wenige Großlysimeter gebaut. Jede Anlage ist ein Unikat, das für einen speziellen Einzelfall erstellt wurde, Erfahrungen sind daher nur bedingt übertragbar. Die Funktion kann erst nach dem vollständigen Aufsättigen der Rekultivierungsschicht überprüft werden. In Leonberg zeigte das K-Feld Randumläufigkeiten, die vermutlich in der lagenweisen Verdichtung der Rekultivierungsschicht dieses Feldes begründet waren. Das unverdichtete U-Feld lieferte bereits nach der Aufsättigung plausible Absickerungswerte. Die Ertüchtigung des K-Feldes wurde im Juni 2003 endgültig abgeschlossen, inzwischen ist davon auszugehen, dass beide Lysimeterfelder valide Daten liefern.

Das Klima der Jahre 2002 und 2003 ist durch erhebliche Unterschiede in der Niederschlagshöhe und – weniger gravierend - der Temperatur gekennzeichnet. 2002 war überdurchschnittlich feucht, 2003 mit weit unterdurchschnittlichen Regenmengen und sehr hohen Sommertemperaturen ein ausgesprochenes Trockenjahr. Somit bietet sich eine gute Gelegenheit, die Auswirkungen extremer klimatischer Bedingungen auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten zu betrachten. Auch für die Regenwurm-Biozönose sind Trockenjahre wie 2003 von einschneidender Bedeutung. Diese Aspekte sind deshalb im vorliegenden Bericht in den Vordergrund der Betrachtung gerückt.

Ausblick

Im Frühjahr 2004 werden weitere Aufgrabungen zur Untersuchung der physikalischen Bodeneigenschaften (Trockenraumdichte, Eindringwiderstand u.a.) und Durchwurzelungsintensität durchgeführt. Wegen der außergewöhnlichen Trockenheit im Jahr 2003 war dies nicht sinnvoll bzw. unmöglich. Nach dieser Erhebung der aktuellen Bodendaten werden mit mehreren Wasserhaushaltsmodellen (u.a. HELP, BOWAHALD) Vergleichsrechnungen durchgeführt und den Messwerten aus den Testfelder gegenüber gestellt, um die Modelle zu überprüfen.

2 Ergebnisse

2.1 Setzungs- und Verformungsverhalten

Über die ersten Messergebnisse zum Setzungs- und Verformungsverhalten des unverdichtet geschütteten Rekultivierungssubstrates wurde bereits berichtet (vergleiche z.B. WATTENDORF et al. 2003). Gewisse Unklarheiten bestanden dabei hinsichtlich der Setzungen des gesamten Deponiekörpers, die jedoch zu berücksichtigen sind, um Aussagen über das Setzungsverhalten der Rekultivierungsschicht treffen zu können. Aus diesem Grunde wurden direkt oberhalb des Testfeldes U auf der sich dort befindlichen Asphaltfläche sowie auf dem geschotterten Fahrweg unterhalb dessen jeweils zwei weitere Vermarkungen installiert. Die im Zeitraum zwischen Mai 2003 und Dezember 2003 festgestellten Höhenänderung sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Setzungen der Vermarkungen [in cm] am und im U-Feld (Zeitspanne 05/2003 bis 12/2003)

Vermarkungen	süd	nord
oberhalb des Testfeldes U	2,8	2,3
im Testfeld oben	2,4	2,4
im Testfeld mitte	1,5	1,9
im Testfeld unten	2,0	1,5
unterhalb des Testfeldes	0,4	1,9

Erwartungsgemäß sind die Setzungen der Deponie oberhalb des U-Feldes aufgrund der größeren Müllkörpermächtigkeit größer als unterhalb des Testfeldes. Die gemessenen Setzungsmaße innerhalb des Testfeldes entsprechen weitgehend den Setzungen außerhalb des Testfeldes. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die festgestellten Setzungen nahezu ausschließlich aus den Verformungen des Deponiekörpers resultieren und die Setzungen der Rekultivierungsschicht nahezu vollständig abgeklungen sind. Dies wird auch durch aktuelle Dichtewerte, die an Bodenproben aus dem Testfeld U aus einer Tiefe von 50 cm bis 65 cm ermittelt wurden, bestätigt. Die Trockendichten liegen im beprobten Tiefenbereich zwischenzeitlich sehr einheitlich bei $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$ und damit in der gleichen Größenordnung wie im Entnahmestand des Substrates.

Die über nahezu 3 Jahre gemessenen Setzungsverläufe der Vermarkungen im Testfeld sind in Abbildung 1 dargestellt. Diese zeigen bereits nach ca. 150 bis 200 Tagen einen nahezu gerad-

linigen Verlauf mit gleicher Steigung wie im letzten Messintervall. Daher ist davon auszugehen, dass die Setzungen der Rekultivierungsschicht bereits nach ca. 150 bis 200 Tagen weitgehend abgeklungen waren und die gemessenen weiteren Verformungen überwiegend aus der Verformung des Deponiekörpers resultieren.

