

Forschungsbericht BWPLUS

Projekt

**Langzeituntersuchungen von Boden, Vegetation und
Wasserhaushalt von Deponie-Rekultivierungsschichten
(Leonberg 2005+)**

von

Peter Wattendorf, Otto Ehrmann & Werner Konold

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Professur für Landespflege

Förderkennzeichen: BWU 11003

Laufzeit: 1.01.2012 bis 31. 12.2014

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

Freiburg, November 2015

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorhaben	1
1.1.	Ausgangslage	1
1.2.	Ziele.....	2
1.3.	Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“	2
1.4.	Arbeitsprogramm	4
1.5.	Bedeutung von Langzeituntersuchungen in Leonberg.....	6
2.	Methoden.....	7
2.1.	Durchwurzelung	7
2.2.	Senkrecht-Fotos (Horizont-Fotos).....	8
2.3.	Nährstoffanalysen in Blättern.....	8
3.	Ergebnisse	9
3.1.	Bodenstruktur	9
3.1.1.	Entwicklung der Bodenstruktur	9
3.1.2.	Fazit Bodenstruktur	16
3.2.	Regenwurmpopulation	17
3.2.1.	Entwicklung der Population in den Testfeldern.....	17
3.2.2.	Mögliche Einflüsse durch Klimaveränderungen.....	18
3.2.3.	Spuren tiefgrabender Regenwürmer an der Bodenoberfläche	19
3.3.	Nährstoffgehalte des Oberbodens	20
3.4.	Durchwurzelung	21
3.4.1.	Profilbeprobungen 2001 bis 2013	21
3.4.2.	Wurzelbohrungen 2012	24
3.4.3.	Fazit Durchwurzelung	25
3.5.	Vegetationsentwicklung	26
3.5.1.	Gehölzwachstum	26
3.5.2.	Deckungsgrad und Blattflächenindex	29
3.5.3.	Nährstoffgehalte in Blättern	30
3.5.4.	Fazit Vegetationsentwicklung	31

3.6.	Wasserhaushalt der Lysimeterfelder	32
3.6.1.	Bodenwassergehalt	32
3.6.2.	Sickerwassermenge	36
3.6.3.	Fazit Wasserhaushalt	47
4.	Diskussion	49
4.1.	Erkenntnisse für die Praxis	49
4.2.	Bewertung der Wasserhaushaltsfunktion	51
4.3.	Herstellung zweilagiger Rekultivierungsschichten	53
5.	Zusammenfassung/Summary	55
6.	Literatur	59

1. Vorhaben

1.1. Ausgangslage

Seit einigen Jahren wird der Wasserhaushaltsfunktion von Rekultivierungsschichten im System der Oberflächenabdichtung von Deponien vermehrte Beachtung geschenkt. Dies ergibt sich allein aus der Berücksichtigung von Aspekten der Langzeitsicherung (z.B. WATTENDORF & SOKOLLEK 2003, STOCK 2014). Schon erste Betrachtungen der Bodeneigenschaften und des Wasserhaushalts (z.B. BRAUNS et al. 1997) und daraus abgeleitete Empfehlungen (z.B. DGGT 2000a) legten nahe, dem Erhalt günstiger Bodeneigenschaften besondere Aufmerksamkeit zu widmen, wenn möglichst viel Niederschlagswasser der Verdunstung zugeführt werden soll, um die Sickerwassermengen zu minimieren. Insbesondere soll der Boden gut durchwurzelbar sein und eine möglichst hohe nutzbare Wasserspeicherkapazität besitzen. Diese beiden Eigenschaften sind neben der Auswahl geeigneter Bodenarten vor allem durch eine möglichst geringe Bodenverdichtung beim Baubetrieb zu erreichen.

Aktuelle gesetzliche und technische Regelungen tragen dieser Entwicklung der Erkenntnisse Rechnung (STOCK 2014). Die Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts (DepV, 2009) differenziert zwischen der Rekultivierungsschicht und der funktionellen „Wasserhaushaltsschicht“, die als Abdichtungskomponente gelten kann, wenn sie definierte Anforderungen (s.u.) erfüllt. Die 2011 veröffentlichten Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards (BQS) der LAGA-Ad-hoc AG „Deponietechnik“ BQS 7-1 „Rekultivierungsschichten“ und BQS 7-2 „Wasserhaushaltsschichten“ konkretisieren diese Vorgaben und definieren fachliche Grundlagen zur Eignungsbewertung.

Die zulässige Sickerwassermenge aus einer Wasserhaushaltsschicht wurde auf höchstens 10 % des Jahresniederschlags und maximal 60 mm/a begrenzt. Es werden Untergrenzen der nutzbaren Feldkapazität für Rekultivierungsschicht von 140 mm (= l/m²) und Wasserhaushaltsschicht von 220 mm festgelegt. Um diese Vorgaben zu erreichen, müssen Bodenart und Bodendichte Mindestanforderungen erfüllen. Während bis vor einigen Jahren in der Deponiebaupraxis nur wenige Rekultivierungsschichten mit definierten hohen Qualitätsanforderungen - auf freiwilliger Basis - realisiert wurden (MAIER-HARTH 2005, WATTENDORF 2005), konnten in jüngerer Zeit hierzu weitere Erfahrungen gesammelt werden (MAIER-HARTH 2009) und wird dies in Zukunft aufgrund der genannten Vorgaben die Regel sein (siehe STOCK 2014).

Bereits im Jahr 2000 wurde in einem interdisziplinären Forschungsvorhaben (Projekte BWSD 99003, BWD 21010 und BWU 26004) aufbauend auf die ersten Erkenntnisse einer Übersichtsstudie (BRAUNS et al. 1997) auf dem Gelände der Kreismülldeponie Leonberg eine umfangreiche Versuchsanlage installiert (s. u.), um praxistaugliche, Boden schonende Einbauverfahren zu erproben sowie mögliche Vorteile unverdichteter Rekultivierungsschichten für die Standortentwicklung (Boden, Vegetation) und den Wasserhaushalt zu untersuchen und vor allem zu quantifizieren. Die in diesem Langzeitvorhaben gewonnenen Erkenntnisse konnten seitdem sowohl in einschlägige technische Empfehlungen (DGGT 2000/2010, DGGT 2006) als auch in die Bundeseinheitlichen Qualitätsstandards 7-1 und 7-2 eingebracht werden.

1.2. Ziele

Die Ziele vorangegangener Forschungsvorhaben waren, Rekultivierungsschichten mit definierten Eigenschaften im praxisnahen Versuchsbetrieb bodenschonend herzustellen (BWS 99003), den Wasserhaushalt dieser unterschiedlich hergestellten Rekultivierungsschichten zu untersuchen und Erkenntnisse zu gewinnen, wie das Einbauverfahren und die weitere Standortentwicklung (Boden, Vegetation) den Wasserhaushalt und damit die Funktion innerhalb des Systems der Oberflächenabdichtung beeinflussen (BWD 21010, BWU 26004).

Das Projekt BWU 11003 führt die Untersuchungen der oben genannten vorangegangenen Projekte mit einem gegenüber BWU 26004 teilweise noch weiter reduziertem Untersuchungsprogramm fort. Eine regelmäßige Kontrolle und Wartung der Lysimeteranlage ist jedoch notwendig, um den Betrieb auf lange Sicht zu gewährleisten.

1.3. Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“

Im Zuge zweier aufeinander aufbauender Forschungsvorhaben wurde auf dem Gelände der Kreismülldeponie Leonberg eine aufwändige Versuchsanlage installiert. Die Einrichtung dieser Anlage wurde vom Land Baden-Württemberg und dem Landkreis Böblingen gefördert.



Abbildung 1-1: Die Versuchsanlage auf der Kreismülldeponie Leonberg im Jahr 2009 (Luftbild von E. Hehl im Auftrag der Abfallwirtschaft Landkreis Böblingen)

Die Versuchsanlage der Leonberger Lysimeterfelder besteht im Wesentlichen aus zwei Großlysimetern (Abbildung 1-1, Tabelle 1-1) sowie einem Testfeld für Buschlagenbau. Der Aufbau der Lysimeterfelder entspricht einer Regel-Oberflächenabdichtung nach TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Auf dem als mineralische Abdichtung ausgeführten Auflager liegt eine verschweißte 2,5 mm starke Kunststoffdichtungsbahn. Sie wurde zur Begrenzung der Lysimeter-

felder über Randdämme hochgezogen, so dass zwei nebeneinander liegende geschlossene Wannen mit Sammeleinrichtungen für das Sickerwasser entstanden. In diese wurden im Herbst 2000 eine 30 cm starke mineralische Entwässerungsschicht und die beiden Versuchsvarianten der Rekultivierungsschicht eingebaut:

- „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ **Feld U**
Hier wurde der Boden mit einer leichten Raupe Hang abwärts 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.

In beide Lysimeterfelder wurde das gleiche Bodenmaterial (Lösslehm, toniger Schluff) eingebaut. Die Rekultivierungsschichten unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren und die daraus resultierenden Bodeneigenschaften (Tabelle 1-1). Die beiden Lysimeterfelder sind durch circa 2 m breite und mit HDPE-Folie belegte Rinnen seitlich begrenzt (siehe Abbildung 1-1), um einen lateralen Eintritt von Niederschlagswasser zu vermeiden.

Nach Abschluss der Bodenarbeiten wurden die Testfelder eingesät und überwiegend mit Aspen (*Populus tremula*) bepflanzt. Zur Ergänzung ausgefallener Aspen wurden in den Folgejahren weitere Baumarten eingebracht, vor allem Vogelkirsche (*Prunus avium*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*).

Tabelle 1-1: 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		[Vol-%]
Feldkapazität (Mittel)***	34 – 35,5	35,3 – 35,9	[Vol-%]
nutzbare Feldkapazität	ca. 22	ca. 23	[Vol-%]
* Es wurde in beiden Feldern kein humoser Oberboden (Mutterboden) aufgetragen.			
** Das U-Feld wurde 20 cm überhöht eingebaut. Durch Setzungen haben sich die Felder angeglichen.			
*** in Situ Messung			

Die Lysimeterfelder sind mit einer Reihe von Messeinrichtungen ausgerüstet: Die Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht der Lysimeterfelder werden in einer Messstation unterhalb der Versuchsanlage gesammelt und mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten registriert. Der Bodenwassergehalt der Rekultivierungsschicht kann an vier 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 Ver-

dichtungsgrades eingebaut wurden. Weitere Angaben zur Versuchsanlage finden sich in WATTENDORF et al. (2005).

In unmittelbarer Nähe der Lysimeterfelder wird seit März 2005 eine Wetterstation zur Messung von Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit betrieben.

1.4. Arbeitsprogramm

Das Projekt BWU 11003 führte ein im Vergleich zu den vorangegangenen Vorhaben reduziertes Untersuchungsprogramm fort. Es waren vor allem die nachfolgend beschriebenen wissenschaftliche Untersuchungen zur Fortschreibung der langjährigen laufenden Datenreihen sowie zusätzlich Wartungs- und bei Bedarf Reparaturarbeiten an der Versuchsanlage vorgesehen. Hierfür wurde das Vorhaben mit einer jährlichen Zuwendung in Höhe von circa 35.000 € gefördert. Es enthält folgende Untersuchungsschwerpunkte:

- **Kontinuierliche Messung der Sickerwassermengen aus der Rekultivierungsschicht**

Die Absickerung ist die wichtigste Vergleichsgröße zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Rekultivierungsschicht im Hinblick auf die Wasserhaushaltsfunktion (Wasserhaushaltsschicht, s.o.). Das Erfassen der Absickerung beinhaltet das Auslesen der Datenlogger, die Prüfung auf Vollständigkeit und Fehler sowie die Auswertung.

- **Dokumentation des lokalen Wettergeschehens**

Wetterdaten, vor allem des Niederschlags, gehen in die Wasserhaushaltsbilanz ein. In circa drei km Entfernung von den Versuchsfeldern steht eine Wetterstation, die von DWD und LTZ betrieben wird. Da Niederschläge mit einer hohen räumlichen Varianz auftreten, werden parallel dazu die lokalen Niederschlagsmengen am Testfeld erfasst. Hierzu wurde 2005 aus Eigenmitteln des Betreibers eine Wetterstation eingerichtet, die es erlaubt, den Niederschlag vor Ort und darüber hinaus mit höherer zeitlicher Auflösung zu messen.

- **Messungen der Bodenwassergehalte und der Stauwasserstände**

Bodenwassergehalte in unterschiedlichen Tiefenstufen sind zur Interpretation des Verhaltens der Lysimeterfelder sowie als Vergleichsdaten zur Validierung der Wasserhaushaltsmodelle notwendig. Stauwasser in der Rekultivierungsschicht ist ungünstig, weil es die Bodenbelüftung hemmt und die Standsicherheit des Bodens an Böschungen nachteilig beeinflussen kann.

- **Dokumentation der Bodenstruktur**

Durch die Umlagerung wurde die Struktur des Bodens der Rekultivierungsschichten weitgehend zerstört. Im Lauf der Zeit bildet sich eine neue Struktur aus. Dies geschieht abiotisch durch Setzungen, Frost sowie Quellen und Schrumpfen des Bodens und biotisch

durch Wurzeln und Bodentiere, vor allem Regenwürmer. Diese Strukturbildung wird mit unterschiedlichen Methoden dokumentiert.

- **Dokumentation der Entwicklung der Regenwurmpopulation**

Regenwürmer beeinflussen die Entwicklung der Bodenstruktur maßgeblich, deshalb muss die unterschiedliche Besiedlung und Populationsentwicklung in den Testfeldern dokumentiert werden. Bisher gibt es sehr wenig Literatur zur Entwicklung dieser für Nährstoffumsatz und Bodenstruktur so wichtigen Organismen auf rekultivierten Deponien. Durch die Bodenumlagerung und den Einbau der Rekultivierungssubstrate wurde die im Boden enthaltene Regenwurmpopulation so stark geschädigt, dass im Frühjahr 2001, ein halbes Jahr nach Erstellung der Anlage, keine Regenwürmer mehr zu finden waren. Um die Besiedlung der Lysimeterfelder zu beschleunigen, wurden gezielt Regenwürmer in die Flächen eingebracht. Dies war erfolgreich (siehe EHRMANN 2005). Die Populationsentwicklung ist jedoch noch nicht abgeschlossen und wird daher weiter untersucht.

- **Dokumentation der Vegetationsentwicklung**

Die Vegetation wirkt durch ihren Wasserverbrauch direkt auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten. Morphologische und strukturelle Merkmale (z. B. Blattfläche), Art des Bewuchses, Vitalität oder Durchwurzelungsintensität und -tiefe beeinflussen die Verdunstungsleistung. Andererseits haben die Versuche gezeigt, dass die Vitalität und die Entwicklung der Gehölze auch unterschiedliche Standorteigenschaften widerspiegeln. Deshalb werden der Zustand und die Entwicklung der Gehölze erfasst.

Im Jahr 2012 wurden neben den regelmäßigen Zuwachsmessungen auch die Nährstoffversorgung der Gehölze durch Blattanalysen untersucht und bewertet sowie Deckungsgrade und Blattflächenindices der Gehölzbestände mit Hilfe von Senkrechtfotos ausgewertet.

- **Wartung der Lysimeteranlage**

Regelmäßige Wartung und Kontrolle ist notwendig, um Funktionsstörungen der Messeinrichtungen soweit möglich zu vermeiden oder zeitnah zu beheben. Bei Bedarf werden Reparaturen durchgeführt, um den Betrieb der Lysimeteranlage und der Wetterstation auf lange Sicht zu gewährleisten.

1.5. Bedeutung von Langzeituntersuchungen in Leonberg

Aus folgenden Gründen ist Langzeitforschung an der Leonberger Lysimeteranlage sinnvoll:

- Der Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten ist sowohl von den klimatischen Rahmenbedingungen als auch von den sehr variablen Faktoren Witterung und aktuelles Wettergeschehen abhängig (siehe 3.6.2.2). Wasserhaushaltsbetrachtungen müssen die gesamte Bandbreite dieser Variabilität erfassen, um wertvolle und auf andere Standorte übertragbare Ergebnisse zu liefern. Die Ereignisse des Jahres 2013 belegen diese Aussage eindrücklich. Dies gilt darüber hinaus auch im Hinblick auf die sich möglicherweise verändernden klimatischen Bedingungen. Hierzu sind langjährige kontinuierliche Messreihen erforderlich.
- Zur Validierung von Wasserhaushaltsmodellen sind langjährige Vergleichsdaten mit möglichst unterschiedlichen Witterungsbedingungen notwendig.
- Die bedeutendste Messperiode im Hinblick auf die Bewertung des Wirkungsgrades der Rekultivierungsschichten begann erst nach der Entwicklung der Gehölzpflanzung zum weitgehend geschlossenen Baumbestand. Dies war, wie erwartet, bei einem Bestandesalter von circa zehn Jahren der Fall. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wirkung des Umbaus des vorhandenen Bestandes aus Vorwaldbäumen in einen dauerhaften Zielbestand.
- Es werden grundlegende bodengenetische Erkenntnisse über die Entwicklung umgelagerter Substrate, insbesondere hinsichtlich der Bodenstruktur, gewonnen.
- Die Entwicklung des Bodenlebens und der Vegetation beeinflusst die Standortbedingungen und somit auch den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten. Die Untersuchung dieser Entwicklung auf den neu geschaffenen Standorten liefert weitere Grundlagen zum Verständnis des Wasserhaushalts, die auch für zukünftige Rekultivierungen genutzt werden können. Außerdem bietet sich in Leonberg die seltene Gelegenheit, diese Prozesse vom „Nullpunkt“ der Sukzession an im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt zu betrachten.

2. Methoden

Es wird im folgenden Abschnitt nur auf solche Methoden eingegangen, die im Zeitraum 2012 bis 2014 in Leonberg erstmals angewendet wurden und in den Berichten zu den vorangegangenen Vorhaben (WATTENDORF et al. 2005, WATTENDORF et al. 2012) noch nicht beschrieben sind.

2.1. Durchwurzelung

Im Frühsommer 2012 wurden ergänzend zu den sonst üblichen Wurzeluntersuchungen in Profilgruben mit einem sogenannten Murachschen Wurzelbohrer Bohrkerne gewonnen (Abbildung 2-1) und auf die Durchwurzelung untersucht. Hierzu wurden an fünf Probestellen je Lysimeterfeld Bohrkerne von 8 cm Durchmesser und jeweils 15 cm Länge bis in eine Tiefe von 90 cm entnommen und auf Wurzeln untersucht. Bei jeder Bohrung wurden 6 Bohrkerne entnommen, um die Tiefe von 90 cm zu erreichen.

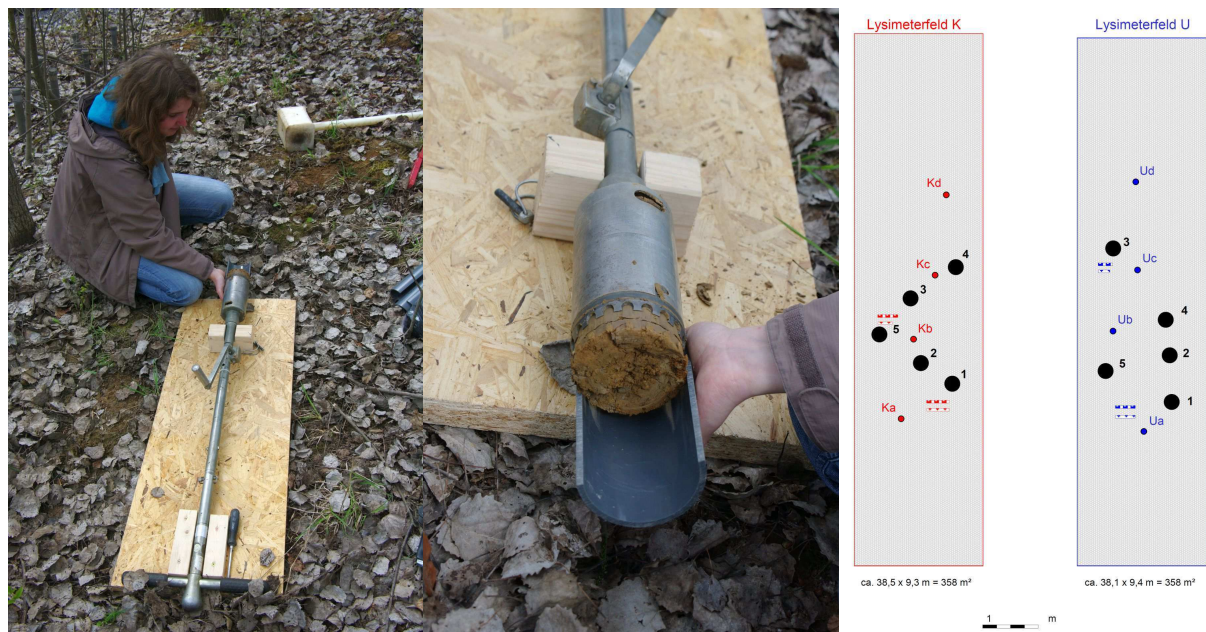


Abbildung 2-1: links und Mitte: Probenahme mit dem Murachschen Wurzelbohrer, rechts: Lage der sechs Probestellen in den Lysimeterfeldern

Jeder Bohrkern wurde sofort nach der Probenahme längs halbiert, eine der Schnittflächen wurde präpariert, um die Wurzeln besser sichtbar zu machen und anschließend fotografiert. Auf diese Weise konnten die angeschnittenen Wurzeln am Bildschirm ausgezählt und mit einem Bildverarbeitungsprogramm markiert werden (siehe Beispiel in Abbildung 2-2).