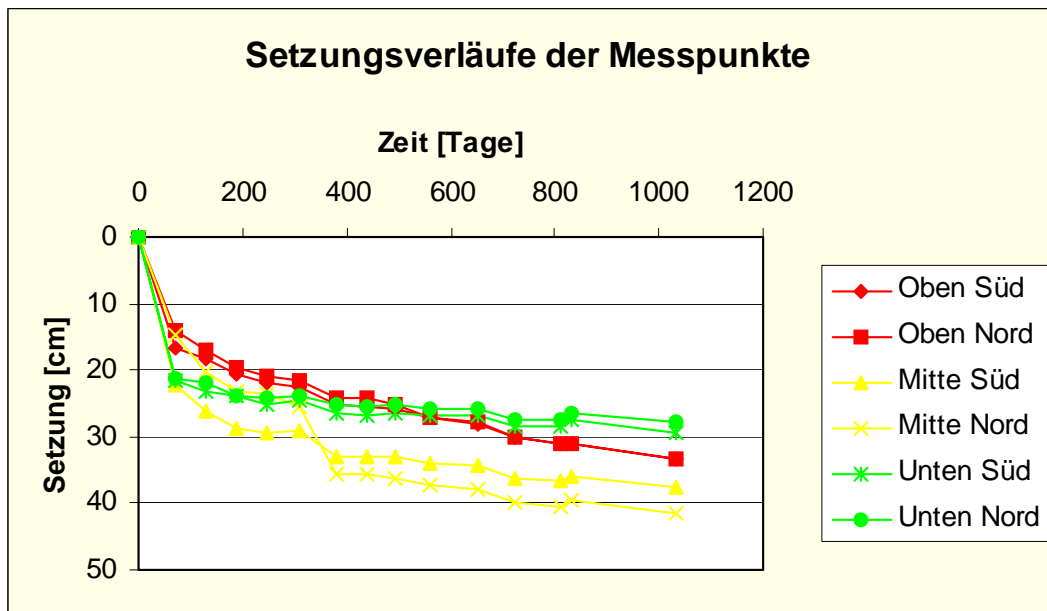


Abbildung 1: Setzungsverläufe der Vermarkungen im Testfeld

2.2 Entwicklung der Regenwurmpopulationen

Mit dem Boden für die Rekultivierungsschicht der Testfelder wurde im Herbst 2000 eine Regenwurmbiomasse von ca. 24 g/m² angeliefert. Umlagerung und Einbau des Bodens dezimierten die Regenwurmpopulationen so stark, dass im Frühjahr 2001, ein halbes Jahr nach Fertigstellung der Versuchsanlage, keine Regenwürmer mehr zu finden waren (Abbildung 3, Tabelle 2). Im Herbst 2001 und im Frühjahr 2002 wurde nur im U-Feld eine sehr geringe Biomasse gefunden. Im Vergleich zu „normalen“ Populationen von Wiesen (266 g/m²) und Wäldern (66 g/m²) aus ähnlichem Substrat in Baden-Württemberg sind dies extrem niedrige Werte. Da Regenwürmer einen wichtigen Einfluss auf Streuabbau, Nährstoffmineralisierung und Bodenstruktur haben, bedeutet ihr weitgehendes Fehlen eine wesentliche Beeinträchtigung des Systems „Boden“ und seiner natürlichen Entwicklungspotenziale.

Um den Populationsaufbau dieser für die Bodenstruktur wichtigen Tiere zu beschleunigen, wurden nach den Untersuchungen im Frühjahr 2002 Regenwürmer in beiden Lysimeterfeldern

und im oberen Teil des B-Feldes ausgesetzt (siehe Abbildung 3). Im unteren Drittel des U- und des K-Feldes wurden je 12 Rasensoden (29 x 29 x 29 cm, zusammen 1 m²) aus einer regenwurmreichen Auenwiese in Abständen von 1 m eingesetzt. Im oberen Teil des B-Feldes¹ wurden 5 m² Oberboden vom gleichen Standort in unterschiedlich großen Blöcken eingebracht. Beide Methoden sind einfach in der Durchführung und können deshalb in der Rekultivierungspraxis angewendet werden. Für den Versuch wurde die Entnahmestelle so gewählt, dass dort eine Regenwurmart dominierte, die vorher nicht in den Testfeldern vorhanden war.

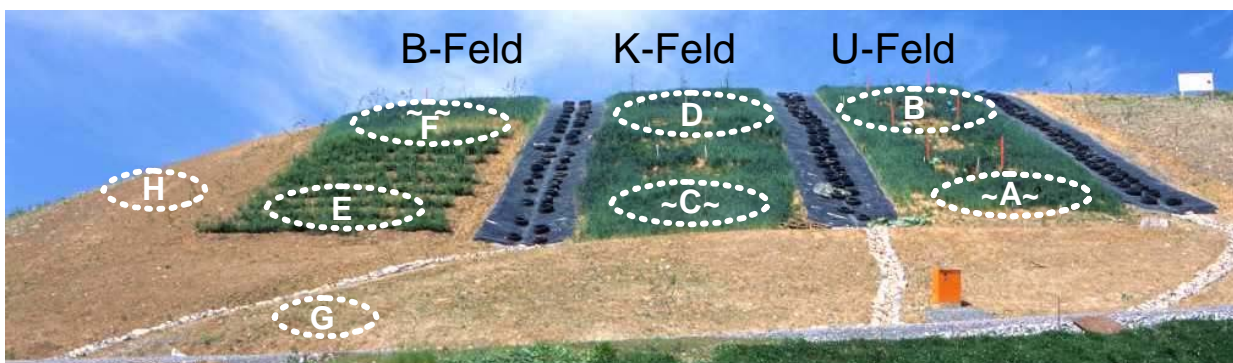


Abbildung 2: Lage der Untersuchungsflächen; an den mit ~ gekennzeichneten Stellen wurden Regenwürmer ausgesetzt. Das Foto wurde im Juni 2001 aufgenommen, ab Frühjahr 2002 waren alle Flächen begrünt.

Ab Herbst 2002 wurde das nähere und weitere (in ca. 20 m Abstand) Umfeld der Aussetzstellen in den Testfeldern auf die Etablierung von Regenwürmern untersucht (Lage siehe Abbildung 2, Termine siehe Tabelle 2). Außerdem wurden Flächen im zwar gleichzeitig rekultivierten, aber etwas später begrüntem Umfeld der Versuchsfelder beprobt. Dabei zeigte sich:

- Zumindest ein Teil der ausgesetzten Regenwurmpopulation hat überlebt, denn die Regenwurmbiomasse der Versuchsflächen hat nach dem Aussetzen deutlich zugenommen (Abbildung 3, Tabelle 2).
- Im unteren Bereich der Testfelder K und U war die Zunahme größer (Tabelle 2) als im oberen. Ursache ist zum einen die langsame Wanderungsgeschwindigkeit der dort ausgesetzten Regenwürmer. Andererseits ist der Oberhang aufgrund stärkerer Verdichtung durch intensiveres Befahren beim Einbau und der lagebedingten stärkeren Austrocknung - vor allem im trockenen Sommer 2003 – der ungünstigere Lebensraum für Regenwürmer.

¹ B-Feld: Versuchsfeld zur Erprobung von ingenieurbiologischen Bauweisen (Buschlagen).

- Beim unverdichteten Einbau (U-Feld) entwickelte sich die Regenwurmpopulation sowohl im unteren als auch im oberen Teil der Felder wesentlich besser als beim verdichteten Einbau (K-Feld). Dies gilt für den Zeitraum vor dem Aussetzen und auch danach (Abbildung 3).
- Die extreme Trockenheit im Sommer 2003 war für die Regenwürmer ungünstig und führte zu einem Rückgang der Biomasse. Im U-Feld war er aber nur gering, im K-Feld hingegen drastisch: Im oberen Teil des K-Feldes wurden im Herbst 2003 keine Regenwürmer mehr gefunden, im unteren Teil nur noch wenige.
- Auf den weniger bodenschonend eingebauten und erst im Frühjahr 2002 begrüntem Flächen [H] und [G] (Abbildung 2) am Rand der Testfelder wurden keine Regenwürmer gefunden.

Tabelle 2: Regenwurmbiomassen [in Gramm/m²] von Frühjahr 2001 bis Herbst 2003. Die Werte sind nach den drei ökologischen Gruppen der Regenwürmer differenziert. Die Buchstaben in [] weisen auf die Lage in Abbildung 2 hin. / = keine Untersuchung

Lage	links neben Versuchsfeld [H]				B-Feld: oberhalb Buschlagen [F]				K-Feld oben [D]				U-Feld oben [B]			
	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ
ökolog. Gruppe*	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ
Frühjahr 2002	0	0	0	0	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/	/	/
Herbst 2002	/	/	/	/	/	/	/	/	0	0	0	0	8	4	4	16
Frühjahr 2003**	0	0	0	0	11	0	1	12	6	8	0	13	27	3	4	35
Herbst 2003	/	/	/	/	/	/	/	/	0	0	0	0	3	4	16	24
Lage	(links) unterhalb Versuchsfeld [G]				B-Feld: in Buschlagen [E]				K-Feld unten [C]				U-Feld unten [A]			
	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ
ökolog. Gruppe*	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ	ep	an	en	Σ
Frühjahr 2001	/	/	/	/	/	/	/	/	0	0	0	0	0	0	0	0
Herbst 2001	/	/	/	/	/	/	/	/	0	0	0	0	1	0	0	1
Frühjahr 2002	/	/	/	/	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Herbst 2002	/	/	/	/	/	/	/	/	1	2	3	5	21	5	19	45
Frühjahr 2003**	0	0	0	0	4	0	4	8	0	1	20	20	18	5	16	39
Herbst 2003	/	/	/	/	/	/	/	/	0	0	4	4	1	11	17	29

*ep = epigäisch = oberflächennah lebend; an = anezisch = tiefgrabend; en = endogäisch = flachgrabend, ** = Regenwurmfänge vor dem Aussetzen der Regenwürmer

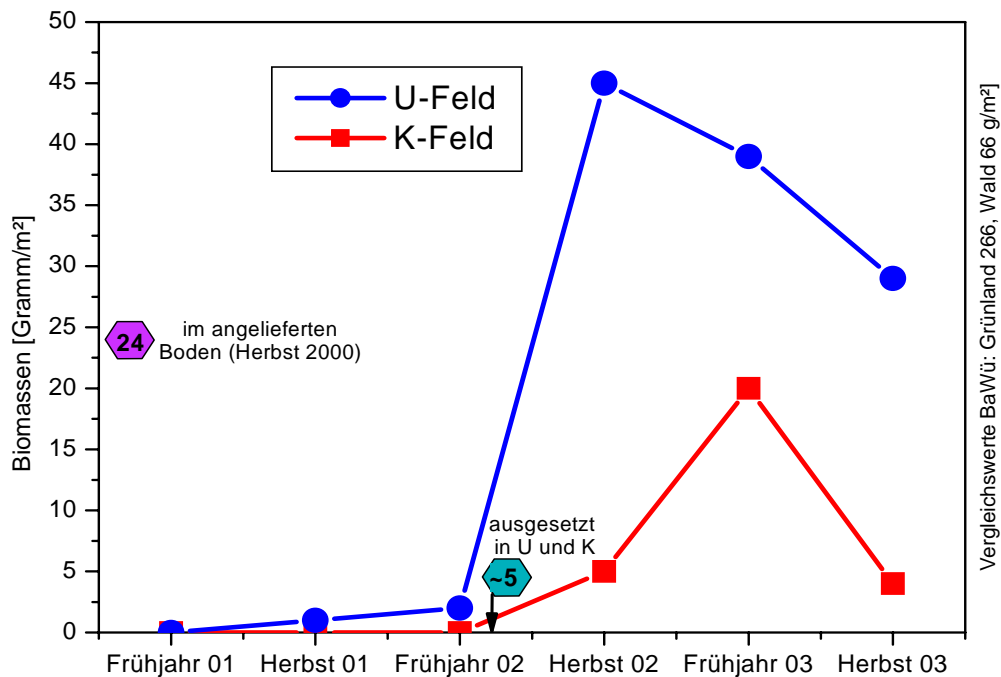


Abbildung 3: Entwicklung der Biomasse der Regenwurmpopulation im K- und U-Feld von Frühjahr 2001 bis Herbst 2003. Die im Frühjahr 2002 eingebrachten Regenwürmer können nur ungefähr als Biomasse je Fläche angegeben werden, da sich die Populationsdichte durch Wanderung ändert.