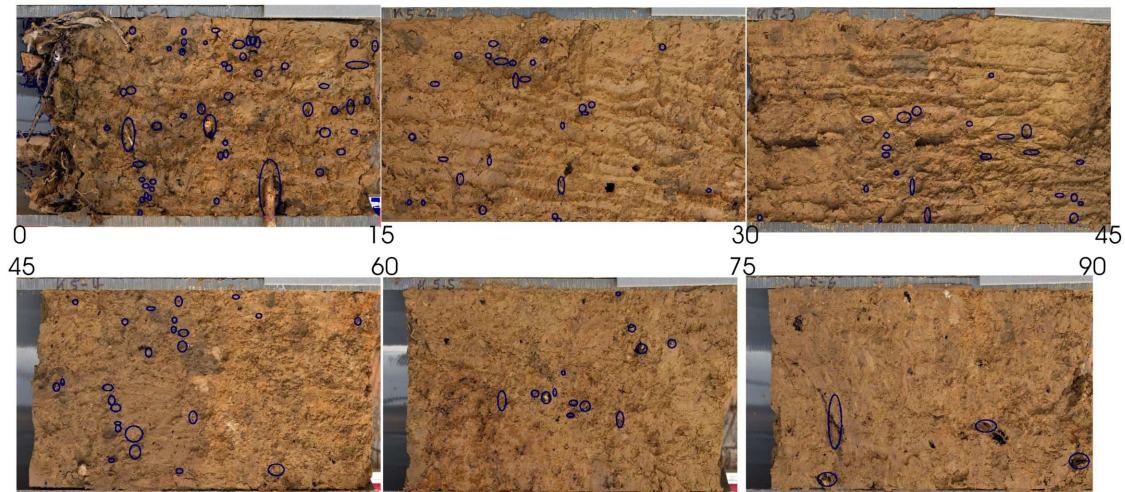


Abbildung 2-2: Beispiel einer Serie von sechs Bohrkernen von 0 bis 90 cm Tiefe (Probestelle K 5) mit Markierungen der Wurzeln

2.2. Senkrecht-Fotos (Horizont-Fotos)

Zur Bestimmung von Deckungsgrad und Blattflächenindex der Gehölzbestände auf den Lysimeterfeldern wurden im Juni 2012 mit einem Circular-Fisheye-Objektiv an jeweils 5 Stellen in jedem Testfeld Senkrechtfotos der Gehölzschicht angefertigt (siehe Abbildung 3-16).

Diese Fotos wurden mit der Software Gap Light Analyzer Ver. 2.0 (FRAZER et al. 1999, PROMIS et al. 2011) ausgewertet. Im Fall der Leonberger Lysimeterfelder wurden die Bildränder bei der Auswertung ignoriert, da aufgrund der Hanglage an den Rändern auch die Bodenoberfläche abgebildet wird.

2.3. Nährstoffanalysen in Blättern

Im September 2012 wurden von folgenden Baum-Kollektiven

- Zitterpappeln starkwüchsig
- Zitterpappeln schwächer wüchsig
- Bergahorne

in beiden Testfeldern Blätter als Mischproben von jeweils mehreren Bäumen genommen - pro Testfeld für jedes Kollektiv circa 100 g frische Blattmasse. Die Blattproben wurden im Labor der Abteilung Boden und Umwelt der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg getrocknet, gemahlen und die Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen analysiert.

3. Ergebnisse

3.1. Bodenstruktur

3.1.1. Entwicklung der Bodenstruktur

Die Rekultivierungsschicht der Leonberger Lysimeterfelder wurde aus Löss-Unterbodenmaterial hergestellt (siehe Tabelle 1-1). Dieses Bodenmaterial ist für Rekultivierungszwecke geeignet (z.B. nach BQS 7-1: Kategorie B). Lössböden gehören zu den fruchtbarsten Böden und Lösslehme sind im mittleren Neckarraum das beste verfügbare Material für Rekultivierungen. Die Bodenumlagerung beeinflusst das bestehende Bodengefüge grundlegend:

- a) Das natürlich gewachsene Bodengefüge wird weitgehend zerstört. Lössböden weisen ein ausgeprägtes Sekundärgefüge auf, zu dem in der Regel auch mehrere Hundert große Regenwurmröhren pro Quadratmeter im Unterboden gehören. Diese großen Poren durchziehen oft den Boden über weite Strecken und sind wichtige Wege für Wasser- und Lufttransport sowie Wurzeln und Tiere. Durch die Bodenumlagerung werden diese Poren teilweise zerstört und vor allem wird ihre Kontinuität unterbrochen.
- b) Ungeschützter Löss ist sehr erosionsempfindlich. Durch eine Pflanzendecke, die Lebendverbauung mit organischer Substanz und eine gute Drainage (Regenwurmröhren) kann die Erosionsempfindlichkeit stark vermindert werden.

Seit der Herstellung der Rekultivierungsschicht der Leonberger Lysimeterfelder im Herbst 2000 haben sich die Bodeneigenschaften des Lösslehm-Materials deutlich verändert. Diese Veränderungen sind jedoch in unterschiedlichen Tiefen und in U- und K-Feld nicht gleich verlaufen. Sie werden im Folgenden anhand der mikromorphologischen Dünnschliffe¹ (Bilder 1 - 8) und der Ergebnisse von Messungen 2013 beschrieben:

1. Nahe der Bodenoberfläche wurden die beim Bodeneinbau entstandenen Verdichtungen vollständig aufgelöst (Bilder 1 - 3). Die oberste Schicht (0 - 10 cm) weist ein sehr lockeres Bodengefüge auf, was hauptsächlich eine Folge der Regenwurmtätigkeit ist. Die Regenwurmpopulation war nach dem Einbringen auf sehr hohe Werte angestiegen; mittlerweile hat sich allerdings die Biomasse der Regenwürmer als Folge von Wassermangel im Jahr 2011 deutlich verringert (WATTENDORF et al. 2013). In beiden Feldern prägen aber immer noch Regenwurmlösungen und -röhren die Oberbodenstruktur, so dass ein sehr günstiges Bodengefüge mit niedrigen Eindringwiderständen (Abbildung 3-1) entstanden ist.
2. Ab einer Tiefe von circa 10 cm ist der Einfluss der Regenwürmer deutlich geringer; es sind kaum noch Spuren ihrer Aktivitäten zu finden. In beiden Feldern ist der Boden dichter und Bodenverdichtungen sind noch teilweise erhalten (Bilder 5 und 6). Die Eindringwiderstände sind bereits unterhalb circa 20 cm etwas höher (Abbildung 3-1). Die Trockenraumdichten in 15 – 20 cm Tiefe sind mit 1,38 g/cm³ in Feld K und 1,36 g/cm³ in Feld U gerade noch als *gering* (bis 1,4 g/cm³ nach AG Boden 2005) zu bewerten. Im

¹ Aus Platzgründen werden nur Fotos von Bodendünnschliffen aus drei Tiefen gezeigt. Die Proben wurden mit Ausnahme der Bilder 4 und 8 im Sommer 2013 entnommen.

lagenweise verdichteten Boden des K-Feldes ist die erste verdichtete Schicht noch deutlich zu erkennen (20 – 40 cm Tiefe); sie wurde innerhalb der 13 Jahre seit dem Bodeneinbau weder durch Bioturbation noch durch Quellen und Schrumpfen oder Frost - trotz einiger kalter Winter und trockener Sommer - aufgelöst.

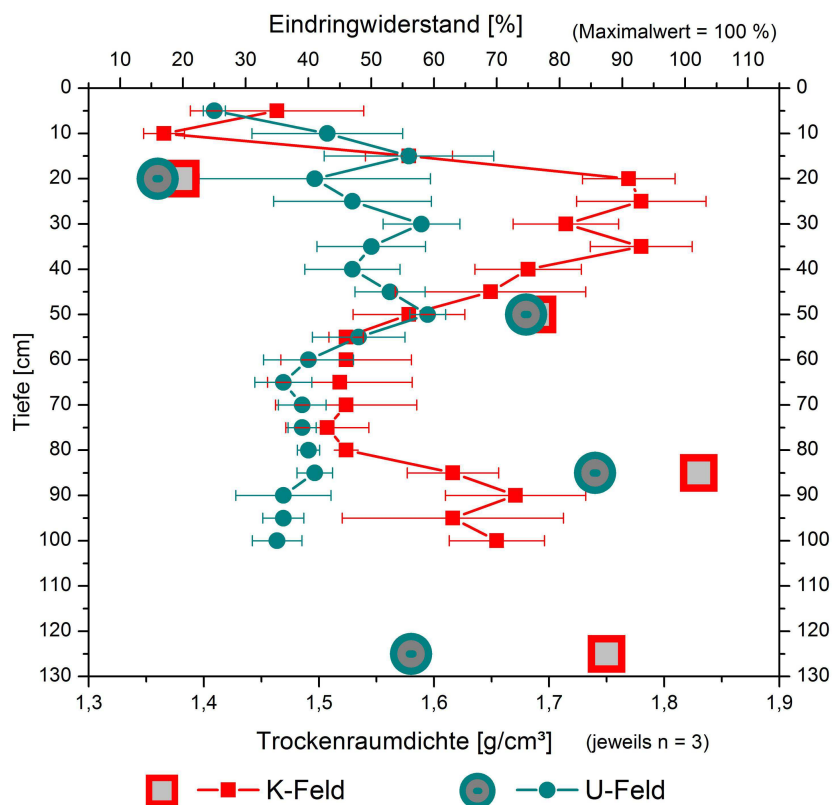


Abbildung 3-1: Eindringwiderstand² und Trockenraumdichte in je einem Bodenprofil des K- und des U-Feldes (Beprobung: Juli 2013); die Penetrometermessungen differenzieren deutlicher zwischen den Feldern als die Messungen der Trockenraumdichte.

² Messung mit einem Penetrometer mit 5 Wiederholungen/Tiefenstufe; Relativwerte, der größte gemessene Einzelwert entspricht 100 %

Besonderheiten sind teilweise markiert: F= Eisenkonkretion, H= Hornmilbenlosung, M = Mesofaunalosung, P= Pflanzenrest, rr= Regenwurmhöhle, R= Regenwurmlosung, S= Schneckenschale, W = Wurzel

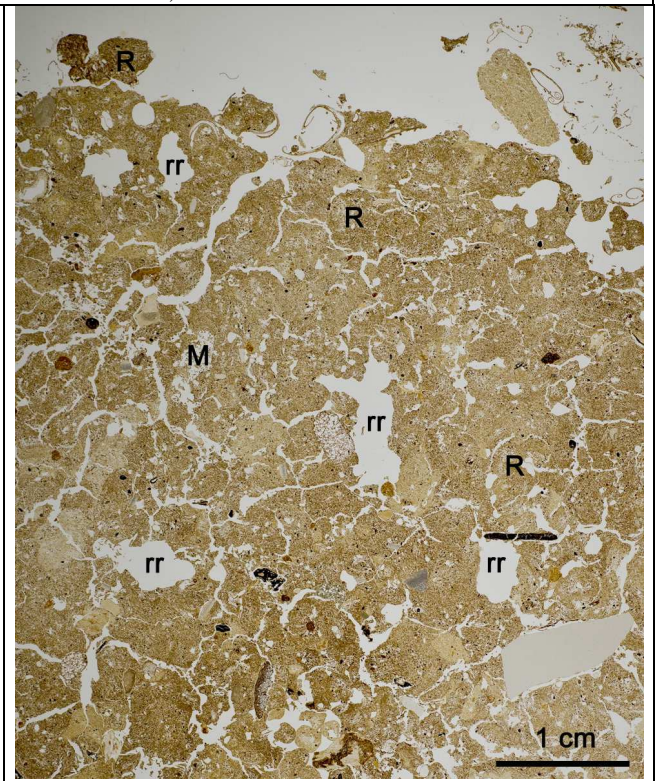
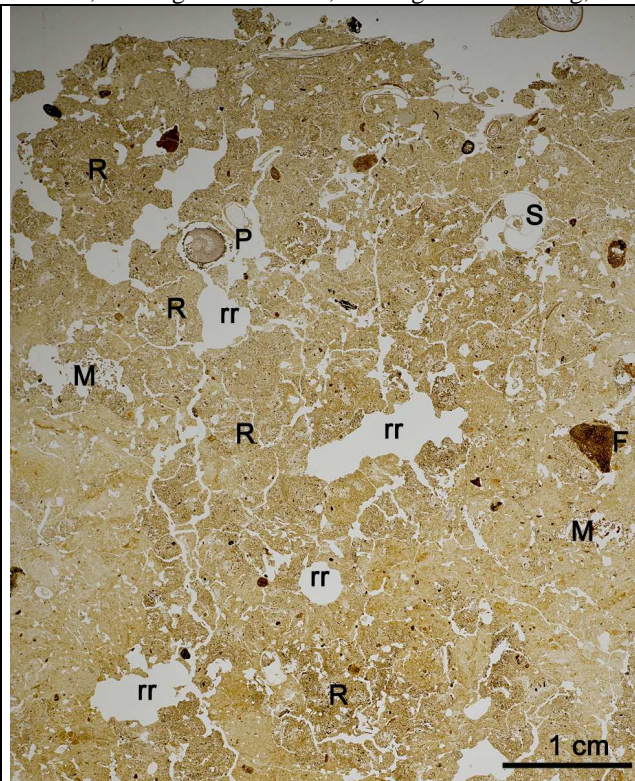


Bild 1 (links): K-Feld, Bild 2 (rechts): U-Feld (beide 0-6 cm Tiefe): Die Dünnschliffe aus dem obersten Horizont von K- und U-Feld sind sehr ähnlich. Es finden sich keine Verdichtungen mehr. Die vielen Regenwurmlosungen (z.T. mit R markiert), einige Regenwurmhöhlen (rr) und Losungen der Mesofauna (M) weisen auf eine hohe Bioturbation hin.

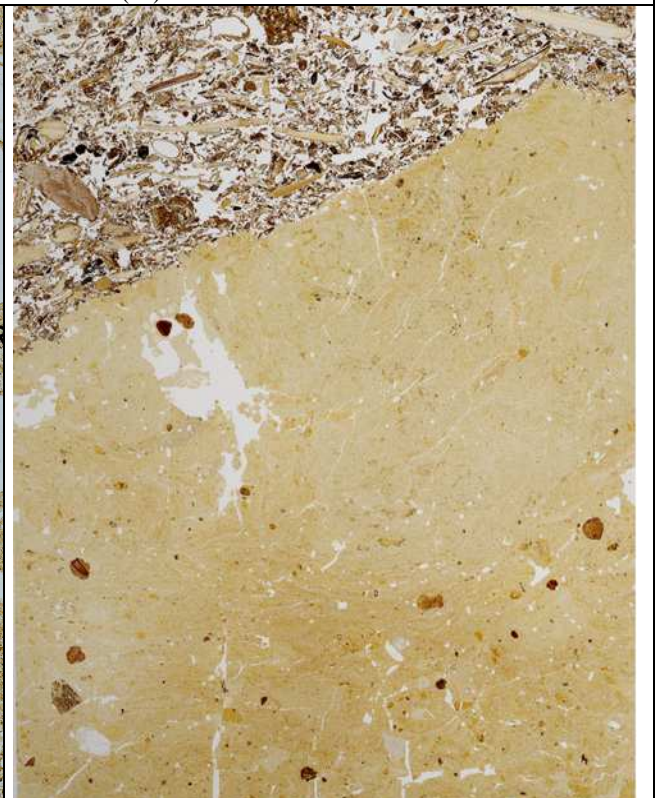
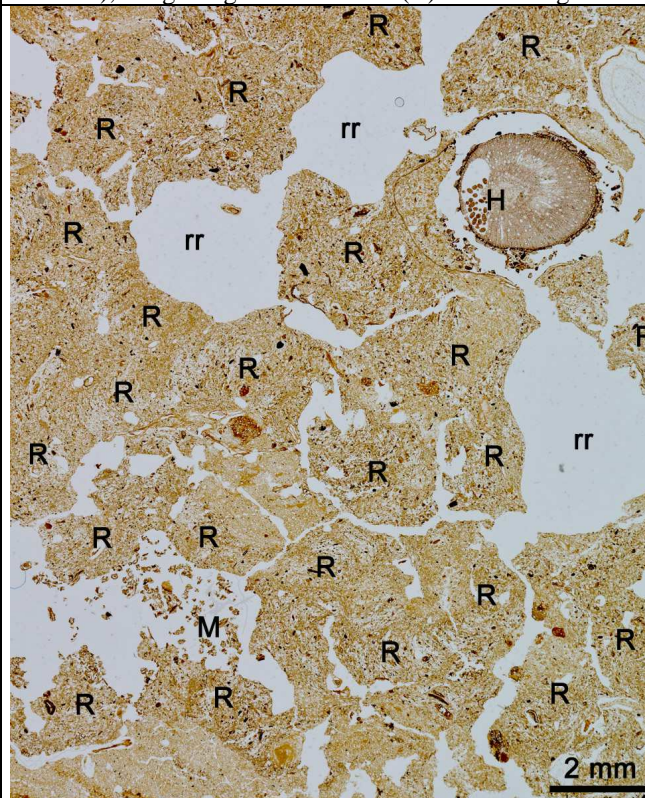
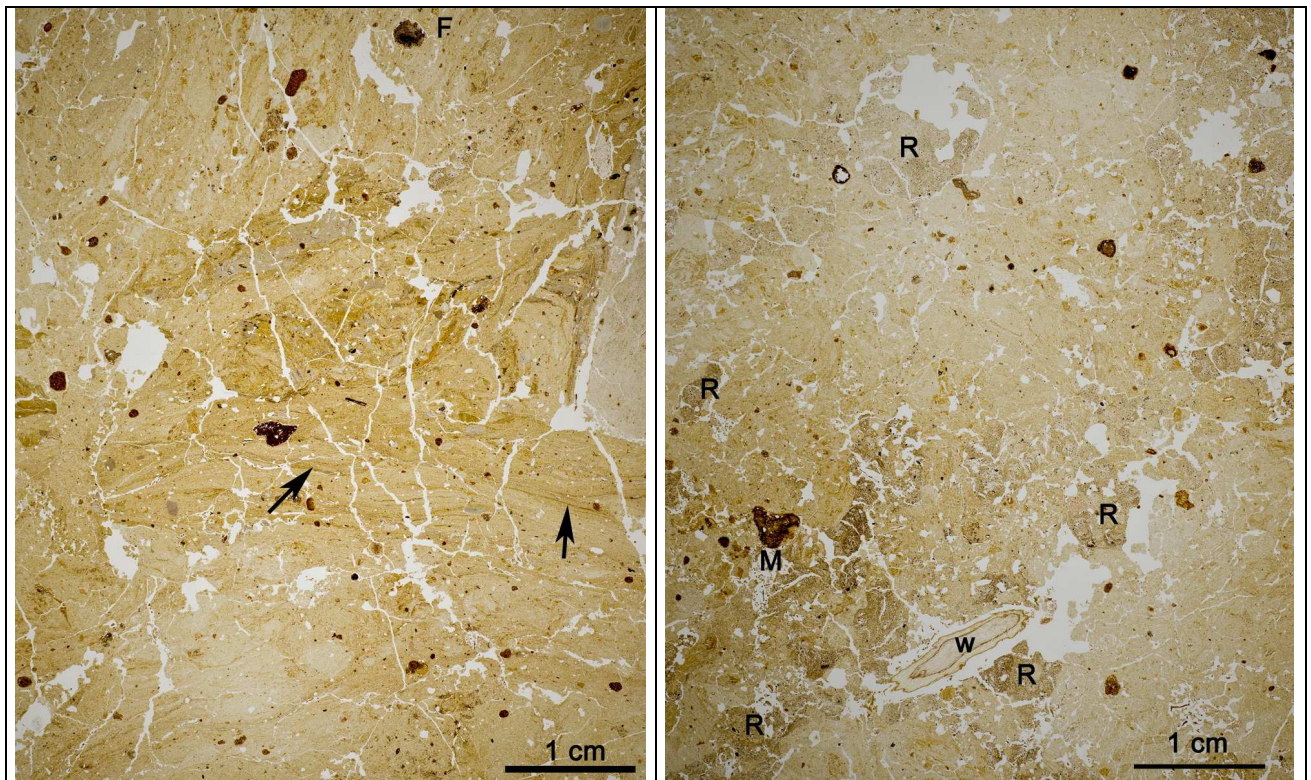


Bild 3: Detail K-Feld (1-3 cm Tiefe); es wurden alle Regenwurmspuren markiert. Das Gefüge wird von Losungen und Röhren der Regenwürmer dominiert. Im Pflanzenrest befinden sich Hornmilbenlosungen (H) und Mesofaunalosung (M)

Bild 4: U-Feld (0-6 cm Tiefe) im Jahr 2001. Auf dem Mineralboden liegt noch der zuvor aufgebrachte Kompost. Der Boden ist viel dichter und humusärmer (= heller) als im Jahre 2013.



In 10-16 cm Tiefe ist das Gefüge deutlich anders als nahe der Oberfläche. Im K-Feld (Bild 5, links) finden sich weder Regenwurmröhren noch -lösungen, einige Bereiche sind noch deutlich verdichtet (Pfeile). Im U-Feld (Bild 6, rechts) finden sich nur vereinzelt Lösungen oder Röhren von Regenwürmern.

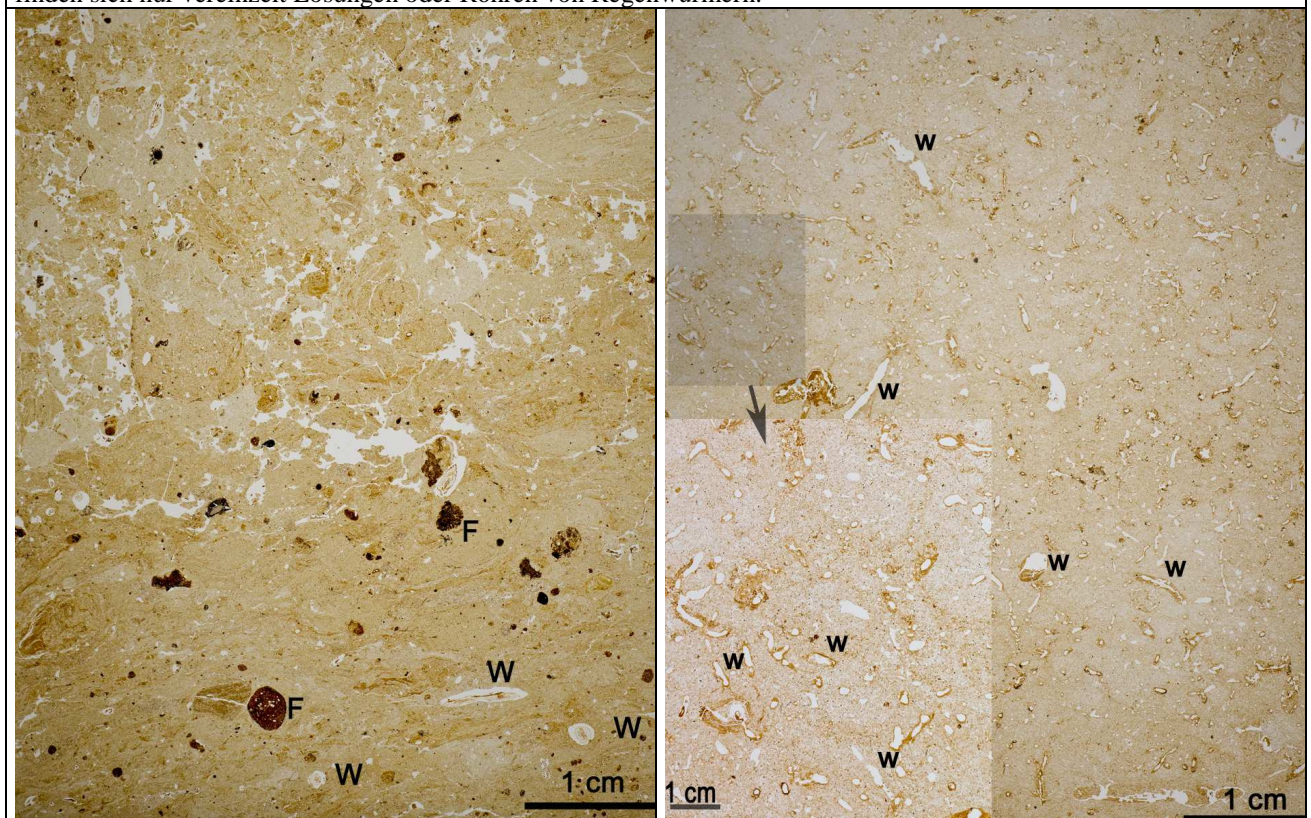


Bild 7: K-Feld (87-93 cm Tiefe); zeigt unten eine verdichtete Zone, darüber einen relativ lockeren Bereich. Die Hohlräume sind beim Bodeneinbau entstanden und im Gegensatz zu den Hohlräumen in Bild 8 daher nicht kontinuierlich. In die dichte Schicht konnten einige Wurzeln (W) einwachsen.

Bild 8: Zum Vergleich natürlich gelagerter Löss-Unterboden (Nordwürttemberg, 110-116 cm Tiefe). Links unten ist ein Ausschnitt vergrößert. Das Gefüge wird von sehr vielen kleinen Wurzelröhren dominiert (einige mit W markiert).

3. Im mittleren Unterboden (Tiefe unterhalb circa 50 cm) sind die Eindringwiderstände in beiden Felder wieder geringer (Abbildung 3-1). Im U-Feld wurde vor allem die Bodenoberfläche beim Einbau in einem Zug befahren und damit die tieferen Bereiche geschont, im K-Feld liegt ein Bereich geringerer Verdichtung zwischen der ersten und zweiten verdichteten Schicht. Die Trockenraumdichten sind *mittel* ($1,4 - 1,59 \text{ g/cm}^3$) bis *hoch* ($>1,6 \text{ g/cm}^3$, nach AG BODEN) und haben sich seit dem Bodeneinbau kaum verändert (siehe Abbildung 3-2). In Feld U liegen sie, mit einer Ausnahme im Jahr 2008 (8a), aber insgesamt niedriger. In den Dünnschliffen dieser Tiefenstufe wurden vereinzelt Wurzeln, aber nur sehr wenige Spuren von Regenwürmern und anderen Bodentieren gefunden (Flächenanteile $<1 \%$).

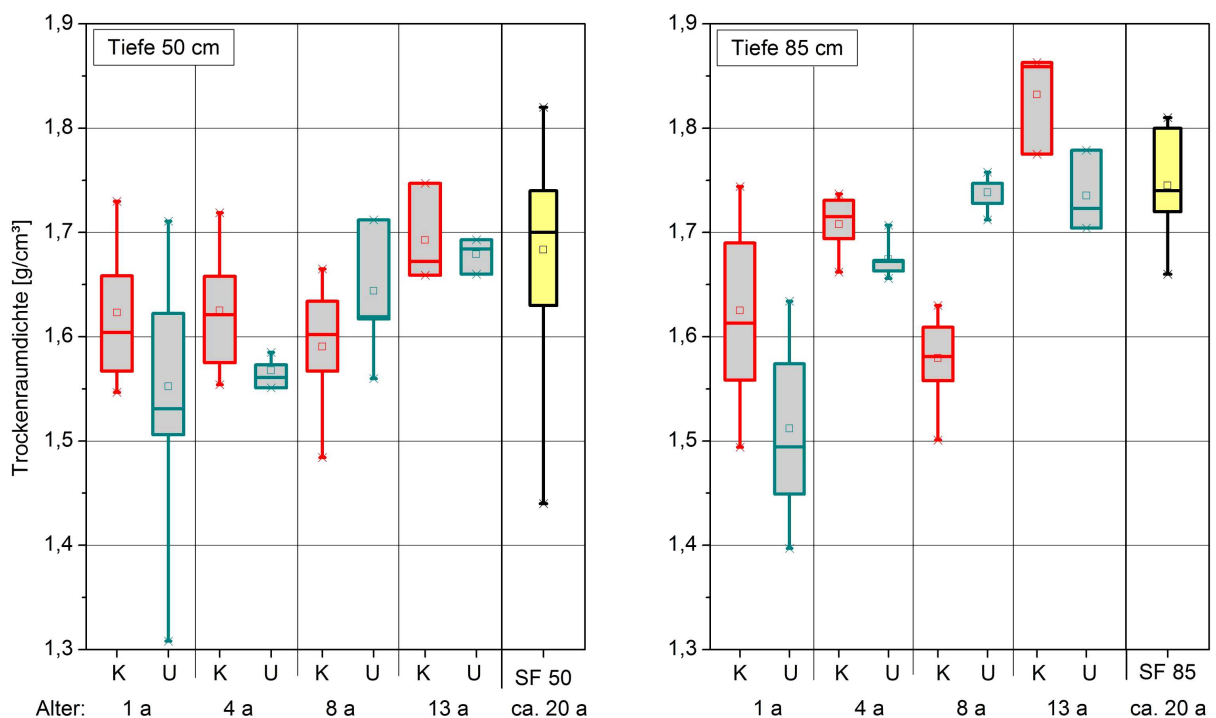


Abbildung 3-2: Trockenraumdichte (50 und 85 cm Tiefe) der Rekultivierungsschicht in den Leonberger Testfeldern U und K seit Beginn der Beprobungen sowie einer circa 20 Jahre alten Rekultivierungsschicht der Deponie Sindelfingen; Anzahl der Profile: Leonberg: 1 a (2001) = 4, sonst jeweils = 1 Profil; Sindelfingen (SF 20a) = 6 Profile

Im tieferen Unterboden (Bild 7), ab circa 85 cm Tiefe, nehmen die Eindringwiderstände und die Trockenraumdichte des Bodens im K-Feld wieder deutlich zu (Abbildung 3-1), dort liegt die zweite verdichtete Schicht. Insgesamt gesehen haben die Trockenraumdichten im Laufe der Jahre in beiden Feldern eher zugenommen (Abbildung 3-2). Die Ursache sind vermutlich Setzungen als Folge der in dieser Tiefe größeren Bodenauflast. Im U-Feld sind die Trockenraumdichten, auch hier mit der Ausnahme im Jahr 2008, aber insgesamt niedriger. Trotz dieser Setzungen zeigen sich in den Dünnschliffen in dieser Tiefe nicht nur dichtere, sondern auch lockere Zonen. Hierdurch besitzt der rekultivierte Unterboden zwar Hohlräume, diese sind jedoch fast immer aufgrund ihrer Genese beim Bodeneinbau nicht kontinuierlich. Ein natürlich gelagerter Löss (Bild 8) weist in dieser

Tiefe sehr viele Wurzelröhren auf, die aufgrund ihrer Kontinuität für eine gute Bodenbelüftung sorgen. Der Einfluss der Hohlräume im künstlich aufgetragenen Boden auf die Belüftung muss demnach deutlich geringer bleiben. Spuren von Bioturbation sind in dieser Tiefe in beiden Feldern sehr selten.

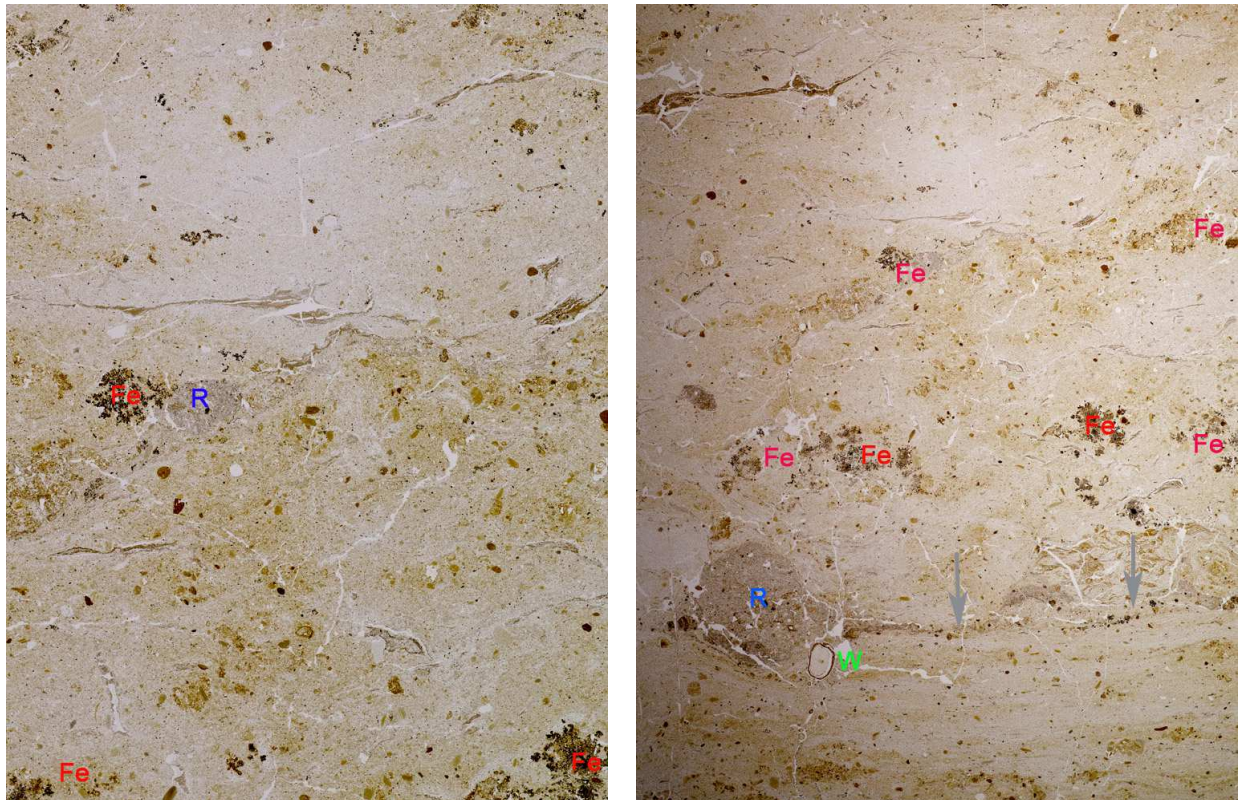


Abbildung 3-3: Dünnschliffe eines älteren Rekultivierungsbodens auf der Deponie Sindelfingen in 40 cm (links) und 70 cm Tiefe (rechts); die Bildbreite beträgt jeweils 50 mm. In 70 cm Tiefe wurden besonders ungünstige horizontale Verdichtungen gefunden (Pfeile). **R** = Regenwurmlosungen, **Fe** = Eisenoxidakkumulation, **W** = Wurzel.

Um die Frage zu beantworten, ob sich solche Verdichtungen in absehbarer Zeit auflösen, wurde zum einen der Boden einer älteren Rekultivierungsfläche in der Nähe der Deponie Leonberg untersucht. Weiterhin wurden Dünnschliffe von 41 Unterbodenhorizonten aus baden-württembergischen Wäldern auf das Vorkommen von Bioturbation geprüft.

1. Der Boden einer zum Zeitpunkt der Probenahme mindestens 20 Jahre alten Rekultivierungsfläche auf der Deponie Sindelfingen zeigte in den obersten 30 cm praktisch keine Verdichtungen mehr (Abbildung 3-4). Unterhalb dieser Tiefe wurden Trockenraum-dichten zwischen 1,6 und 1,8 g/cm³ gemessen, was typischen Werten unmittelbar nach dem konventionellen Einbau einer Rekultivierungsschicht entspricht. Die Dünnschliffe in Abbildung 3-3 aus einem Bodenprofil zeigen, dass der Boden sowohl in 40 als auch in 70 cm Tiefe noch sehr dicht ist und wenig Spuren von Bioturbation aufweist. Das Vorkommen von Eisenoxidakkumulationen weist auf Sauerstoffmangel hin.

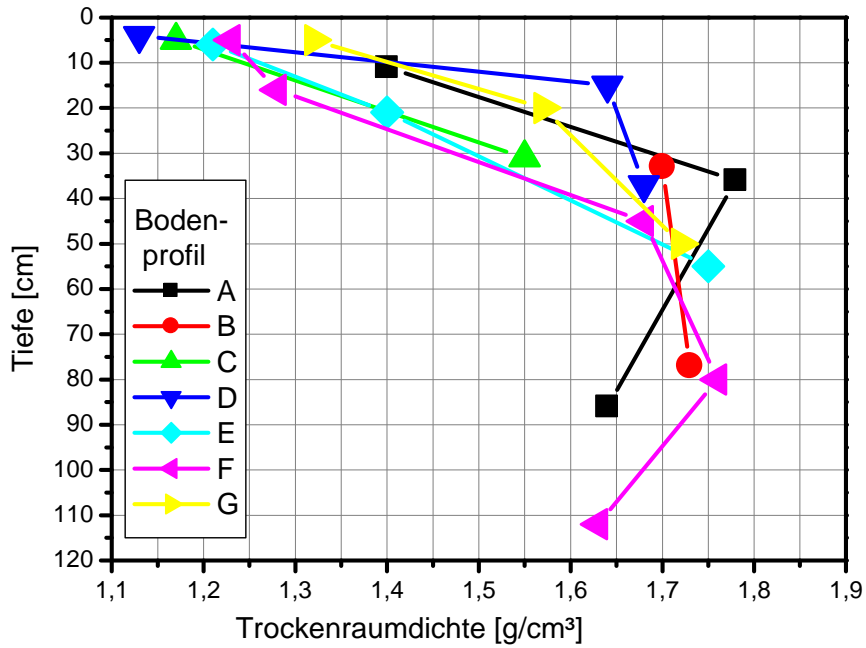


Abbildung 3-4: Trockenraumdichten von sieben Bodenprofilen in der über 20 Jahre alten Rekultivierungsfläche auf der Deponie Sindelfingen (EHRMANN & WATTENDORF 2012).

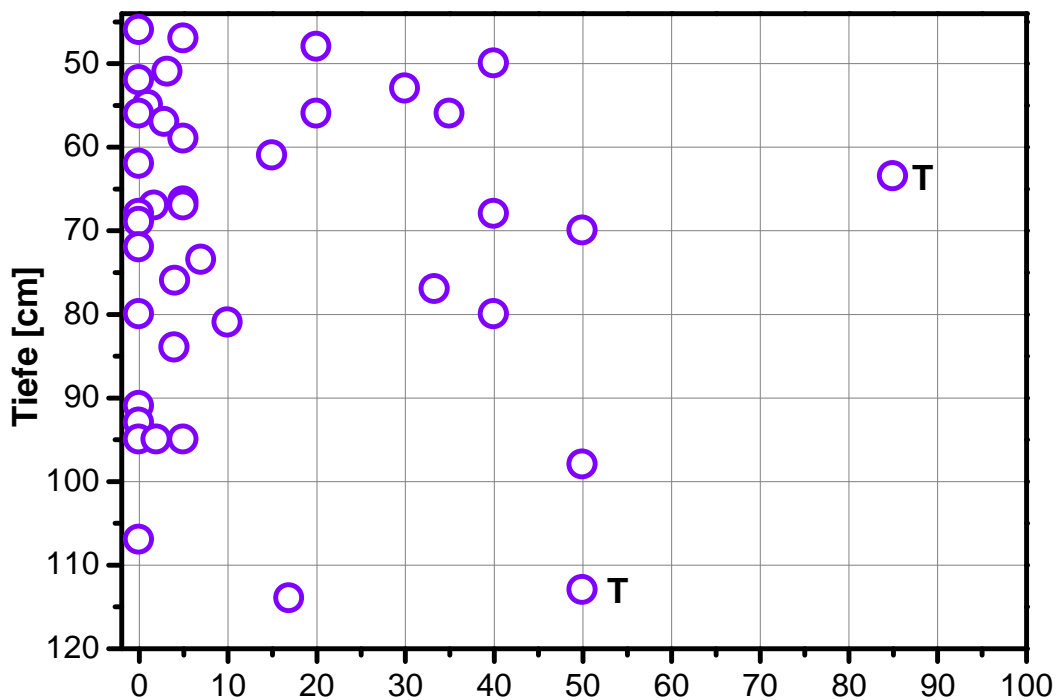


Abbildung 3-5: Anteil von Regenwurmlosungen an der Festsubstanz des Bodens [in Prozent] auf der Grundlage von Schätzungen anhand von Bodendünnschliffen. Untersucht wurden 41 Horizonte von Waldböden aus Baden-Württemberg. Daten erodierter Böden und Kolluvien wurden nicht verwendet. T = Tschernosem-Pararendzina

2. In Unterböden bleiben Spuren der Bioturbation durch Regenwürmer sehr lange erhalten. Die Untersuchung von 41 Unterboden-Horizonten von Waldböden aus Baden-Württemberg auf solche Spuren ergab:

- In fast einem Drittel der Horizonte (12 von 41) wurden keine Spuren der Tätigkeit von Regenwürmern gefunden.
- In circa einem Drittel (14 von 41) lag ihr Flächenanteil bei maximal 10 %.
- In einem weiteren Drittel der Böden (15 von 61) war ein deutlicher Einfluss der Regenwürmer feststellbar.
- Nur in einer Probe wurde ein sehr hoher Einfluss der Bioturbation ermittelt: Ein schwarzerdeähnlicher Boden am Kaiserstuhl wies einen Flächenanteil von 70 % auf.