Aus den Untersuchungen lassen sich folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

- Bodenumlagerung und -einbau sind katastrophale Ereignisse für Regenwurmpopulationen. Ein drastischer Rückgang ist in der Regel zu erwarten.
- Daher sollte bei größeren Rekultivierungen das Einbringen von Regenwürmern erwogen werden. Kleinere Flächen können in der Regel von Nachbarflächen aus besiedelt werden – sofern dort Regenwürmer vorkommen².
- Der unverdichtete Einbau ist für Regenwürmer deutlich günstiger. Die Überlebenschancen der Tiere sind größer und die anschließende Entwicklung der Population verläuft wesentlich besser als beim verdichteten Einbau. Auch werden Trockenperioden besser überdauert.
- Eine schnelle Begrünung ist für Regenwürmer förderlich.

² Die Untersuchungen auf der Deponie Leonberg zeigen, dass auf dieser Deponie an den meisten Stellen ausreichend Regenwürmer vorkommen (EHRMANN 2003).

2.3 Wasserhaushalt der Lysimeterfelder

Der Wasserhaushalt von Böden wird durch die Klimafaktoren Niederschlag sowie - in geringerem Maß - Temperatur und Strahlungsenergie beeinflusst. Das Klima der Jahre 2002 und 2003 war durch außergewöhnliche Niederschlagshöhen gekennzeichnet. 2002 war im Vergleich zum langjährigen Mittel (1961-90) von 764 mm in Leonberg mit 889 mm Niederschlag überdurchschnittlich feucht. Im Gegensatz dazu war das Jahr 2003 mit nur ca. 495 mm außerordentlich trocken. Lediglich im Januar und Oktober 2003 fiel überdurchschnittlich viel Regen, alle anderen Monate waren sehr niederschlagsarm (Abbildung 4, Tabelle 3). Die Durchschnittstemperaturen von 9,5 °C blieben in beiden Jahren trotz des warmen Sommers 2003 deutlich unter dem langjährigen Mittel von 10,6 °C.

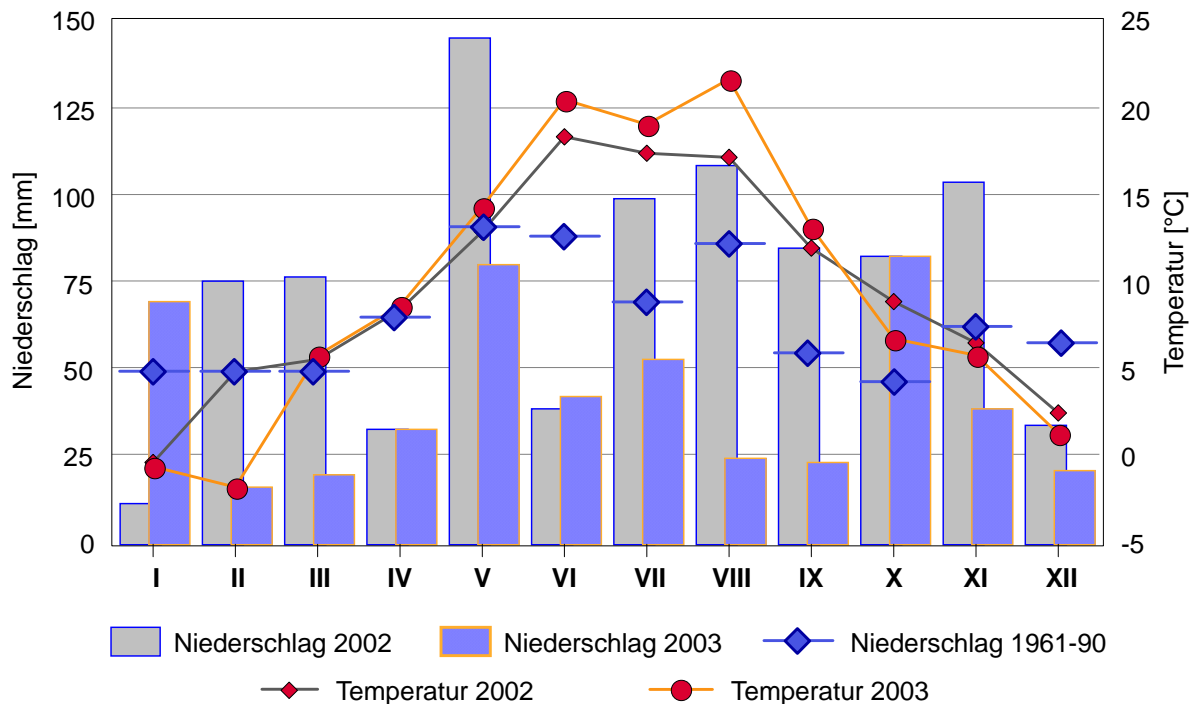


Abbildung 4: Monatliche Niederschlagshöhen und mittlere Lufttemperaturen in den Jahren 2002 und 2003 sowie Niederschlagssummen im langjährigen Mittel (1961-90).

2.3.1 Wasserhaushaltsbilanzen (Testfeld U) 2002/2003

Die Wasserhaushaltsbilanzen der Lysimeterfelder in Leonberg können nach folgender Formel berechnet werden: reale Evapotranspiration (ETa) = Niederschlag (N) - Absickerung (As) - Oberflächenabfluss (Ao) ± Bodenwasserspeicher-Änderung.