Verdichtungen in Unterböden werden also - auch langfristig - nicht hinreichend durch Bioturbation aufgelöst. Da auch Frost sowie Quellen und Schrumpfen im Unterboden keine große Bedeutung haben und Feinwurzeln den Boden in der Tiefe auch nicht lockern können, ist eine Auflösung von Unterbodenverdichtungen auch auf lange Sicht kaum zu erwarten. Allerdings wird in vielen Böden der Unterboden im Laufe der Zeit durch Regenwurm- und Wurzelröhren besser erschlossen, so dass Entwässerung und Durchlüftung verbessert werden. Flächig bleiben aber die Verdichtungen und damit auch die verringerte Wasserspeicherfähigkeit erhalten.

3.1.2. Fazit Bodenstruktur

Dreizehn Jahre nach dem Bodeneinbau ist im Oberboden (bis höchstens 20 cm Tiefe) ein sehr günstiges Gefüge ausgebildet. Im Unterboden hat sich aber die Situation in beiden Testfeldern (siehe Abbildung 3-2) durch Setzungen eher verschlechtert als verbessert. Es sind auch noch kaum Anzeichen einer Gefügeverbesserung zu erkennen. Die Trockenraumdichten mehrerer Profile einer circa 20 Jahre alten Rekultivierungsschicht auf der Kreismülldeponie Sindelfingen (Abbildung 3-4) zeigen ein ähnliches Bild.

Daraus folgern wir, dass Verdichtungen nahe der Bodenoberfläche langfristig eher unkritisch zu sehen sind. Sollen günstige Standortbedingungen auf der Rekultivierungsschicht geschaffen werden, so sind jedoch Verdichtungen im Unterboden - hier vor allem im Hauptwurzelraum bis circa 100 cm Tiefe - unbedingt zu vermeiden, weil sie sich in absehbaren Zeiträumen nicht auflösen.

3.2. Regenwurmpopulation

Regenwürmer haben einen großen Einfluss auf die Bodenstruktur und den Nährstoffkreislauf. Dies gilt besonders für Standorte ohne Bodenbearbeitung und regelmäßige Düngung, beispielsweise in Wäldern.

3.2.1. Entwicklung der Population in den Testfeldern

Die im Bodenmaterial ursprünglich vorhandene Regenwurmpopulation wurde durch Umlagerung und Bodeneinbau im Herbst 2000 sowie Nahrungsmangel so stark dezimiert, dass der Boden der Leonberger Lysimeterfelder im Frühjahr 2001 praktisch regenwurmfrei war. Daher wurden im Frühjahr 2002 Regenwürmer ausgesetzt. Die Ergebnisse der Regenwurmuntersuchungen³ (Abbildung 3-6) zeigen eine schnelle Zunahme der Regenwurmabundanzen und –biomassen in den ersten Jahren. Das Maximum an Biomasse wurde im Frühjahr 2008, die höchsten Abundanzen im Frühjahr 2009 erreicht. Bis zum Jahr 2010 gab es dann eine mäßige Abnahme der Populationsgröße. Im Jahr 2011 war der Rückgang der Regenwürmer drastisch; in beiden Lysimeterfeldern wurde im Herbst nur noch circa ein Fünftel der Menge des Vorjahres gefunden. Die Populationsgröße stagnierte in den Jahren 2012 und 2013 und verminderte sich weiter im Jahr 2014. Im Herbst 2014 wurden die niedrigsten Regenwurmengen der letzten 10 Jahre gefunden. Auch das Arteninventar ist mittlerweile stark geschrumpft. Von ehemals 8 Arten im Jahr 2008 sind nur noch die „Allerweltsarten“ *Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea caliginosa* und *A. rosea* übrig geblieben. Die trockenheitsempfindlichen epigäischen Arten fehlen vollständig. Mittlerweile ist daher der Einfluss der Regenwürmer auf die Bodenstruktur sehr gering.

Die Regenwurmpopulation im Wald wird im wesentlichen von Bodenfeuchte, pH-Wert und von der Bodenart bestimmt (EHRMANN et al. 2002). Natürliche trockene Waldstandorte in Baden-Württemberg weisen prinzipiell deutlich geringere Regenwurmpopulationen als feuchtere auf (EHRMANN et al. 2002); auch haben versauerte Böden mit einem pH-Wert unter ca. 4,2 eine deutlich ärmere Regenwurmfauna als weniger saure Böden. Der Boden der Leonberger Lysimeterfelder ist für Regenwürmern grundsätzlich ziemlich günstig. Dies gilt für die Bodenart; so wurde die weltweit bislang größte bekannte Regenwurmbiomasse (413 g/m²) bei der gleichen Bodenart (Ut4) in einer Parabraunerde aus Lösslehm nahe Stuttgart gefunden (EHRMANN, unveröffentlicht). Auch ist der Boden der Versuchsfläche noch nicht versauert, der pH-Wert im Oberboden ist seit dem Bodeneinbau nur geringfügig von 7,8 auf 7,4 abgesunken. Als Ursache für den Rückgang der letzten Jahre und die mittlerweile kleine Regenwurmpopulation sind drastische Änderungen im Bodenfeuchteregime zu sehen.

Grund hierfür ist der sehr hohe Wasserverbrauch der dominierenden Zitterpappeln. Diese Pionierbaumart wird bei Rekultivierungen häufig angepflanzt. Sie liefert eine besonders gut abbaubare Streu und fördert damit sowohl die Bodenentwicklung als auch die Regenwürmer. Die zunehmende Austrocknung des Bodens durch die ansteigende Transpiration der größer

³ Regenwürmer wurden mit einer Kombination aus Elektromethode (auf je 1/8 m², THIELEMANN 1986) und nachfolgender Handauslese einer Teilfläche von 1/30 m² bis zu einer Tiefe von 25 cm gefangen. Im Herbst 2011 wurde zusätzlich - ohne großen Erfolg - eine Austreibung mit AITC vorgenommen.

werdenden Bäume ist durch die mit TDR-Sonden gemessenen Bodenfeuchtegänge eindeutig belegbar. Diese Messungen (Abbildung 3-18 bis Abbildung 3-20) zeigen, dass mittlerweile der Boden von circa Juni bis November (in 50 cm Tiefe) beziehungsweise Dezember (in 135 cm Tiefe) zu trocken für eine Aktivität von Regenwürmern ist. Einheimische Regenwürmer können kürzere Trockenperioden zwar durch Rückzug z.B. in den Unterboden (tiefgrabende Arten) oder durch Aufsuchen eines Ruhestadiums (vor allem endogäische Arten) überdauern, derart lange Trockenphasen überfordern aber das Anpassungsvermögen der einheimischen Regenwurmarten.

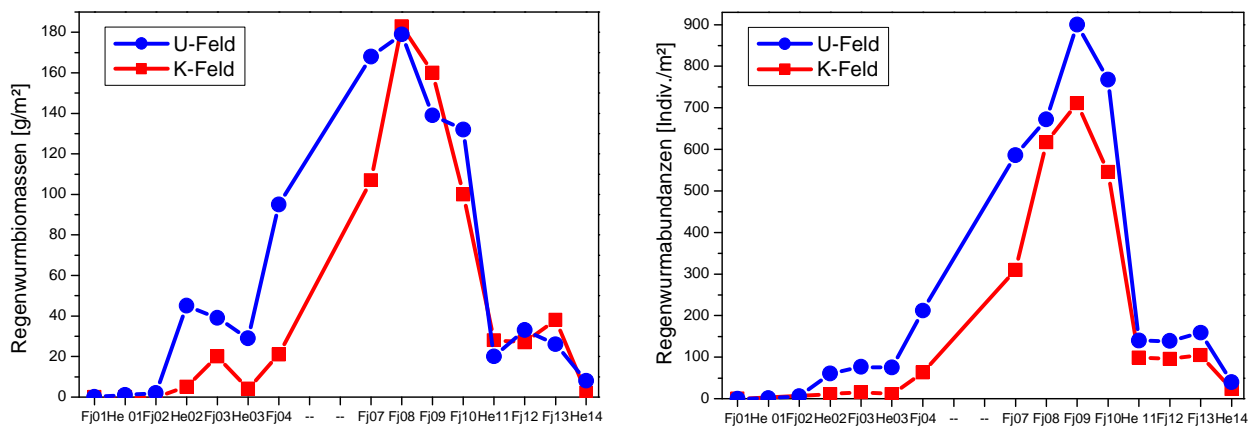


Abbildung 3-6: Entwicklung der Biomassen (links) und Abundanzen (rechts) von Regenwürmern in den Lysimeterfeldern von Frühjahr 2001 (Fj01) bis Frühjahr 2012 (Fj12); 2011 und 2014 konnten wegen der Frühjahrstrockenheit nur im Herbst (He) Untersuchungen durchgeführt werden.

3.2.2. Mögliche Einflüsse durch Klimaveränderungen

Diese Ergebnisse belegen den großen Einfluss der Bodenfeuchte auf die Regenwurmpopulation. Sie weisen darauf hin, dass bei zunehmend trockener werdenden Sommern Regenwürmer auch und sogar gerade in sehr tiefgründigen Waldböden mit hoher Wasserspeicherkapazität durch Austrocknung stark gefährdet sein können. Dieser auf den ersten Blick überraschend wirkenden Aussage liegt folgender Sachverhalt zugrunde:

- Tiefgründige Böden trocknen zwar langsamer aus als flachgründige Böden, aber wegen ihrer hohen nutzbaren Feldkapazität und ihrer leistungsfähigen Vegetation mit hoher Interzeption und Transpiration erreichen sie bei Wiederbefeuchtung erst viel später wieder die für Regenwürmer annehmbaren Bodenfeuchten. So kann beispielsweise eine flachgründige Rendzina nach einer Regenmenge von 50 mm Niederschlag wieder feucht sein, während eine tiefgründige Parabraunerde aus Lösslehm hierzu mindestens die doppelte Wassermenge benötigt. Da anhaltende Regenperioden mit 100 mm Niederschlag im Sommer selten sind und Böden durch die Evapotranspiration schnell wieder Wasser verlieren, kann im tiefgründigen Boden möglicherweise erst im Spätherbst wieder eine für Regenwürmer hinreichende Bodenfeuchte entstehen.
- In Abhängigkeit vom Niederschlagsregime können daher Trockenperioden für Regenwürmer - nicht aber für die Vegetation - in tiefgründigen Böden unter Umständen

deutlich länger als in flachgründigen Böden andauern und so das Anpassungsvermögen einheimischer Regenwurmarten deutlich überfordern.

Diese Ergebnisse zeigen auch die Notwendigkeit von Langzeituntersuchungen. In Baden-Württemberg gibt es nur eine weitere Waldfläche, auf der Langzeituntersuchungen von Regenwürmern durchgeführt werden. Auf dieser sandigen Fläche in der Rheinebene bei Forst kommen aber aufgrund des niedrigen pH-Wertes nur epigäische Arten vor. Untersuchungen mit gleichzeitiger langfristiger Erfassung von Bodenwassergehalten und der Regenwurmpopulation sind in Mitteleuropa äußerst selten und machen die Regenwurmuntersuchungen in Leonberg besonders wertvoll.

3.2.3. Spuren tiefgrabender Regenwürmer an der Bodenoberfläche

Die wichtigen tiefgrabenden anezischen Regenwürmer hinterlassen charakteristische Spuren an der Bodenoberfläche, die einen semiquantitativen Hinweis auf das Vorkommen dieser Regenwürmer geben. In Leonberg wurden die von Regenwürmern zusammengezogenen Streuhäufchen ausgezählt. Sie stammen hier ausnahmslos von der mittelgroßen Art *Lumbricus terrestris*.

Die Anzahl der Streuhäufchen an der Bodenoberfläche stieg von 2007 bis 2010 in beiden Feldern deutlich an. Im U-Feld wurden 2010 maximal 24 Streuhäufchen je m² gefunden, ein sehr hoher Wert. In den Folgejahren ging die Anzahl der Streuhäufchen deutlich zurück (Abbildung 3-7). Dies zeigt, dass auch die tiefgrabende Art unter dem trockenem Boden leidet. Aufgrund der höheren Evapotranspiration des leistungsfähigeren Baumbestandes sind die Bedingungen im Unterboden des U-Feldes inzwischen ungünstiger als im K-Feld, daher ist seit 2013 auch die Anzahl der tiefgrabenden Regenwürmern im K-Feld höher.

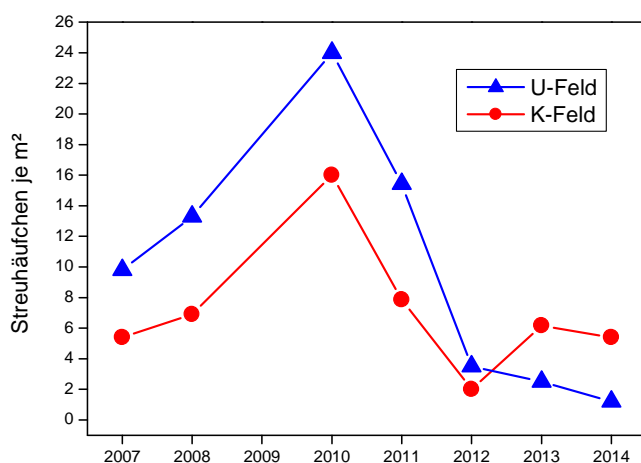


Abbildung 3-7: Anzahl der Streuhäufchen von tiefgrabenden anezischen Regenwürmern in K- und U-Feld von 2007 bis 2014. Rechts: Beispiel für Streuhäufchen (Bildbreite 35 cm).

3.3. Nährstoffgehalte des Oberbodens⁴

Obwohl in beiden Feldern identisches Bodenmaterial eingebaut und zu Beginn der Versuche die gleiche Düngung (Kompost und Mineraldünger) aufgebracht wurde, sind heute im Oberboden des U-Feldes der Humusgehalt sowie die Konzentrationen an verfügbarem Phosphor und Kalium höher als im K-Feld. Die Konzentrationen an verfügbarem Magnesium sind gleich. Diese Unterschiede zwischen den Feldern beruhen mit hoher Wahrscheinlichkeit auf der stärker entwickelten Vegetation des U-Feldes (siehe Abbildung 3-17), die mehr (Blatt-) Streu bildet. Mit dem Blattfall im Herbst gelangen die enthaltenen Nährstoffe an die Bodenoberfläche. Die Streu wird teilweise mineralisiert, der Rest in den Oberboden eingemischt. Hierdurch steigen der Humusgehalt und die Konzentration der damit verlagerten Nährstoffe vor allem in der obersten Bodenschicht.

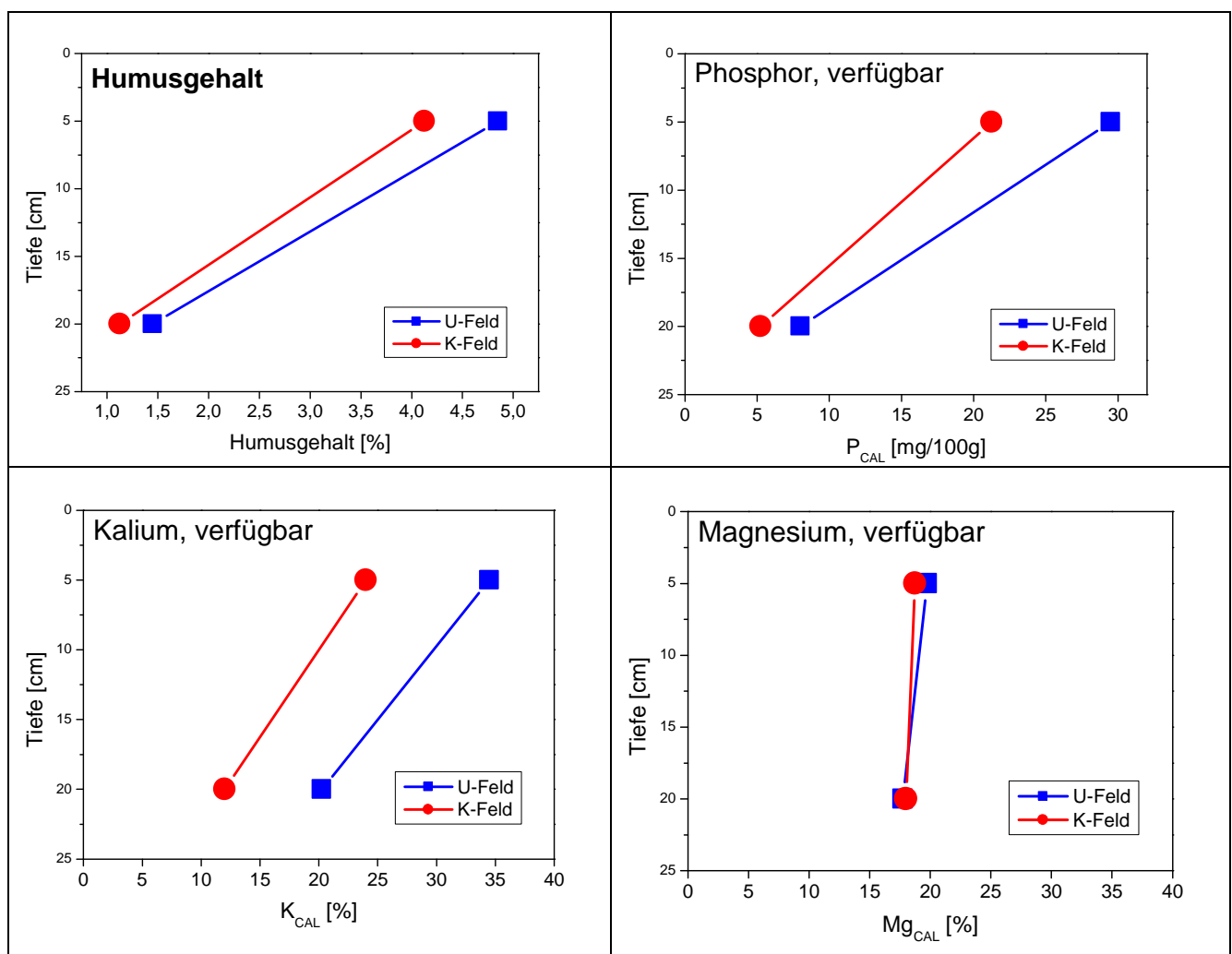


Abbildung 3-8: Humus- und Nährstoffgehalte im Oberboden (Probetiefen 0-10 cm und 10-30 cm). Da Phosphor im Oberboden vorwiegend organisch gebunden ist, korreliert sein Vorkommen mit dem Humusgehalt. Kalium wird in deutlich größerem Umfang durch die Bäume aufgenommen als Magnesium.

⁴ Nährstoffuntersuchungen wurden in zwei Tiefenstufen (0 - 10 cm und 10 - 30 cm) mit jeweils vier Wiederholungen in beiden Feldern durchgeführt. Die auf den Feldern gewonnenen Proben wurden von der LTZ Augustenberg analysiert.

3.4. Durchwurzelung

3.4.1. Profilbeprobungen 2001 bis 2013

Seit Anlage der beiden Lysimeterfelder wurde in Abständen von mehreren Jahren die Durchwurzelung des Bodens an unterschiedlich situierten Profilwänden (Methode nach AG Boden 2005) bestimmt, um die Testfelder nicht übermäßig zu stören, meist in Verbindung mit weiteren Untersuchungen oder der Installation von Messgeräten.

In beiden Feldern zeigt sich mit der Zeit ein in der Tiefe abgestufter Verlauf der Durchwurzelungsintensität (Abbildung 3-9): In beiden Testfeldern ist der Oberboden bis 20 cm (K-Feld) beziehungsweise 30 cm (U-Feld) deutlich intensiver durchwurzelt als der Unterboden.

Folgende wichtige Unterschiede zwischen den Feldern lassen sich feststellen:

- Mit Ausnahme des Profils im Jahr 2004 ist der Oberboden des K-Feldes bis 20 cm Tiefe in den beprobten Profilen intensiver durchwurzelt als der des U-Feldes.
- Die Tiefendurchwurzelung des U-Feldes ist gleichmäßiger als die des K-Feldes. Dies gilt für alle betrachteten Profile.
- Die Durchwurzelung des Bodens unterhalb 20 cm ist im U-Feld in den meisten Tiefenstufen und Jahren intensiver, dies gilt vor allem für die Beprobungen in den Profilen der Jahre 2001 und 2004.

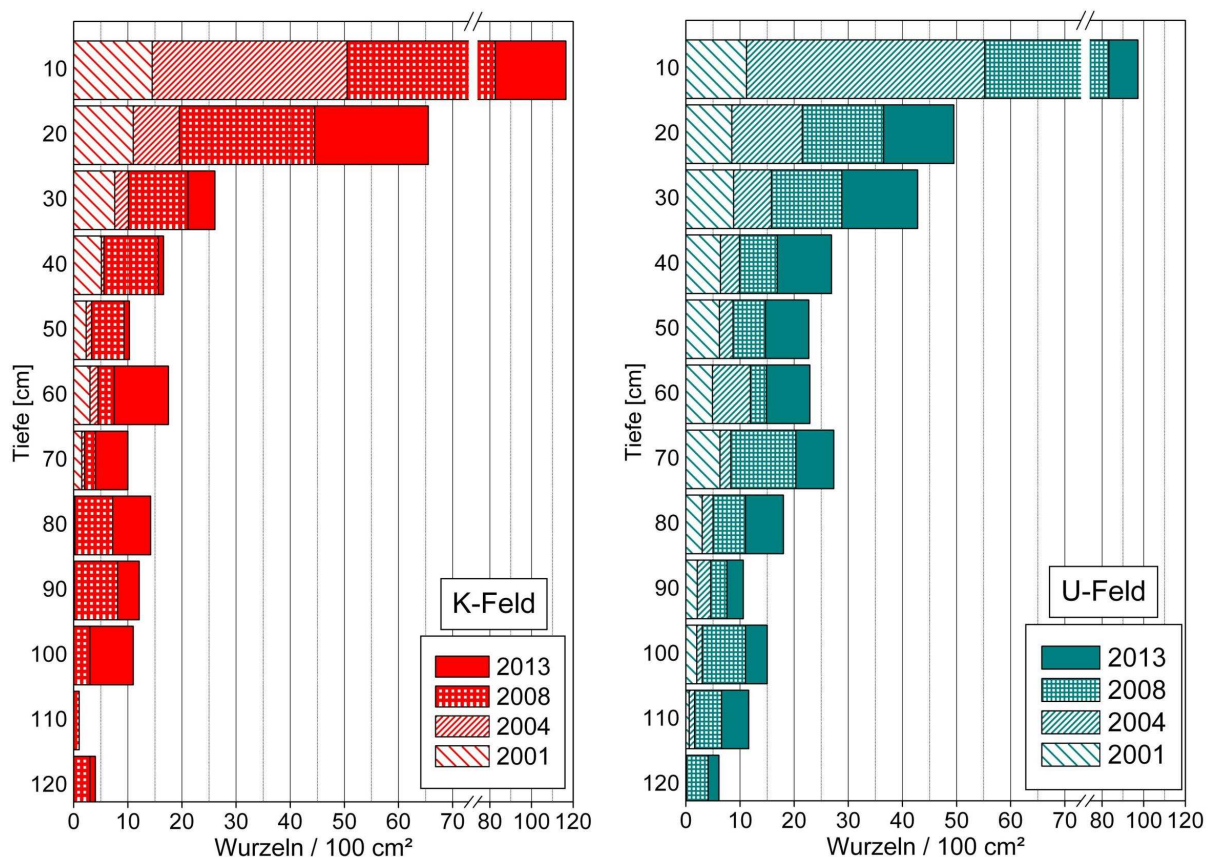


Abbildung 3-9: Durchwurzelungsintensität der Rekultivierungsschicht des K- und des U-Feldes; Ergebnisse von Aufgrabungen im Mai/Juni 2001, Mai 2004, Mai 2008 und Juli 2013

- Im K-Feld zeigt sich gegenüber dem U-Feld eine deutlich verzögerte Tiefendurchwurzelung. Bis zur Beprobung 2008 konnten unterhalb 70 cm Tiefe keine Wurzeln im K-Feld festgestellt werden.
- In den Profilaufnahmen 2008 und 2013 wird der Unterboden beider Felder bis in eine Tiefe von circa 90 – 100 cm ähnlich intensiv erschlossen.

Die Bewertung dieser Durchwurzelungsintensität gemäß AG BODEN (2005) ergibt für das Jahr 2008 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. 2013 war die Oberbodendurchwurzelung im Profil des K-Feldes bis 20 cm Tiefe *sehr stark* (W5), die des U-Feldes bis 30 cm Tiefe *stark* (W4). Darunter lag die Durchwurzelung in beiden Feldern meist zwischen (*sehr*) *schwach* und *mittel*.

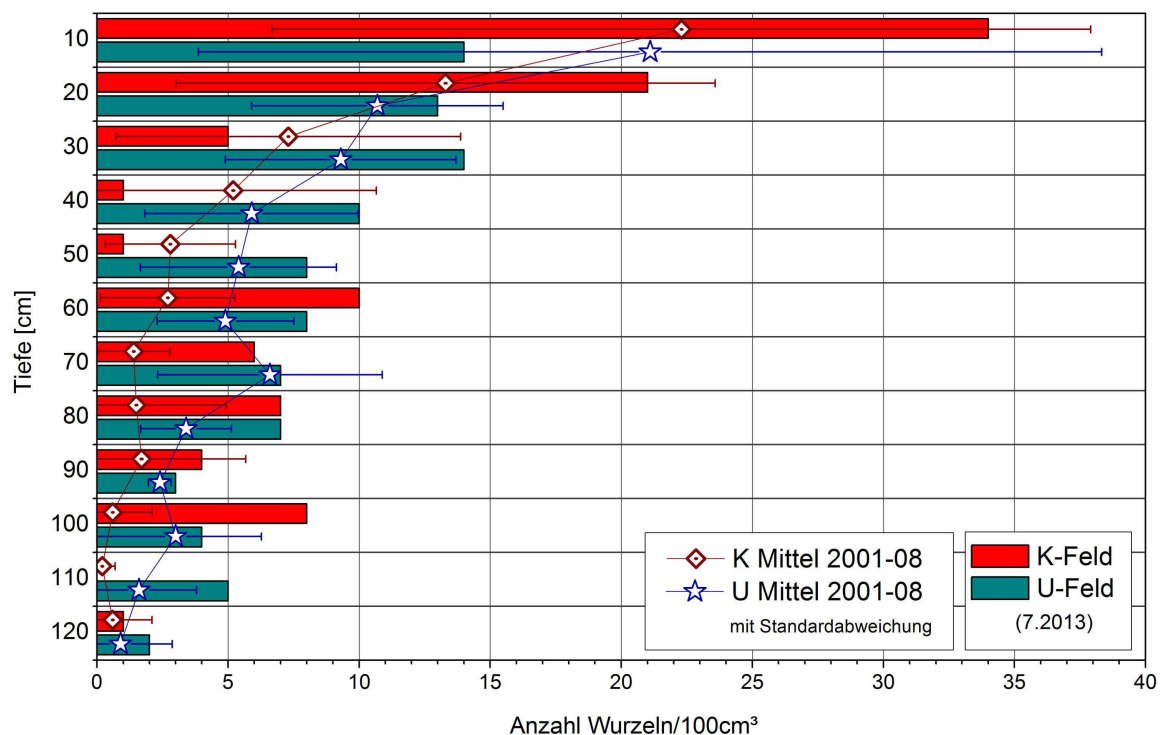


Abbildung 3-10: Durchwurzelungsintensität des Bodens im U- und K-Feld; 2013: Mittelwert aus jeweils zwei Probeflächen von 100 cm³ pro Profilwand, Mittel 2001-08: Mittelwert/σ aus 4 Profilen

Die Ergebnisse der Beprobung 2013 sind in Abbildung 3-10 zusammen mit den gemittelten Ergebnissen der Profilaufnahmen aus den Jahren 2001, 2004 und 2008 dargestellt. In den Tiefenstufen zwischen 30 - 50 cm und 110 - 120 cm Tiefe wirken sich im Profil von 2013 im K-Feld die beiden Verdichtungsschichten stark reduzierend auf die Durchwurzelungsintensität aus. Hier sind im U-Feld erheblich mehr Wurzeln zu verzeichnen. Wie die Mittelwerte und Standardabweichungen der vorangegangenen Beprobungen zeigen, sind diese

Einschränkungen offensichtlich nicht an allen Stellen des K-Feldes so ausgeprägt wie im Profil des Jahres 2013. In der Bodentiefe zwischen 60 und 100 cm Tiefe sind 2013 keine deutlichen Unterschiede zwischen den Feldern erkennbar.

Bei der Profilbeprobung im Juli 2013 wurde parallel zur Durchwurzelungsintensität in Tiefenstufen von 10 cm gemäß AG BODEN (2005) auch die Eindringwiderstände des Bodens aufgenommen (vergleiche auch Abbildung 3-1). Die Abbildung zeigt eine recht gute Übereinstimmung von geringer Durchwurzelung mit hohen Eindringwiderständen, die vor allem in den beiden verdichteten Schichten des K-Feldes (20 – 45 cm und 85 – 100 cm Tiefe) deutlich wird. Die von der Verdichtung weniger betroffene Zwischenschicht im Unterboden des K-Feldes in 55 – 80 cm Tiefe weist mittlere Eindringwiderstände und dem U-Feld vergleichbare Wurzelzahlen auf.

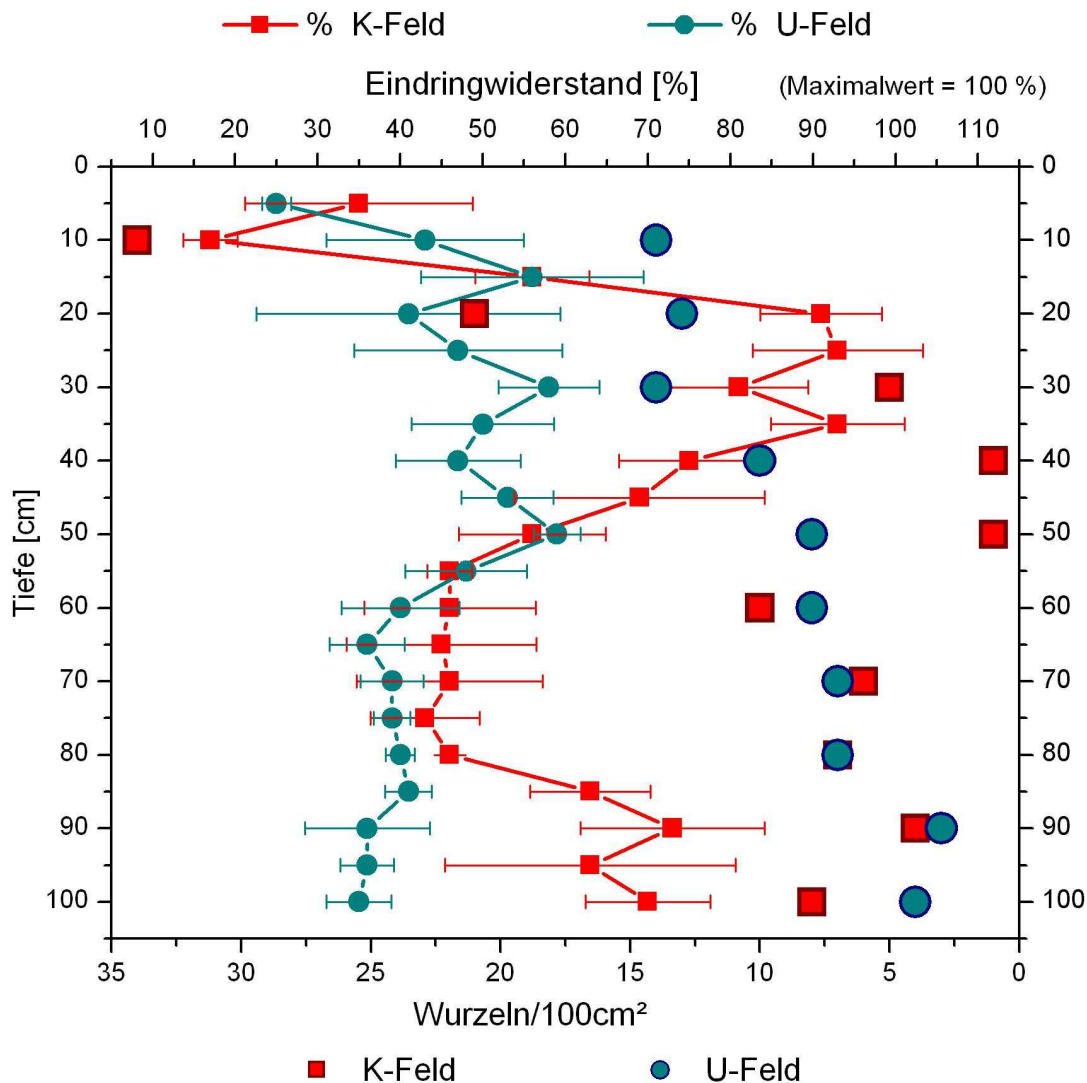


Abbildung 3-11: Eindringwiderstand und Durchwurzelung gemessen in je einem Bodenprofil des U- und des K-Feldes (September 2013); Eindringwiderstände und Wurzelzahlen sind gegenläufig aufgetragen.

3.4.2. Wurzelbohrungen 2012

Im Mai 2012 wurden mit einem Murachschen Wurzelbohrer an fünf Probestellen je Lysimeterfeld Bohrkerne bis in eine Tiefe von 90 cm entnommen und auf Wurzeln untersucht (siehe 2.1). Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen nicht nur für den Oberboden bis 30 cm Tiefe, sondern auch für die weiteren drei Tiefenstufen bis 75 cm höhere mittlere Wurzel-dichten im K-Feld – bei allerdings großer Standardabweichung. In der untersten beprobten Stufe von 75 – 90 cm Tiefe sind die Wurzelzahlen des U-Feldes höher. Alle Unterschiede sind statistisch nicht signifikant (NOTZ 2012). Dieses Ergebnis deckt sich nur teilweise mit dem Ergebnis der Profilbeprobungen 2013 (Abbildung 3-10). Es lässt jedoch, ebenso wie die Profilbeprobungen darauf schließen, dass die Durchwurzelungsintensität des K-Feldes inzwischen zumindest bis in einer Tiefe von circa 90 cm in der gleichen Größenordnung wie die des U-Feldes liegt. Es zeigt weiterhin die große Variation der Durchwurzelungsintensität in den beiden Testfeldern.

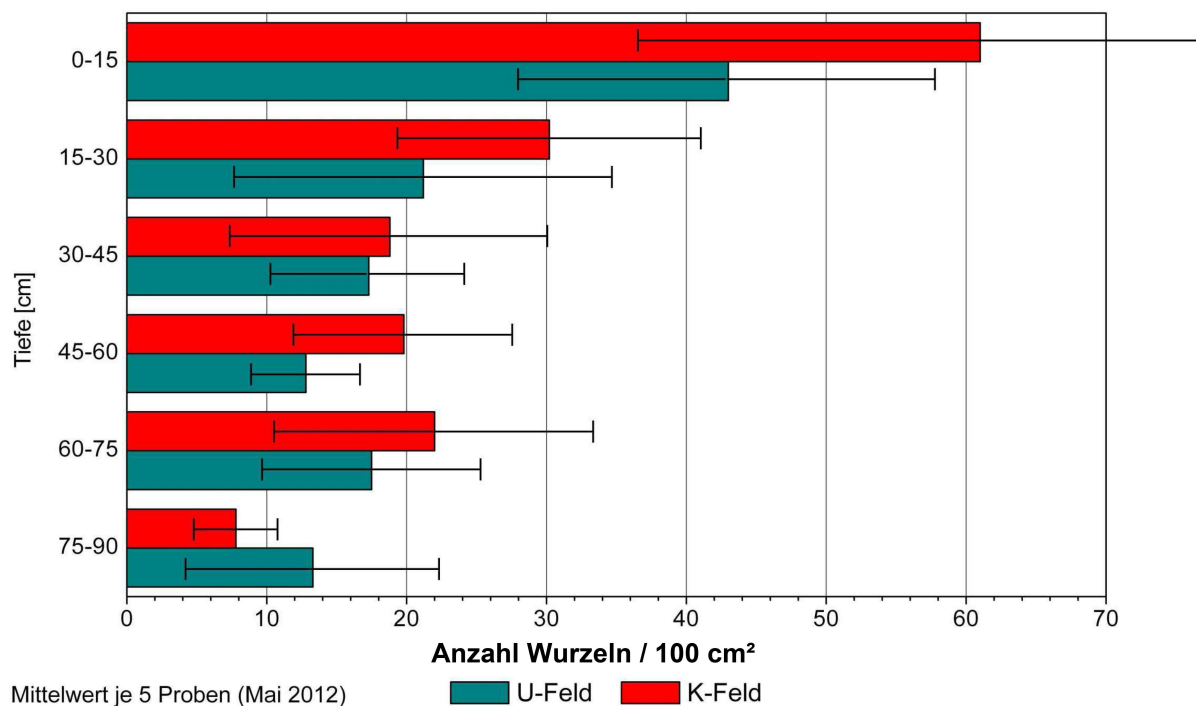


Abbildung 3-12: Bodendurchwurzelung [Anzahl Wurzeln/100 cm²] in sechs Tiefenstufen der Testfeldern U und K; Mittelwerte aus fünf Probestellen, (Quelle: Notz 2012, verändert)

3.4.3. Fazit Durchwurzelung

Die bisherigen Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und -intensität erbrachten vor allem in den Jahren 2001 und 2004 teilweise deutliche Unterschiede bei der Tiefendurchwurzelung der Testfelder, denn im Unterboden des K-Feldes fehlen Wurzeln in diesen Jahren noch weitgehend. Die Aufgrabung im Mai 2008 erbrachte erstmals auch im K-Feld Wurzeln unterhalb 70 cm Tiefe. In Tiefen unterhalb 50 cm wurden im U-Feld bei diesen Untersuchungen deutlich mehr Wurzeln gefunden.

Bei den Wurzelzählungen 2012 und 2013 sind deutliche Unterschiede in der Durchwurzelung nur noch in der Verdichtungsschicht des K-Feldes zwischen 20 (25) – 45 (50) cm Tiefe erkennbar. In den übrigen Tiefenstufen variieren die Durchwurzelungsintensitäten stark und es finden sich teilweise im U-Feld, teilweise im K-Feld mehr Wurzeln.

Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Durchwurzelung des Unterbodens im K-Feld mit einer Verzögerung von circa acht Jahren gegenüber dem U-Feld erfolgt ist.

3.5. Vegetationsentwicklung

3.5.1. Gehölzwachstum

Empfehlungen zur Bepflanzung der Rekultivierungsschichten von Deponien setzen heute meist auf Gehölzbewuchs, da bei Waldbeständen mit dem größten Wasserverbrauch der für Deponiebepflanzungen in Frage kommenden Vegetationstypen zu rechnen ist (DGGT 2000b), dies gilt vor allem für wüchsige und gut entwickelte Gehölzbestände. Daher sollen auf Deponien gesunde, mehrstufig aufgebaute Waldbestände aus Kraut- und Strauchschicht sowie mindestens zwei Baumschichten entwickelt werden, die sich langfristig selbst verjüngen (SCHABER-SCHOOR 2006). Um neu geschaffene Rekultivierungsstandorte für anspruchsvollere Waldbaumarten zu verbessern und die Gehölzbedeckung und Waldentwicklung zu beschleunigen, werden üblicherweise zuerst Vorwaldarten – oft auch Pionier-Baumarten genannt - wie Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*), Pappel- oder Weidenarten gepflanzt.



Abbildung 3-13: Die Leonberger Lysimeterfelder im Sommer 2005 (oben) und Herbst 2012 (unten)

In die Versuchsfelder wurden im Dezember 2000 je 54 Zitterpappeln (*Populus tremula*) gleicher Herkunft gepflanzt. Im Jahr nach der Pflanzung waren im K-Feld 17 Pappeln und im

U-Feld 5 Pappeln abgestorben (WATTENDORF et al. 2005). Weitere Verluste resultieren überwiegend aus späterer Beschädigung der Bäume durch Wildverbiss, Bau- oder Pflegemaßnahmen. Sukzessive wurden daher weitere Bäume (Schwarzerle, Linde, Wildkirsche und Bergahorn) eingebracht, der Bestand ist heute weitgehend geschlossen (Abbildung 3-13).