Der Bodenwasserspeicher der Testfelder war im Januar ebenso wie im Dezember 2002 vollständig gefüllt (32 - 35 Vol-%, siehe auch Abbildung 5), so dass 2002 keine Vorratsänderung berücksichtigt werden muss. Im Dezember 2003 betragen die Bodenwassergehalte im Unterboden des U-Feldes ca. 30 Vol-%. Es ergibt sich somit eine Speicheränderung (Wasserdefizit) von ca. 2 - 5 Vol-% = 40 - 100 mm für die gesamte Rekultivierungsschicht von ca. 20 dm Mächtigkeit. Aufgrund der Oberbodenlockerung (siehe WATTENDORF et al. 2003) und der inzwischen dichten Grasvegetation wurde weder 2002 noch 2003 Oberflächenabfluss registriert, er spielt als Bilanzgröße demnach keine Rolle.

Tabelle 3: Monatssummen der Niederschläge (N), Absickerung (As) aus Testfeld U 2002 und 2003

	Σ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
N 2002 [mm]	889,0	10,8	75,5	75,9	32,8	144,3	38,8	98,5	108,2	84,8	81,8	103,7	33,9
As U [mm]	400,9	29,5	35,0	55,0	23,0	40,0	10,1	13,8	13,4	17,8	25,5	94,2	43,6
N 2003 [mm]	495,2	68,6	16,2	19,7	33,0	80,3	41,8	53,1	24,1	22,8	82,3	35,8	19,1
As U [mm]	184,5	87,5	42,3	17,3	7,8	15,4	7,2	3,7	0,6	0,0	0,8	0,8	1,0

Aus den in Tabelle 3 aufgeführten Niederschlags- und Absickerungsmengen ergeben sich somit folgende Verdunstungsraten:

$$2002: \quad ETa \text{ [mm]} = 889,0 - 400,9 = \underline{488,1}$$

$$2003: \quad ETa \text{ [mm]} = 495,2 - 184,5 + 40 \text{ (bzw. } 100) = \underline{350,7} \text{ (bzw. } \underline{410,7})$$

Diese Evapotranspirationsraten sind insgesamt gesehen relativ niedrig, als langjährige Durchschnittswerte für die ETa in Leonberg werden beispielsweise 550-600 mm/a genannt (HAD 2002). Sie sind dadurch zu erklären, dass die transpirierende Vegetationsdecke noch überwiegend aus Gräsern besteht, die ihren Wasserbedarf vor allem aus dem Oberboden decken. Da dieser im Sommer mehr oder weniger stark austrocknet, ist die Verdunstung aus Wassermangel eingeschränkt. Die tiefer wurzelnden Gehölze spielen im Wasserhaushalt der Lysimeterfelder bisher eine untergeordnete Rolle.

In den Lysimeterfeldern führen Niederschläge nur in Monaten mit geringer Evapotranspiration zur Wassersättigung des Bodens über die Feldkapazität. Hieraus resultieren die höchsten Absickerungsmengen. So überschreiten nach der Sättigung des Bodenwasserspeichers auf bzw. über Feldkapazität im Oktober 2002 die monatlichen Absickerungsraten bis Februar 2003 die jeweilige Niederschlagshöhe (Tabelle 3). Danach leert sich der Bodenwasserspeicher sowohl durch ansteigende Verdunstungsraten mit Beginn der Vegetationszeit als auch durch die kontinuierlich abnehmenden Absickerungsmengen. Im September 2003 ist keine Absickerung mehr festzustellen. Ergiebiger Regen im Oktober und November 2003 bedingt jeweils ein kurzzeitiges Ansteigen der Absickerungsmengen (siehe auch Abbildung 7).

Die für das Trockenjahr 2003 sehr hohen Absickerungsraten von insgesamt 184,5 mm sind auf einen hohen Wasserüberschuss im Winter 2002/03 und überdurchschnittliche Niederschläge im Januar zurückzuführen. So versickerten im Januar und Februar 2003 insgesamt 129,8 mm, mehr als 70 % der Jahres-Absickerungsmenge.

2.3.2 Vergleich der Lysimeterfelder

Bodenwassergehalt und Wasserversorgung der Pflanzen

Um die Absickerung zu reduzieren, sind möglichst hohe Verdunstungsraten erwünscht. Hierzu ist auch eine kontinuierliche Wasserversorgung notwendig, da Pflanzen bei Wassermangel die Transpiration einschränken (müssen). Menge und Verfügbarkeit des Bodenwassers hängen auch von den Bodeneigenschaften ab.

In Abbildung 5 sind neben den Bodenwassergehalten im Wurzelraum in 50 und 85 cm Tiefe³ (als Mittel von jeweils vier Messpunkten) die wichtigsten Eckwerte des Bodenwasserhaushaltes eingetragen. Die Obergrenze der Wassergehaltskurven markiert die Feldkapazität, sie beträgt in den Testfeldern zwischen ca. 33 und 36 Vol-%. Als permanenter Welkepunkt (PWP) wird die unterste Grenze der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen bezeichnet, er liegt bei den Böden der Testfelder im Bereich von 12 Vol-%. Der Wasserverbrauch von Wäldern nimmt jedoch bereits ab, wenn die Bodenwassergehalte unter ca. 50 % der nutzbaren Feldkapazität absinken (AKS 1996). Bei dieser Marke beginnen Bäume, ihre Transpiration einzuschränken, um drohendem Wassermangel zu entgehen. Sie ist in Abbildung 5 als 50% nFK markiert.

³ Die Messstellen in 25 cm Tiefe trocknen im Sommer sehr schnell aus und sind deshalb der Übersichtlichkeit halber nicht eingezeichnet. Die Tiefenstufe 135 cm ist bislang für die Wasserversorgung der Vegetation von geringer Bedeutung.