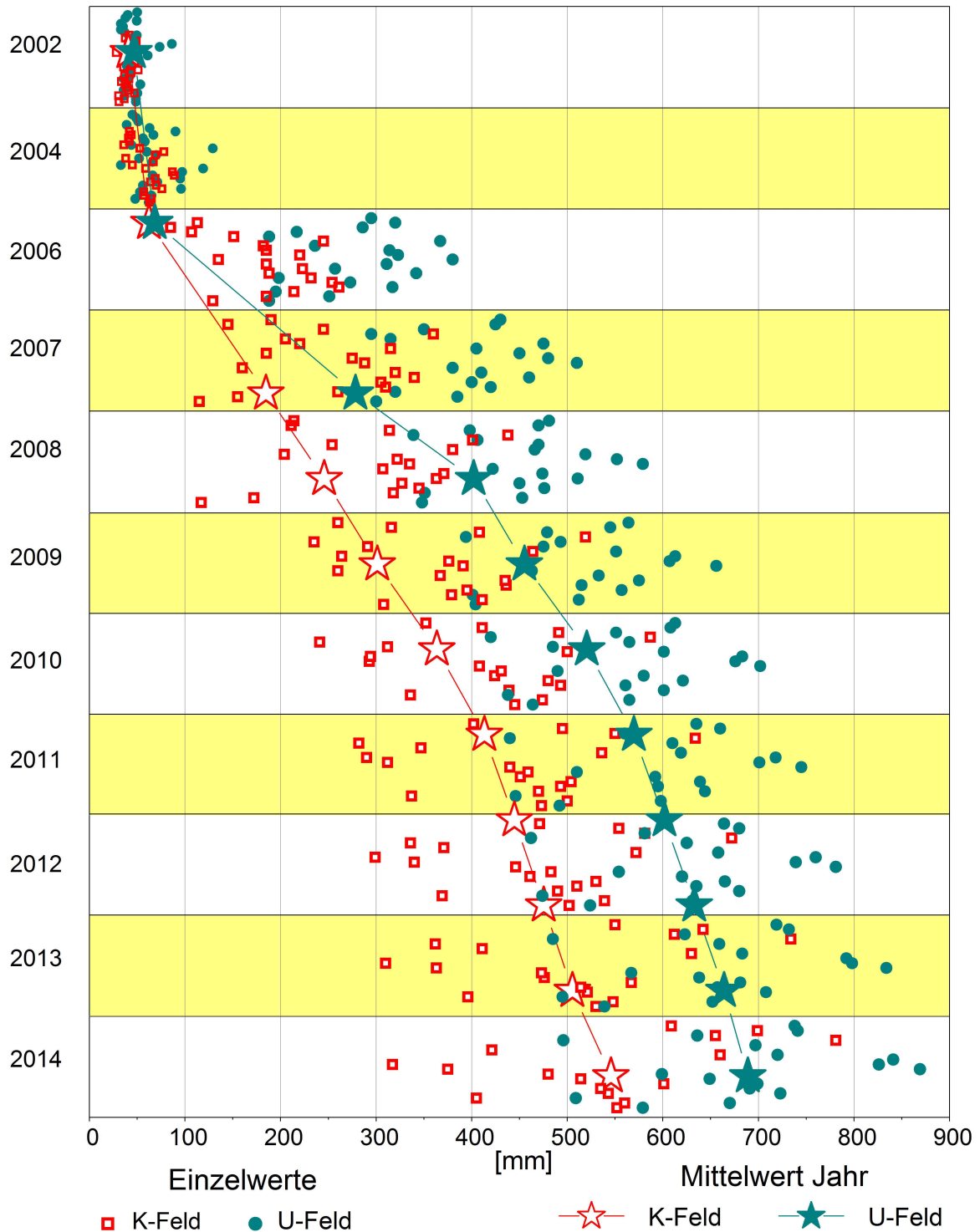


Abbildung 3-14: Stammumfang der Zitterpappeln (*Populus tremula*) auf den Versuchsfeldern von 2002 bis 2014, gemessen in 20 cm Höhe.

In Abbildung 3-14 sind die Ergebnisse der meist jährlichen Messungen des Stammumfangs - gemessen in 20 cm Höhe über dem Boden - der Zitterpappeln von 2002 bis 2014 dargestellt. Es sind alle Einzelwerte und die jeweiligen Mittelwerte der Kollektive in K- und U-Feld aufgetragen. Durch die oben erwähnten Verluste unter den gepflanzten Zitterpappeln nahm der Probenumfang, vor allem in der Anfangszeit, im Lauf der Jahre ab. Von 2007 bis 2010 konnten noch jeweils 18 Zitterpappeln pro Feld beprobt werden, aktuell ist noch der Umfang von 16 Bäumen in Feld K und 17 Bäumen in Feld U messbar.

Der mittlere Stammumfang der beiden Kollektive unterschied sich noch zwei Jahre nach der Pflanzung (Winter 2002, Abbildung 3-14) nur wenig: Er betrug im K-Feld 39,2 (n = 24) mm und im U-Feld 45,1 (n = 32) mm. Im Winter 2014 betrug der Mittelwert des Stammumfangs aller Zitterpappeln im K-Feld 544 mm (n = 16) und im U-Feld 687 mm (n = 17).

Den Verlauf des Gehölzwachstums zeigt Abbildung 3-15: Nach dem Jahr 2004 beginnt die jährliche Zuwachsleistung der Bäume deutlich anzusteigen und die Werte streuen stärker (vergleiche auch Abbildung 3-14). Der Zuwachs der Bäume liegt im U-Feld 2006 und 2007 sehr weit und auch in den Folgejahren stets über dem K-Feld. Die Tendenz der höheren Zuwachsleistungen im U-Feld hat sich im Lauf der Jahre leicht abgeschwächt. 2014 lag der Zuwachs der Aspen des K-Feldes erstmals über dem des U-Feldes. Dieses Ereignis resultiert sowohl aus einer großen Steigerung der Zuwachsrate im K-Feld auf den größten bisher gemessenen jährlichen Wert und einem gleichzeitigen Rückgang des Zuwachses der Bäume des U-Feldes auf den niedrigsten Wert der letzten Jahre.

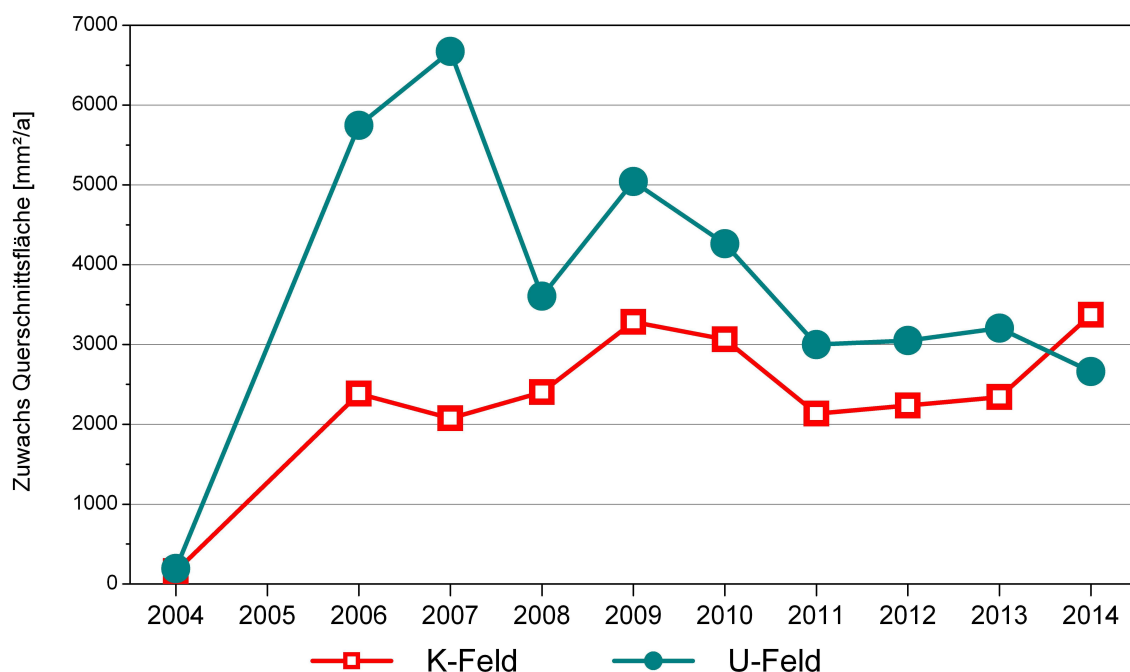


Abbildung 3-15: Jährlicher Zuwachs der Stamm-Querschnittsfläche [mm²/a] der Zitterpappeln (*Populus tremula*) auf den beiden Versuchsfeldern von 2004 bis 2014; keine Messwerte im Jahr 2005

3.5.2. Deckungsgrad und Blattflächenindex

Zur Bestimmung von Deckungsgrad und Blattflächenindex der Gehölzbestände wurden mit einem Circular-Fisheye-Objektiv an jeweils fünf Stellen in beiden Testfeldern Senkrechtfotos angefertigt (Beispiele siehe Abbildung 3-16).



Abbildung 3-16: Senkrecht-Fotografien der Gehölzschicht mit Circular-Fisheye-Objektiv (Juni 2012)

Die Auswertung von Senkrechtfotos ergab mit durchschnittlich 91 % gegenüber 80 % einen größeren Deckungsgrad der Strauch- und Baumschicht im U-Feld (Abbildung 3-17). Auch der gemittelte Blattflächenindex (LAI) ist im U-Feld an den fünf Messpunkten wesentlich höher.

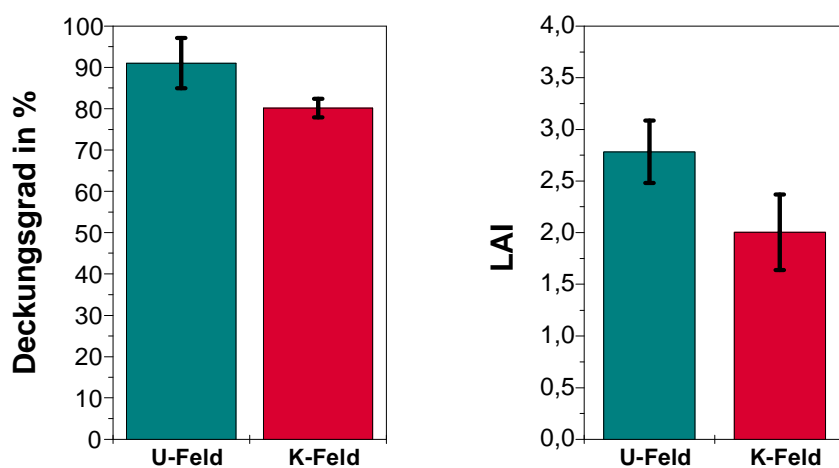


Abbildung 3-17: Deckungsgrad und Blattflächenindex (LAI = Leaf Area Index) der Gehölzbestände auf den beiden Lysimeterfeldern; Mittelwerte von je fünf Messpunkten.

3.5.3. Nährstoffgehalte in Blättern


Die Untersuchung der Blatt-Nährstoffgehalte in Aspen - sehr wüchsigen und weniger große Exemplare wurden separat beprobt - und Bergahornen sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass zwischen den beiden Testfeldern sowohl bei Aspe als auch Bergahorn praktisch keine Unterschiede in der Nährstoffversorgung bestehen.

Tabelle 3-1: Nährstoffgehalte in Blättern von Aspe und Bergahorn auf den Leonberger Lysimeterfeldern (alle Angaben in mg/g)

Art		C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	Al	S	Zn	Mn	Fe
Aspen größere	K	475	18,3	26	1,66	13,11	32,81	3,83	0,08	2,20	0,141	0,06	0,08
	U	469	18,4	25	1,51	13,57	31,55	3,37	0,12	2,01	0,125	0,06	0,11
Aspen kleinere	K	488	19,7	25	1,59	11,12	32,57	3,50	0,11	1,93	0,121	0,07	0,1
	U	462	18,6	25	1,54	11,84	34,71	3,98	0,08	2,39	0,11	0,06	0,08
Alle Aspen	Ø	474	18,8		1,6	12,4	32,9	3,7	0,098	2,13	0,12	0,063	0,093
Berg- ahorn	K	484	16,2	30	5,14	13,4	18,97	2,83	0,21	3,18	0,025	0,12	0,16
	U	453	17,2	26	5,47	16,4	24,81	4,18	0,18	2,46	0,027	0,12	0,15
	Ø	469	16,7	28	5,3	14,9	21,9	3,5	0,20	2,82	0,026	0,12	0,16

Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Bewertungen des Versorgungszustandes von Pappeln (diverse Nährstoffe ohne Spurenelemente) anhand von Blattanalysen in der Literatur findet sich bei BUNGART & HÜTTL (2004). Der Vergleich mit den Messergebnissen (Mittelwerte aller Aspen in Tabelle 3-2) zeigt, dass die Versorgung der Aspen der Testfelder (Spalte LB) bei N, P und K im unteren Optimalbereich, bei Mg im oberen Optimalbereich liegt. Beim Calcium liegen die Blattgehalte sogar über dem Optimalbereich.

Tabelle 3-2: Einstufung der Blatt-Nährstoffgehalte der Leonberger Aspen (Mittelwerte aller Bäume) nach BUNGART & HÜTTL (2004)

		[mg/g]									
		N		P		K		Ca		Mg	
		opt	LB	opt	LB	opt	LB	opt	LB	opt	LB
optimal bis  optimal von		30		4,4		20		17	32,9	4	
							12,4				3,7
		17	18,8	1	1,6	7		3		1,4	

In Tabelle 3-3 finden sich Angaben zum ausreichenden (sufficient) und optimalen Versorgungszustand für Bergahorn. Der Vergleich mit den Blattinhalten der Leonberger Ahorne zeigt eine ausreichende Stickstoff- und Zinkversorgung sowie optimale Werte für die übrigen Nährstoffe.

Die bei Aspen und Bergahorn ausreichenden, aber relativ niedrigen Stickstoffgehalte zeigen an, dass die aus Unterbodenmaterial mit sehr wenig Kompost aufgebaute Rekultivierungsschicht noch nicht über üppige Stickstoffvorräte verfügt. Die Unterschiede zwischen den beiden Testfeldern sind bei allen Blatt-Nährstoffgehalten marginal. Es ergeben sich somit keine Hinweise auf die Nährstoffversorgung als Grund für die unterschiedliche Wachstumsleistung der Bäume.

Tabelle 3-3: Einstufung der Blatt-Nährstoffgehalte von Bergahorn-Bäumen auf den Leonberger Lysimeterfeldern (Mittelwerte aller Bäume); Angabe von Optimum und ausreichendem Ernährungszustand nach BERGMANN (1993)

BERGMANN (1993)	[mg/g]					[µg]		
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	
	LB	LB	LB	LB	LB	LB	LB	
		5,3		21,9	3,5			
optimum >	22	2,5	15	14,9	15	3	50	150
								120
							26	
sufficient >	17	16,7	1,5	10	3	1,5	15	30

3.5.4. Fazit Vegetationsentwicklung

Die Ergebnisse der Vegetationsuntersuchungen belegen ein rascheres Wachstum der im Jahr 2000 gepflanzten Aspen im Feld mit unverdichtetem Boden; die Bäume haben nach nunmehr 14 Jahren einen um circa 20 % höheren mittleren Stammumfang. Die jährliche Zuwachsleistung der Aspen ist mit Ausnahme von 2014 ebenfalls höher. Eine schlüssige Erklärung für die 2014 festgestellte gleichzeitige starke Zunahme der jährlichen Zuwachsrates im K-Feld und den verringerten Zuwachs im U-Feld kann nicht gegeben werden. Unterschiede in der Nährstoffversorgung der Bäume wurden anhand von Blattanalysen nicht festgestellt. Als Grund für die unterschiedlichen Wachstumsleistungen scheidet die Nährstoffversorgung demnach aus. Im Sommer wurden 2014 nach 2012 die zweitniedrigsten Bodenwassergehalte gemessen (z.B. Abbildung 3-18). Im U-Feld sanken die Wassergehalte vor allem im unteren Wurzelraum (85 cm Tiefe) weiter ab als im K-Feld. Möglicherweise kam es hierdurch zu Einschränkungen des Gehölzwachstums.

Falls sich die Ergebnisse der Zuwachsmessungen von 2014 nicht als einmaliges Ereignis herausstellen sollten, wäre anzunehmen, dass die Wachstumsleistung der Bäume des K-Feldes erst nach einer Verzögerung von 14 Jahren das Niveau der Bäume im U-Feld erreicht hat. Die Ergebnisse, die eine schnellere und günstigere Vegetationsentwicklung im unverdichteten Boden belegen, können damit als Argument für Boden schonende Verfahren in der Rekultivierung dienen. Die weitere Entwicklung der Zuwachsleistung der Gehölze sollte beobachtet werden.

3.6. Wasserhaushalt der Lysimeterfelder

3.6.1. Bodenwassergehalt

Die Bodenwassergehalte werden in beiden Testfeldern regelmäßig mit TDR⁵-Sensoren in vier Tiefen (25/50/85/135 cm) an jeweils drei Probestellen gemessen. Die Messungen werden im Rahmen der Kontroll- und Wartungsbesuche, also circa zweimal monatlich durchgeführt.

In Abbildung 3-18 werden beispielhaft für den Jahresverlauf die Ganglinien für die Tiefenstufe 85 cm in mehreren hydrologischen Jahren (1. November - 31. Oktober) gezeigt. Die Kurven in 135 cm Tiefe verlaufen in jahreszeitlich abgeschwächerter und geglätteter Form ähnlich (siehe Abbildung 3-20). Dieser allgemeine Jahresgang wird durch Klima, Bodeneigenschaften am Standort und Vegetationsbedeckung vorgegeben und durch den Witterungsverlauf und - fallweise - auch Wetterereignisse modifiziert. In den beiden näher an der Bodenoberfläche liegenden Tiefenstufen 25 cm und - weniger ausgeprägt - 50 cm machen sich die Witterung, sowie auch einzelne Niederschlagsereignisse (s. u.) wegen des geringeren puffernden Bodenwasserspeichers stärker bemerkbar, daher sind diese Kurven weniger regelhaft. Als Beispiel hierfür werden in die Ganglinien in 50 cm Tiefe gezeigt (Abbildung 3-19).

Alle drei Abbildungen zeigen den typischen Jahresverlauf mit ansteigenden Bodenwassergehalten zu Beginn des hydrologischen Jahres und Aufsättigung des Bodens im Verlauf des Winters, es schließt sich mit Beginn der Vegetationszeit eine zunehmende Entleerung der Bodenwasserspeicher an. Im Lauf der Jahre zeigt sich insbesondere im Unterboden bei 85 cm (Abbildung 3-18) und 135 cm (Abbildung 3-20) eine zunehmend tiefere Austrocknung während der Vegetationsperiode. Diese Entwicklung ist teilweise unabhängig vom Jahresverlauf der Niederschlagsmengen (Ausnahme 2013, 2014) und damit keine Folge klimatischer Veränderungen, sondern die Ursache ist der zunehmende Wasserverbrauch der größer werdenden Bäume (siehe Abbildung 3-13). Die Wassergehaltskurven verlaufen in beiden Testfeldern prinzipiell ähnlich, im U-Feld nehmen die Wassergehalte in 85 cm Tiefe aber stärker ab als im K-Feld, was durch den höheren Wasserverbrauch der dort größeren Bäume bedingt sein kann. Die zunehmende Transpirationsleistung der Bäume zeigt sich beispielsweise im Vergleich der Jahr 2003 und 2012/13: Obwohl im Halbjahr von Mai - Oktober 2003 mit circa 302 mm die geringste Sommer-Niederschlagsmenge seit Betriebsbeginn der Testfelder gemessen wurde, sank der Wassergehalt in dieser Zeit nicht unter 23 Vol-% (U) beziehungsweise 24 Vol-% (K) ab; 2012 und 2013 trocknete der Boden in 85 cm Tiefe auf weit unter 20 Vol-% aus, trotz des höheren Sommer-Niederschlags von 466 mm beziehungsweise 546 mm.

Die Aufsättigung des Bodens erfolgt in der Regel erst am Ende des Winters (Februar), sie liegt jedoch seit einigen Jahren in beiden Testfeldern tendenziell auf einem geringeren Niveau als zu Beginn der Messungen (siehe 2002, 2003). Grund hierfür sind vermutlich Setzungen des Bodens, die die Wasserspeicherkapazität verringert haben. Dies gilt vor allem für den unverdichteten tiefen Unterboden (135 cm, Abbildung 3-20) im U-Feld.

⁵ Time Domain Reflectometry

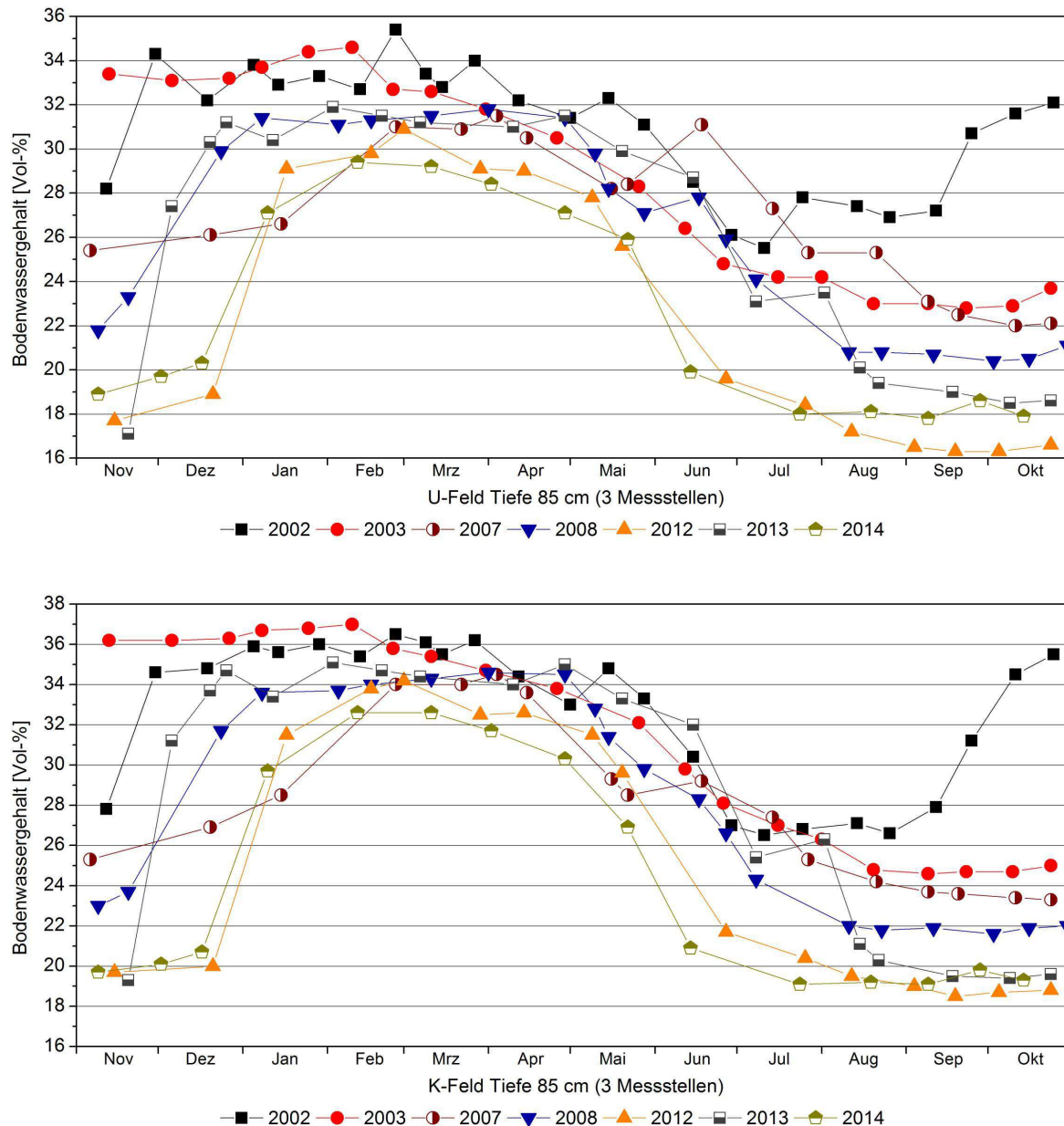


Abbildung 3-18: Bodenwassergehalte in 85 cm Tiefe im Verlauf verschiedener hydrologischer Jahre; U-Feld (oben) und K-Feld (unten); die Ordinatenachsen sind unterschiedlich skaliert.