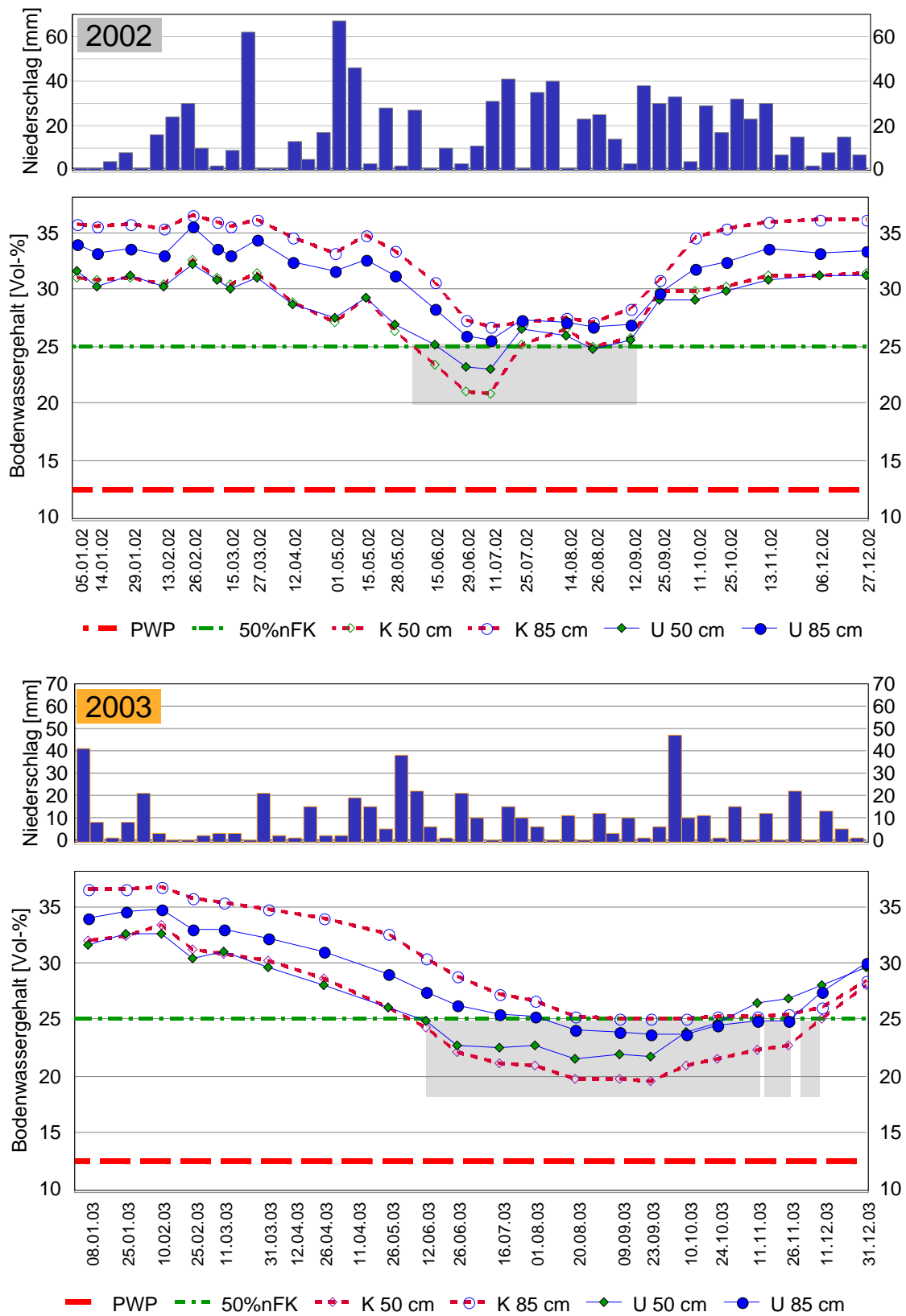


Abbildung 5: Vergleich 2002/2003: Niederschlag (Wochensummen) und Bodenwassergehalt in 50 und 85 cm Tiefe in den Feldern K und U, Abkürzungen siehe Text

Im niederschlagsreichen Jahr 2002 liegen die Wassergehalte die meiste Zeit im Bereich der Feldkapazität. Sie sinken nur zwischen Anfang Juni und Mitte September (ca. 100 Tage, in Abbildung 5 grau unterlegt) deutlich ab. Allerdings wird in beiden Lysimeterfeldern hierbei nur in 50 cm Bodentiefe für ca. 50 Tage die Marke 50%_{nFK} unterschritten, der Unterboden ist stets ausreichend mit Wasser versorgt.

Auch das Trockenjahr 2003 beginnt nach den ergiebigen Winterniederschlägen mit Bodenwassergehalten im Bereich der Sättigung, die jedoch bereits ab Ende Februar kontinuierlich zurückgehen. Anfang Juni unterschreiten die Wassergehalte in 50 cm Tiefe die 50%-_{nFK}-Marke, erst Mitte Dezember ist diese Tiefenstufe wieder gut mit Wasser versorgt. Es fällt auf, dass die Wiederbefeuchtung im K-Feld in 50 cm Tiefe, sehr viel länger dauert als im U-Feld (siehe hierzu auch Abbildung 6). Die Wassergehalte in 85 cm Tiefe sinken jedoch nur geringfügig unter die 50%-_{nFK}-Marke. Bis Jahresende 2003 wird die Wassersättigung des Boden bis zur Feldkapazität nicht mehr erreicht.

Wassergehalt der lagenweise verdichteten Rekultivierungsschicht im K-Feld

Im Zuge einer Aufgrabung im Sommer 2002 wurde ein Profil im K-Feld mit zehn Sonden zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes bestückt. Diese Sonden sind nicht in festgelegten Bodentiefen wie in den Routine-Messstellen, sondern gezielt in und zwischen Verdichtungszone angeordnet. Die Ergebnisse der Messungen für die zweite Jahreshälfte 2002 und 2003 sind in Abbildung 6 dargestellt.

Im feuchten Sommer 2002 (Abbildung 6, oben) weichen die Wassergehalte im Tiefenprofil nur um wenige Volumen-Prozent voneinander ab. Auffällig und charakteristisch für alle nicht tiefreichend durchwurzelten Böden sind höhere Wassergehalte im Unterboden. Ebenfalls charakteristisch für das Profil im K-Feld sind geringfügig höhere Wassergehalte in den verdichteten Zonen (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 lockeren 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 ca. 36 Vol-% überschritten. Der Wasserüberschuss kann aber nur langsam lateral abgeführt werden, zeitweise staunasse Bedingungen sind die Folge.

Der anhaltend trockene Sommer 2003 lässt die unterschiedlichen Eigenschaften der Schichten im Profil deutlicher zu Tage treten. Im Hauptwurzelraum (bis ca. 1 m Tiefe) sind die höchsten Wassergehalte in und unmittelbar über den Verdichtungszone vorhanden. Die geringer verdichtete Schicht ist im oberen Bereich (Messpunkte in 64 und 78 cm Tiefe) stark ausgetrocknet.

Hier steht den Pflanzen nur noch wenig Wasser zur Verfügung. Die Wiederbefeuchtung im Dezember ändert dies nur sehr langsam, sie konzentriert sich auf den Bereich in und über der ersten Verdichtungszone. Das Absickerungsverhalten des K-Feldes (siehe Abbildung 7) legt die Vermutung nahe, dass hier bereits auf der Sohle der ersten Verdichtungsschicht Wasser lateral aus der Rekultivierungsschicht abgeführt wird.

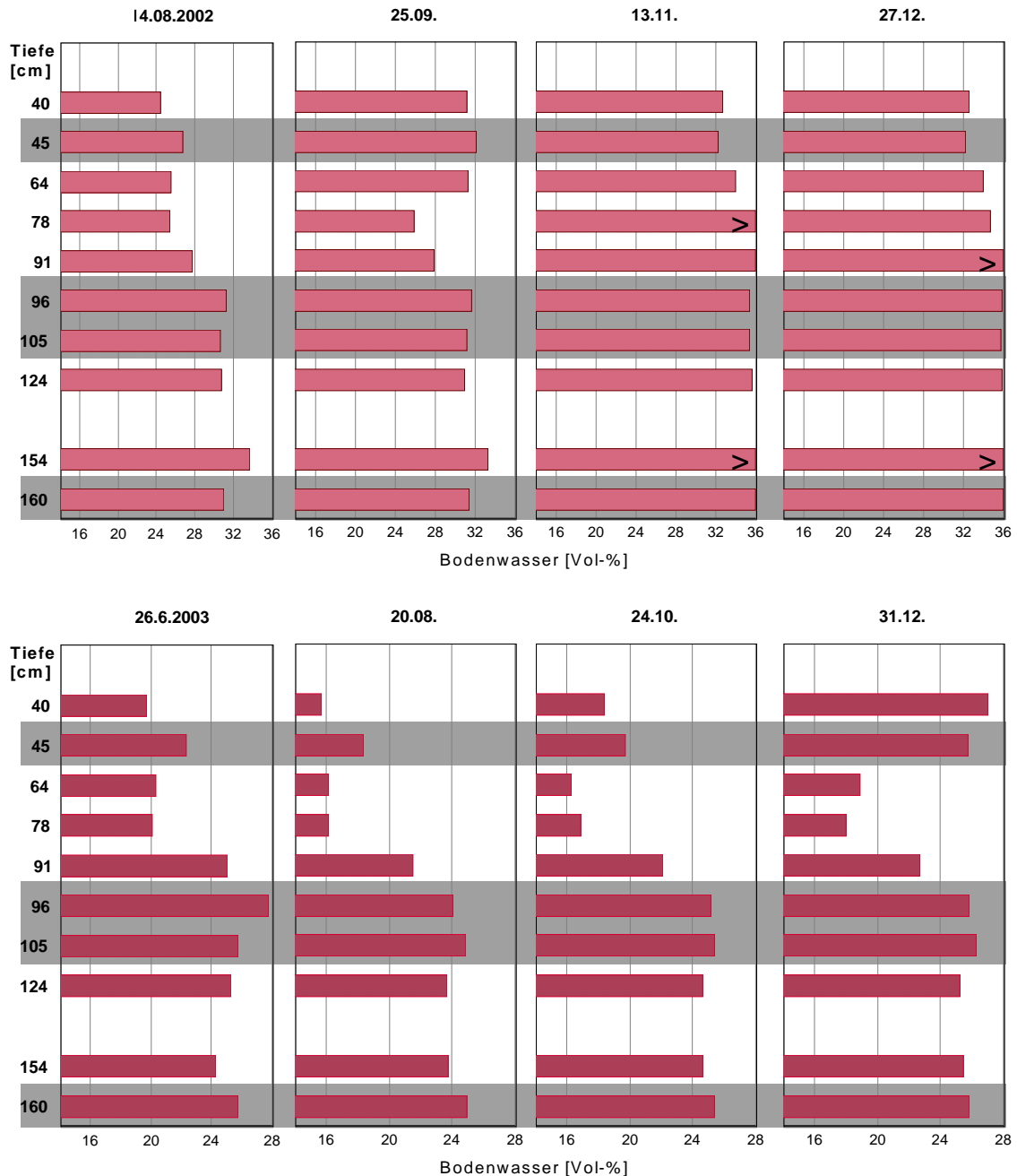


Abbildung 6: Bodenwassergehalte [Vol-%] in einem hoch auflösenden Messprofil in Testfeld K; grau unterlegt = Verdichtungszone, > = WG > 36 Vol-%