Aktuelle Unterschiede in der Aufsättigung des Bodens in den Jahren 2012 - 2014 sind jedoch nur durch die Kombination der Auswirkungen unterschiedlicher Niederschlagsmengen und sehr hoher Transpirationsleistung der Bäume zu erklären; weitere Setzungen des Bodens sind nach mehr als 10 Jahren nicht mehr anzunehmen⁶. 2012, 2013 und 2014 ist der Boden zu Beginn des Winters deutlich trockener als in den Vorjahren (Monat November), die Niederschlagsmengen reichen nicht mehr aus, ihn lang anhaltend bis zur Feldkapazität aufzusättigen. Als Konsequenz aus dieser geringeren Wassersättigung während des Winters ergeben sich niedrigere Sickerwassermengen (siehe 3.6.2). Eine Ausnahme hiervon macht allerdings der Winter 2012/13 mit außergewöhnlich hohen Niederschlägen vor allem im Novem-

⁶ Außerdem liegen die Werte von 2013 auf oder über dem Niveau von 2007 und 2008.

ber/Dezember 2012, die die Wassergehalte schnell ansteigen lassen und insgesamt 386 mm Niederschlag von November 2012 - April 2013. Die in diesem Zeitraum höheren Bodenwassergehalte führen auch zu vergleichsweise hohen Absickerungsraten von 53 mm (U-Feld) beziehungsweise 79 mm (K-Feld).

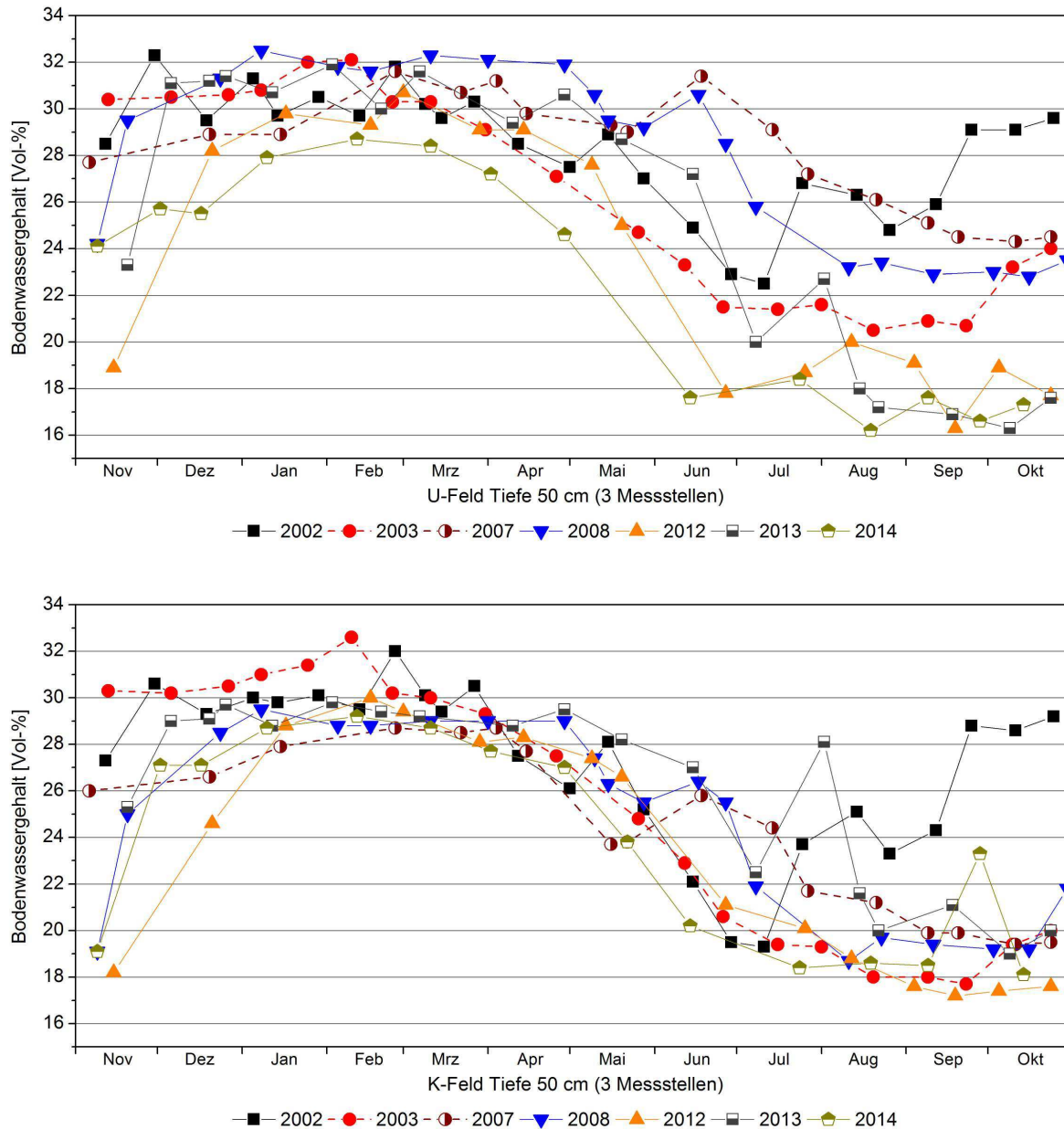


Abbildung 3-19: Bodenwassergehalte in 50 cm Tiefe im Verlauf verschiedener hydrologischer Jahre; U-Feld (oben) und K-Feld (unten)

In 50 cm Tiefe werden die oben beschriebenen Jahrgänge stärker von Wetterereignissen und der Witterung überprägt. So zeigen sich während der Vegetationszeit stärkere niederschlagsbedingte Schwankungen der Bodenwassergehalte, in den letzten Jahren sehr deutlich ausgeprägt beispielsweise im Juli 2013 oder im September 2014 (nur K-Feld). Da diese Niederschlagsereignisse den Boden während der Vegetationszeit aber nicht dauerhaft bis zur

Feldkapazität aufsättigen, sind Korrelationen zwischen Bodenwassergehalt und Absickerung nicht eindeutig zu erkennen. Dies gilt beispielsweise für die Sickerwassermengen im Mai/Juni 2013 (siehe 3.6.2), die nicht mit höheren Bodenwassergehalten einhergegangen sind.

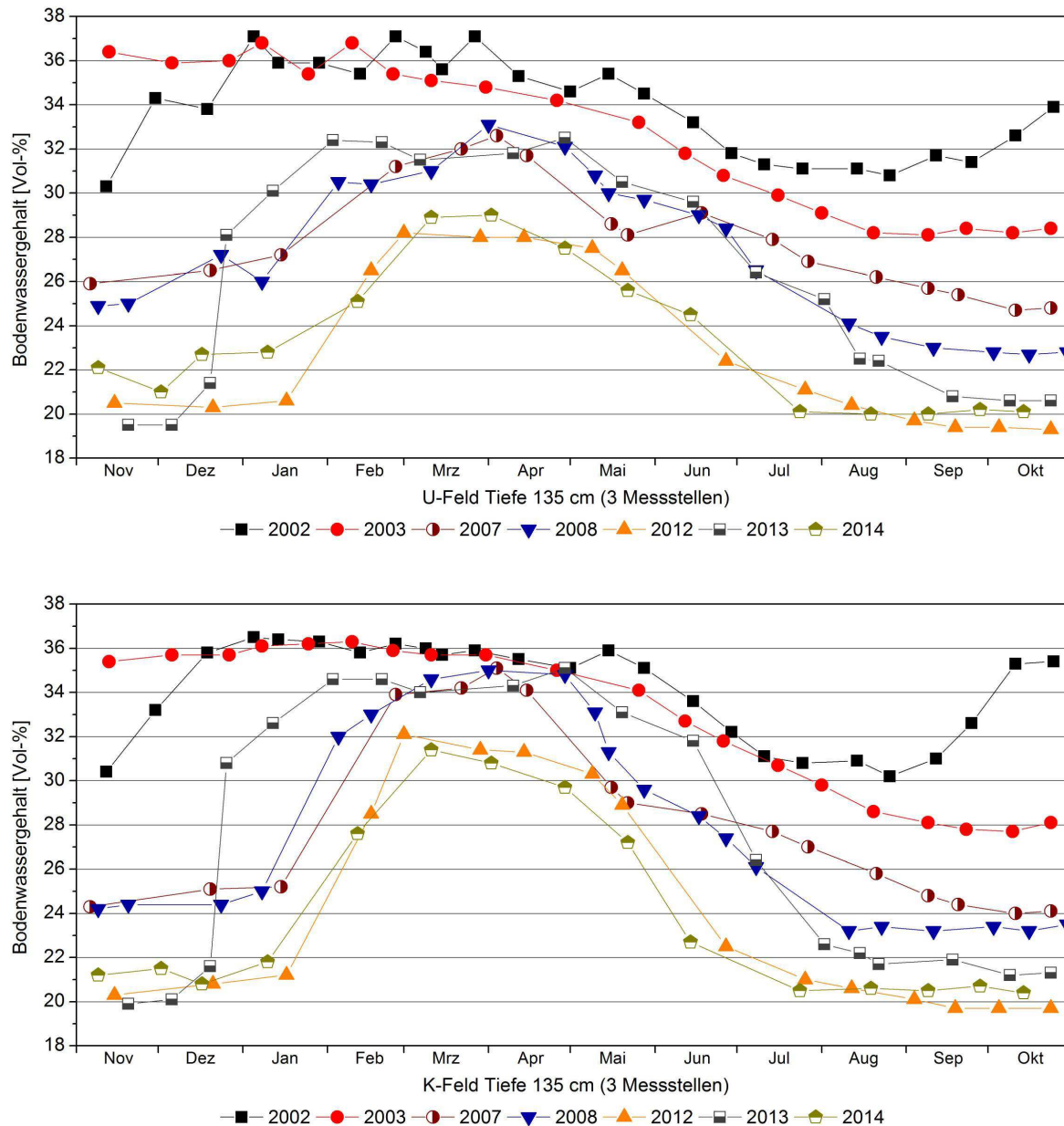


Abbildung 3-20: Bodenwassergehalte in 135 cm Tiefe im Verlauf verschiedener hydrologischer Jahre; U-Feld (oben) und K-Feld (unten)

Die Sättigung des Bodenwasserspeichers im tieferen Unterboden (Abbildung 3-20) verschiebt sich von anfänglich (2002, 2003) November/Dezember immer weiter in den Spätwinter (Februar) hinein, eine Ausnahme hiervon macht das Jahr 2013. In den Kurven dieser Tiefenstufe zeichnen sich einzelne Wetterereignisse, wie beispielsweise die Starkniederschläge des Jahres 2013, überhaupt nicht mehr ab.

3.6.2. Sickerwassermenge

3.6.2.1. Gesamtsummen der Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K

Die bis 2011 fortgeschriebenen Summen der Sickerwassermengen aus den Lysimeterfeldern U (Boden unverdichtet) und K (Boden konventionell verdichtet) in Abbildung 3-21 zeigen wie in der Vergangenheit weiterhin einen nahezu synchronen, aber nicht genau parallelen Verlauf der beiden Absickerungskurven, so dass sich ihre Distanz stetig weiter vergrößert hat. Die Niederschlagssumme seit dem Beginn kontinuierlicher Messungen mit validen Daten in beiden Lysimeterfeldern am 1.6.2003 betrug bis zum 31.12.2014 insgesamt 8.347 mm. Aus dem K-Feld wurden in diesem Zeitraum 1.331 mm Sickerwasser aufgefangen, die Sickerwasserrate betrug demnach circa 16 % des Niederschlags. Beim U-Feld waren 864 mm Sickerwasser zu verzeichnen, circa 10 % der Gesamt-Niederschlagsmenge. Aus dem U-Feld versickerte somit bislang über 1/3 weniger Wasser als aus dem K-Feld. Der im Vergleich zur Niederschlagskurve zunehmend flachere Anstieg der Sickerwasserlinien in Abbildung 3-21 wie auch Abbildung 3-22 zeigen, dass der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag im Lauf der Jahre – mit Ausnahme von 2013, siehe unten - geringer wurde.

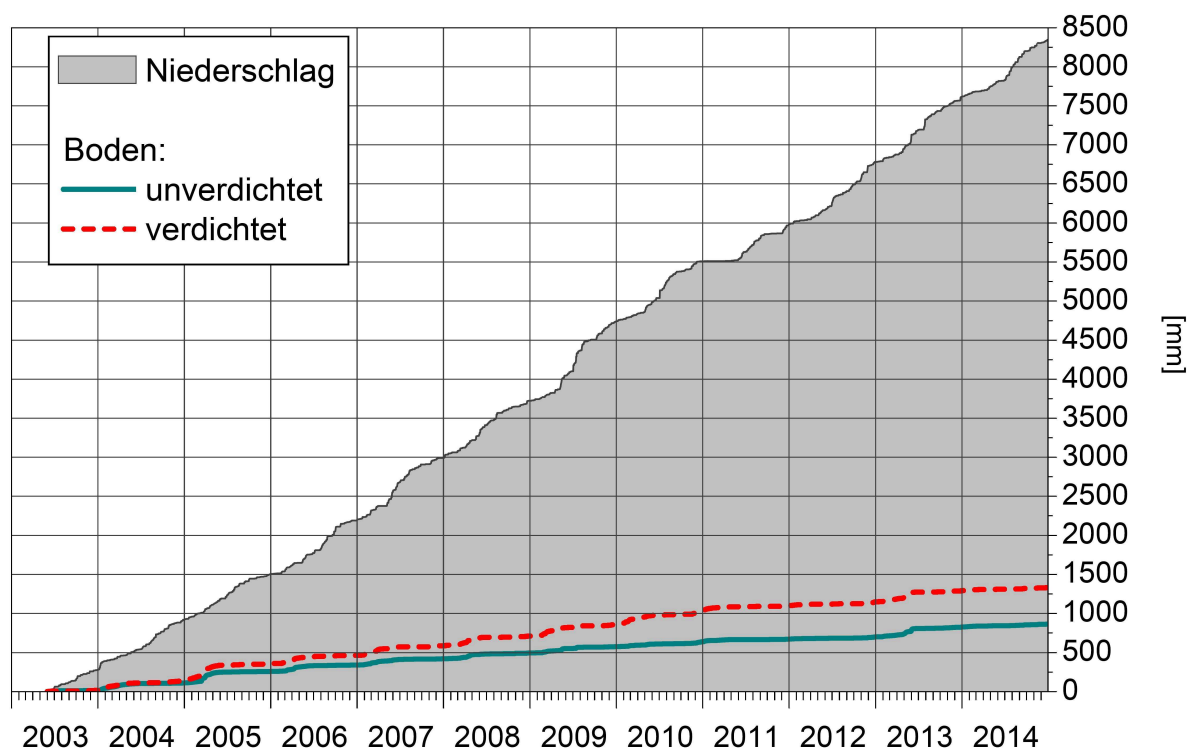


Abbildung 3-21: Niederschlag in Leonberg und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U (Boden unverdichtet) und K (Boden verdichtet) von Juni 2003 bis Dezember 2014

In Tabelle 3-4 sind die Jahres- und Halbjahressummen des Niederschlags und der Absickerung im Zeitraum 1.01.2002 (K ab 1.01.2004) bis 31.12.2014 aus den Leonberger Lysimeterfeldern aufgeführt. Es zeigt sich, dass die Sickerwassermengen aus Feld K in allen Jahren höher als aus Feld U sind, jedoch unterliegt die Größe der Unterschiede zwischen den beiden Feldern von Jahr zu Jahr erheblichen Schwankungen (siehe Abbildung 3-22).

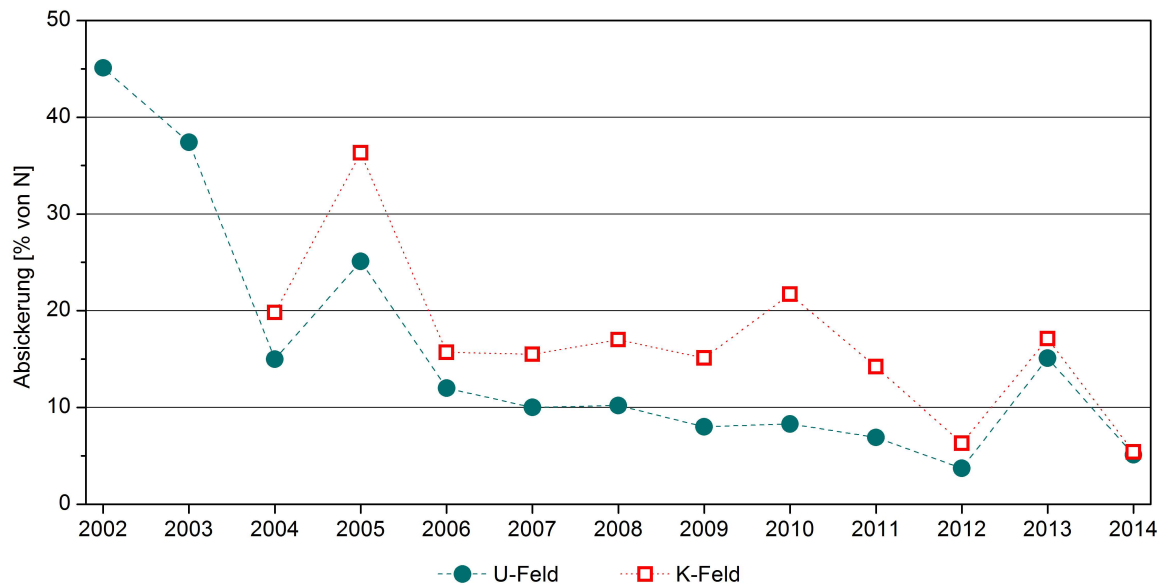


Abbildung 3-22: Prozentuale Anteile der Sickerwassermengen aus Feld U und K am Jahresniederschlag

Aus den Wertereihen (Tabelle 3-4, Abbildung 3-22) für beide Lysimeterfelder ergibt sich folgendes Bild:

- Die in den Jahren 2004 und 2005 relativ hohen Sickerwassermengen von über 25 % des aktuellen Jahresniederschlags aus dem U-Feld und über 36 % aus dem K-Feld sind inzwischen auf unter 10 % des jeweiligen Jahresniederschlags zurückgegangen.⁷
- Sickerwasserraten um oder unter 10 % des langjährigen mittleren Jahresniederschlags in Höhe von 764,2 mm für 1961-90 (DWD-Station Renningen-Ihinger Hof) wurden im Feld U seit 2007 erreicht, im Feld K seit 2012 – in beiden Feldern jedoch mit der Ausnahme des Jahres 2013. In 2014 betragen die Sickerwasserraten im Jahr 2014 noch 5,1 % (U-Feld) beziehungsweise 5,4 % (K-Feld).
- Die Unterschiede zwischen den Testfeldern hinsichtlich der Sickerwasserraten (siehe Abbildung 3-22) nehmen im Zeitraum von 2006 bis 2010 zu, da im U-Feld die Sickerwasserraten kontinuierlich sinken, während sie beim K-Feld mehr oder weniger konstant bleiben. Nach 2010 scheinen die Unterschiede geringer zu werden, allerdings wird diese Tendenz von der Niederschlagsmenge und der Niederschlagsverteilung beeinflusst – siehe hierzu die folgenden Ausführungen zu den Jahren 2013 und 2014.
- In den beiden letzten Jahren waren die Unterschiede zwischen den Sickerwassermengen des U- und des K-Feldes - auf sehr unterschiedlichem Niveau - so gering wie nie zuvor, das gilt vor allem für 2014 mit circa 37 mm/a (U-Feld) und 40 mm/a (K-Feld).