Absickerungsraten bei Wiederbefeuchtung im Herbst 2003

Die sommerliche Austrocknung der Rekultivierungsschicht führte zum Aussetzen der Absickerung. Bei der Wiederbefeuchtung des Bodens im Oktober 2003 sind die Absickerungsraten insgesamt niedrig (Abbildung 7, Tabelle 3), das Absickerungsverhalten der Lysimeterfelder unterscheidet sich vor allem quantitativ. In beiden Feldern steigt die Absickerung nach starken Niederschlägen mit einer Verzögerung von maximal einem Tag an (grüne Pfeile in Abbildung 7). Allerdings sind im K-Feld kurzfristig mehrfach höhere Absickerungen zu verzeichnen. Es ist anzunehmen, dass die zuvor beschriebene Wasserbewegung im Oberboden auf verdichteten Schichten hierfür verantwortlich ist. Dies führt dazu, dass im K-Feld bereits Wasser versickert, bevor der Bodenwasserspeicher aufgefüllt ist.

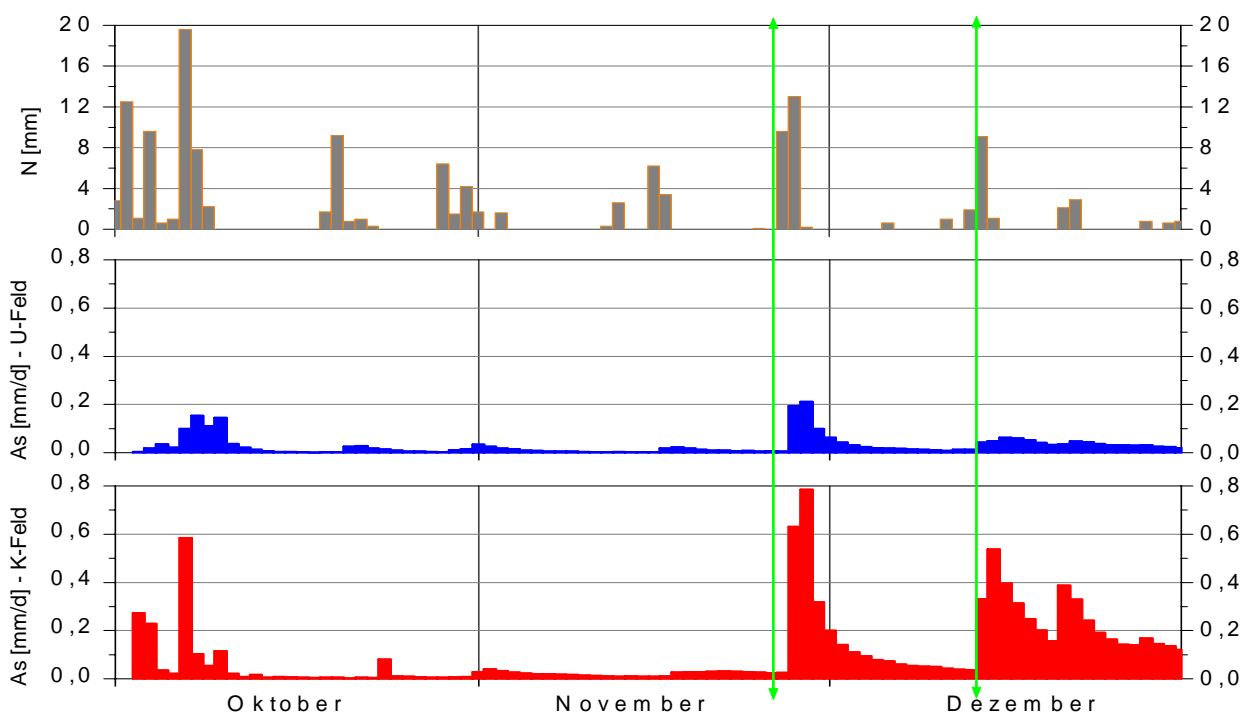


Abbildung 7: Tageswerte von Niederschlag (N) und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U (blau) und K (rot) vom 1.10. - 31.12.2003

Aus den Wasserhaushaltsbetrachtungen der Lysimeterfelder können folgende vorläufigen Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Eine optimierte Rekultivierungsschicht kann auch in extremen Trockenjahren die Wasserversorgung des Bewuchses sicherstellen, jedoch lässt auch ein sehr großer Bodenwasserspeicher hierbei keine uneingeschränkte Verdunstung zu.

- Der Vergleich der Wasserhaushaltsbilanzen der Jahre 2002 und 2003 mit den langjährigen Mittelwerten zeigt, dass diese Mittelwerte bei der Bilanzierung von konkreten Zeiträumen nur sehr beschränkte Aussagekraft besitzen. Das tatsächliche Witterungsgeschehen, z.B. die Niederschlagsverteilung, beeinflusst den Wasserhaushalt maßgeblich. Der Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen mit hoher zeitlicher Auflösung ist deshalb ratsam.
- Es sind Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern bei der Wassersättigung und dem Absickerungsverhalten zu erkennen. Deutliche Unterschiede bei der Absickerungsmenge sind jedoch erst mit der fortschreitenden Entwicklung der Gehölze zu erwarten.

Literatur

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

BÖNECKE, G. (1994): Forstwirtschaftliche Belange bei der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien, Schriftenreihe Angewandte Geologie (AGK) 34: 409 – 425, Karlsruhe

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

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

DGGT (2000) = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617 – 626

EHRMANN, O. (2003): Bodenleben, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [HRSG.] (2003): Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 32: 103 – 120, Freiburg

HAD (2002) = Hydrologischer Atlas von Deutschland, Hrsg. vom Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn

WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [HRSG.] (2003): Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 32, 184 S., Freiburg