⁷ Für 2002 und 2003 liegen für das K-Feld keine Werte vor, daher ist ein Vergleich nicht möglich. Aufgrund der Bodenwassergehalte (siehe beispielsweise Abbildung 3-20) ist mit ähnlich hohen Sickerwassermengen wie im U-Feld zu rechnen.

Tabelle 3-4: Niederschlag⁸ und Absickerung (Gesamt und Sommer-/Winterhalbjahr) aus den Lysimeterfeldern in den Jahren 2002 (K-Feld 2004) bis 2014

Jahr	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Niederschlag [mm]													Ø 2002-2014 = 727,2 mm
Σ Jahr	889	495	644	584	685	801	732	1017	769	474	799	834	732
Σ Mai-Okt	556	303	384	336	501	536	431	716	548	351	466	546	507
Σ Nov-Apr	333	192	261	248	184	265	300	301	221	123	333	288	225
Absickerung [mm]													
U-Feld													Ø 2002-2014 = 110,5 mm
													Ø 2004-2014 = 77,3 mm
Σ Jahr	401	185	97	147	82	80	75	81	64	33	29	126	37
Σ Mai-Okt	121	27	15	21	24	25	19	44	21	2	5	77	15
Σ Nov-Apr	280	158	81	126	58	55	56	37	43	31	24	49	22
K-Feld													Ø 2004-2014 = 119,64 mm
Σ Jahr			127	212	108	124	125	154	167	68	50	143	40
Σ Mai-Okt			22	31	30	25	21	56	37	7	8	75	15
Σ Nov-Apr			105	181	78	99	104	98	130	61	42	68	25

3.6.2.2. Einflüsse von Wetter und Witterung auf die Sickerwassermenge

Wie bereits im Abschnitt Bodenwassergehalte (3.6.1) gezeigt wurde, beeinflussen Klima, Witterung und Wetter die Wasserhaushaltsfunktion der Rekultivierungsschicht mit ihrem Bewuchs. Im folgenden Abschnitt wird am Beispiel der Jahre 2013 und 2014 die Bedeutung und Dimension des Witterungseinflusses auf die Sickerwassermengen während der Projektlaufzeit verdeutlicht.

Jahr 2013

Im Jahr 2013 traten zwei Ereignisse mit außergewöhnlich hohen Niederschlagsmengen auf (Abbildung 3-23): Ende Mai/Anfang Juni (92,4 mm am 31.5./1.6.) und Ende Juli (ca. 130 mm in 6 Tagen, davon 93,2 mm am 28./29.7.). Bei letzteren Regenereignis wurden im Zeitraum von 24 Stunden (28.7., 15.30 - 29.7., 15.30 Uhr) 86,8 mm Niederschlag gemessen, was nach BARTELS et al. (2005) für den Standort Leonberg in der Größenordnung einem 100jährigen Regenereignis ($T = 100$ a) entspricht. Beim ersten Ereignis war die Niederschlagsmenge von 92,4 mm auf 48 Stunden verteilt; somit liegt auch dieses Ereignis in der Größenordnung von $T = 100$ a. Die Lysimeterfelder reagierten hinsichtlich der Sickerwassermengen sehr unterschiedlich auf diese Starkniederschlagsereignisse:

- Im Anschluss an das Regenereignis im Mai/Juni versickerten im Zeitraum 31.5.-7.6. aus dem U-Feld circa 33 mm und aus dem K-Feld circa 34 mm (siehe Abbildung 3-23). Die in diesem Zeitraum angefallene Wassermenge (siehe Tabelle 3-5) entspricht somit der gesamten Jahressickerwassermenge des Lysimeterfeldes U in 2010

⁸ Werte der DWD-Station „Renningen Ihinger Hof“ und der eigenen Station am Fuß der Testfelder

oder 2011 (vergleiche Abbildung 3-29). Auch die maximalen täglichen Sickerwassermengen von circa 12 mm/d in beiden Testfeldern (Abbildung 3-23) erreichten fast die bislang gemessenen Höchstwerte vom 16.03.2005 (U-Feld 12,9 mm/d und K-Feld 15,0 mm/d). Sie lagen damit weit über den in den letzten Jahren festgestellten Werten (siehe auch Abbildung 3-24).

- Im Gegensatz dazu verursachte die zweite niederschlagsreiche Phase im Juli nur Sickerwassermengen von circa 2 mm aus dem U-Feld und 2,5 mm aus dem K-Feld.

Tabelle 3-5: Jahressumme und Monatssummen des Niederschlags (N) und der Absickerung aus den Lysimeterfeldern U (As U) und K (As K) im Jahr 2013

[mm]	Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
N	833,8	9,4	51,5	34,4	73,5	138,6	101,0	136,2	64,7	43,3	62,4	65,7	53,1
As U	126,1	2,6	10,9	8,9	15,7	35,0	33,4	2,4	1,1	1,7	3,5	5,8	5,0
As K	142,8	5,1	17,9	14,3	19,1	35,5	32,2	2,6	0,1	0,8	3,9	5,3	5,9

Als wesentliche Gründe für diese unterschiedliche Reaktion auf die sehr ähnlich hohen Niederschlagsmengen kommen in Frage:

- Im Mai 2013 war der Boden durch vorangegangene Niederschläge fast bis zur Feldkapazität gesättigt (siehe Abbildung 3-18 ff), so dass nur noch wenig weiteres Wasser aufgenommen werden konnte. Dies zeigt sich auch an den großen Sickerwassermengen bereits im April 2013 (Tabelle 3-5). Im Juli dagegen ging den Starkniederschlägen eine längere Phase geringer Niederschlagsmengen voraus, so dass der Boden tiefer ausgetrocknet war (siehe z.B. Abbildung 3-18).
- Verschärft wurde die Situation durch das sehr kühle Frühjahr 2013⁹. Die Vegetation war daher im Mai weniger weit entwickelt als in anderen Jahren, so dass die Verdunstung und damit der Wasserentzug aus dem Boden zu dieser Zeit mutmaßlich geringer als in anderen Jahren war, was sich in höheren Bodenwassergehalten niederschlägt.
- Andere Ursachen, wie zum Beispiel Vegetationsschäden, wurden nicht festgestellt und sind nicht anzunehmen, da die Sickerwassermengen nach den außergewöhnlichen Regenereignissen im Mai/Juni wieder auf das übliche Maß zurückgingen (Abbildung 3-23).

Im Vergleich zu den Vorjahren mit tendenziell immer geringer werdender Absickerung war im Jahr 2013 bedingt durch dieses Ereignis in beiden Lysimeterfeldern ein erheblicher Anstieg der Sickerwassermenge zu verzeichnen. Zwar lag der Jahresniederschlag mit insgesamt 833,8 mm über dem Niveau des langjährigen Mittels (siehe Abbildung 3-29), jedoch kam es auch bei ähnlich hohen oder höheren Jahresniederschlägen in der Vergangenheit nicht zu solchen Sickerwassermengen, siehe die Jahre 2007, 2009 und 2012 in Tabelle 3-4.

⁹ Das Mittel der Lufttemperatur auf der Deponie Leonberg von März bis Mai betrug 2013 nur 6,6 °C, im Vergleich dazu: 2012 = 9,9 °C; 2011 = 10,8 °C; Mittel 2005-2012 = 9,5 °C

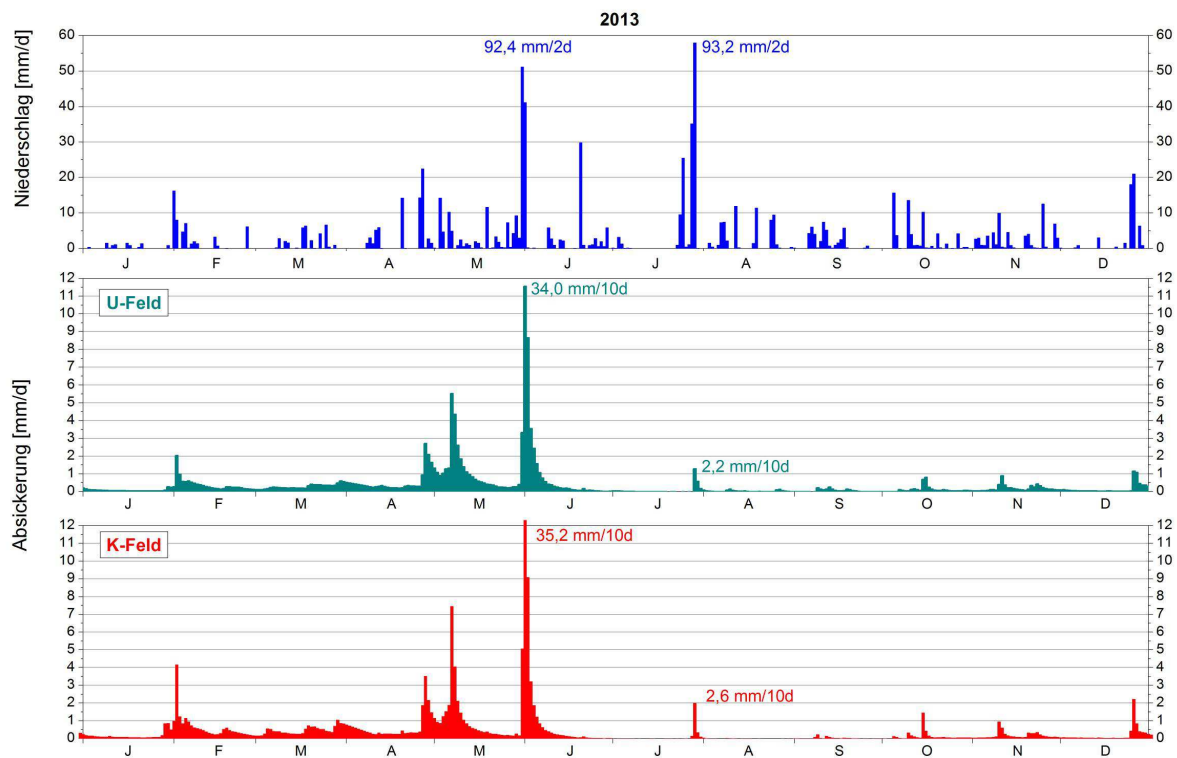


Abbildung 3-23: Tageswerte des Niederschlags und der Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K im Jahr 2013; weiterhin angegeben sind die Summen (N, As) der Starkniederschlagsereignisse.

Jahr 2014

Das Jahr 2014 war bundesweit das wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen; auch in Baden-Württemberg war es mit 10,2 °C Jahresdurchschnitt (DWD 2014) ebenso wie in Leonberg (Testfeldstation 10,2 °C) überdurchschnittlich warm.

Tabelle 3-6: Jahressumme und Monatssummen des Niederschlags (N) und der Absickerung aus den Lysimeterfeldern U (As U) und K (As K) im Jahr 2014

[mm]	Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
N	731,5	33,4	35,3	10,2	47,8	64,5	23,5	159,8	136,4	75,2	47,0	55,8	42,6
As U	37,1	6,1	5,0	1,5	2,0	2,1	0,1	2,1	3,0	6,5	1,2	4,7	2,8
As K	39,7	6,4	6,5	2,6	1,9	1,2	0,1	1,8	3,2	6,3	1,9	5,3	2,5

Die Niederschlagssumme des Jahres 2014 war mit 731,5 mm eher unterdurchschnittlich, allerdings waren die Niederschlagsmengen relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt (Tabelle 3-6, Abbildung 3-24). Monate mit hohen Niederschlagsmengen waren Juli und August. Im Jahr 2014 fehlten vergleichbare Starkniederschlagsereignisse wie 2013.

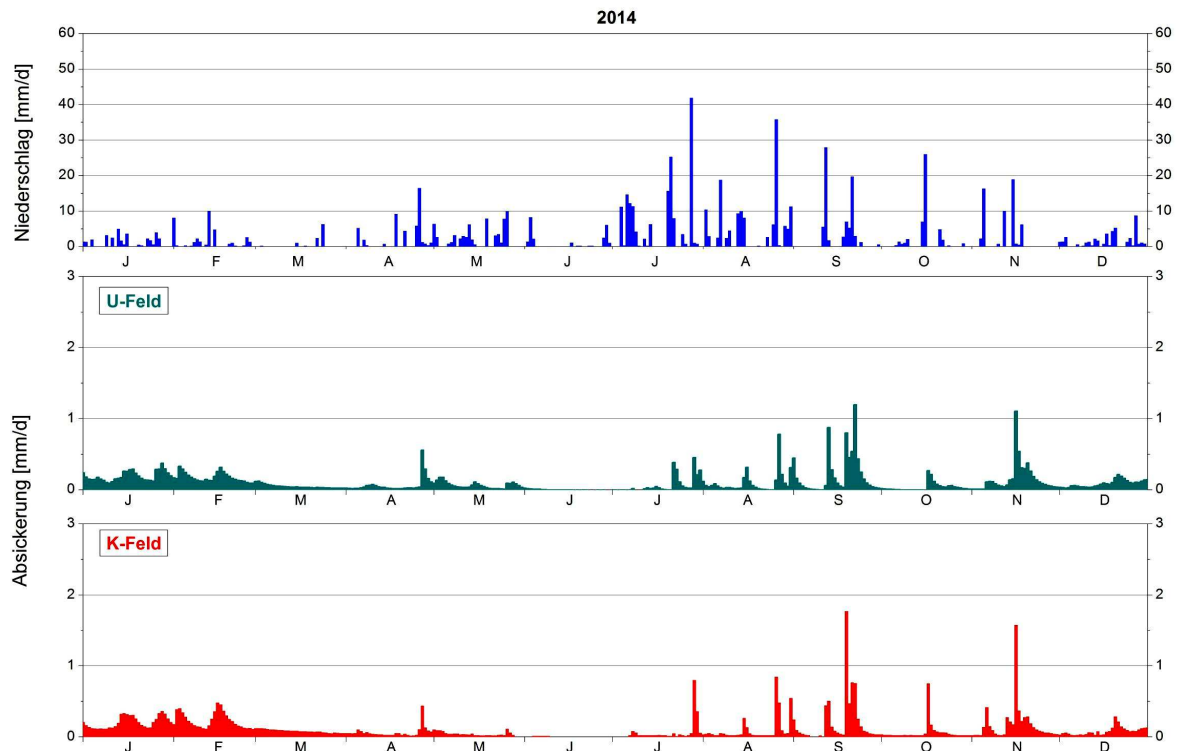


Abbildung 3-24: Tageswerte des Niederschlags und der Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K im Jahr 2014; zu beachten: die Ordinatenachsen der Absickerung sind in dieser Abbildung anders skaliert als in Abbildung 3-23.

Moderate Niederschlagsmengen im Winter 2012/13 sowie der im Gegensatz zu 2013 milde Frühling, in dem sich die Vegetation 2014 relativ zügig entwickeln konnte, führten dazu, dass die Unterböden der Lysimeterfelder außerhalb und zu Beginn der Vegetationszeit nicht bis zur Feldkapazität aufgesättigt waren (siehe 3.6.1). Die Sickerwassermengen blieben daher in beiden Feldern im Januar und Februar unter 6,5 mm/Monat. Ab März wurde der Bodenspeicher zügig entleert und die Sickerwassermengen blieben bis September auf relativ niedrigem Niveau. Allerdings waren wegen der hohen Niederschlagsmengen im Juli und August im Sommer 2014 nur relativ kurze Phasen ohne Absickerung mit Schwerpunkt im Juni zu verzeichnen. Die maximale tägliche Sickerwassermenge aus dem U-Feld belief sich auf 1,2 mm/d, die aus dem K-Feld 1,8 mm/d (Abbildung 3-24).

3.6.2.3. Einfluss der Bodeneigenschaften der Lysimeterfelder auf die Absickerung

Für den Zeitraum von 2003 bis 2013 wurde eine differenzierte Auswertung der Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abflüssen aus beiden Lysimeterfeldern durchgeführt, um den Einfluss der aus den unterschiedlichen Einbauverfahren resultierenden Bodeneigenschaften herauszuarbeiten. Die Betrachtung von längeren Zeiträumen zeigt:

- Die Absickerung nach der sommerlichen Trockenheit setzt im K-Feld im Spätherbst regelhaft früher als im U-Feld (Abbildung 3-25 a.) ein: Als Gründe kommen der geringere Bodenspeicher im K-Feld und eine stärkere Austrocknung des U-Feldes in Frage

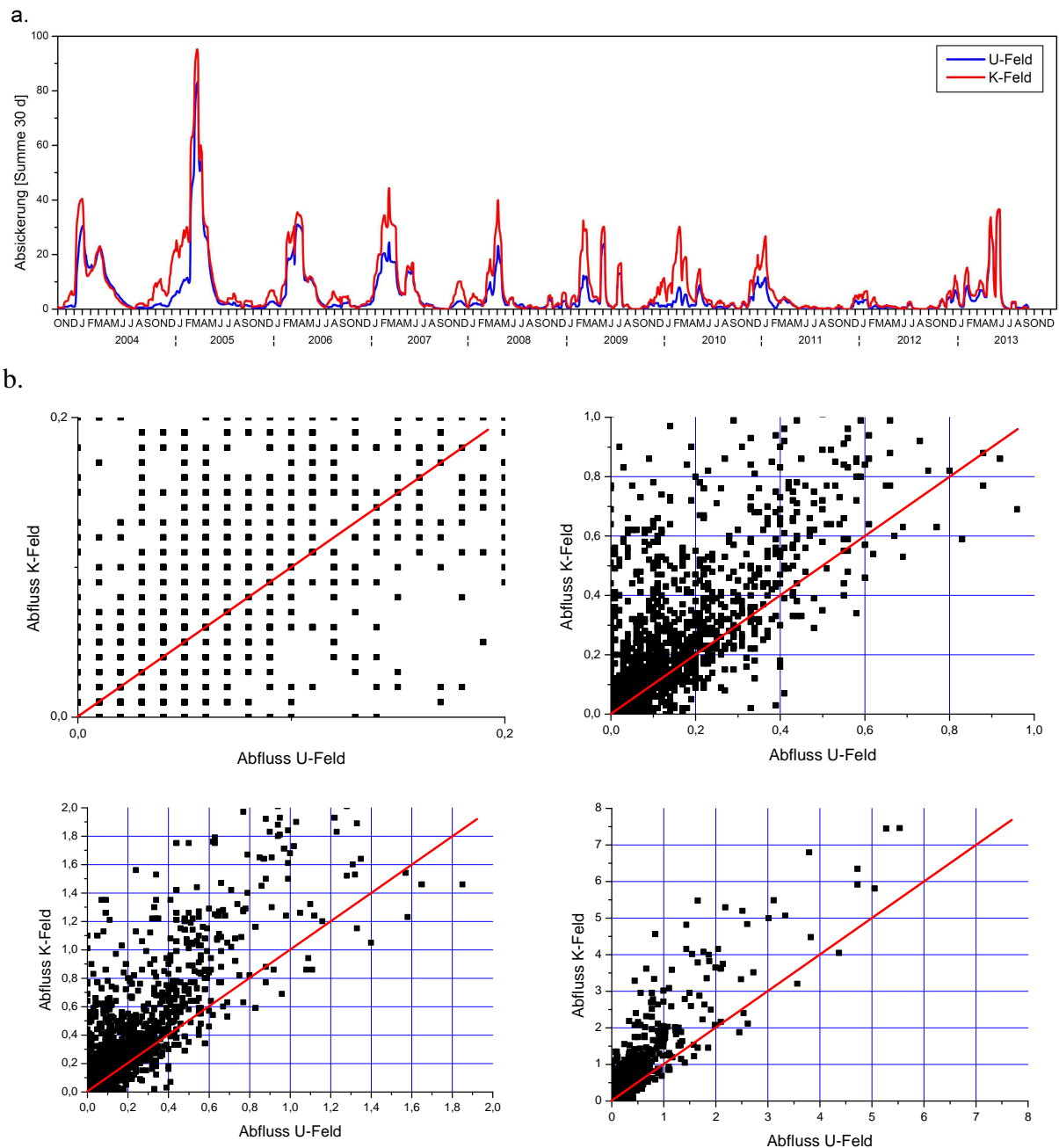


Abbildung 3-25: a. Absickerung aus U- und K-Feld von 2004 bis 2013; um die Ganglinien zu glätten sind 30-Tagesummen aufgetragen.
 b. Korrelation der Sickerwassermengen des U- und des K-Feldes, 2007-2013 (Tageswerte); die rote Linie ist die 1:1 Gerade.

- Bei größeren Sickerwassermengen sind die Abflüsse aus dem U-Feld nur sehr selten größer als aus dem K-Feld und dann auch nur geringfügig (Abbildung 3-25 b., unten). Bei kleineren Mengen ist dies anders: Bei Abflüssen unter 0,2 mm/d (Abbildung 3-25 b., links oben) besteht nahezu ein gleiches Verhältnis.
- Die Korrelation der Abflüsse aus U- und K-Feld ist sehr hoch (R^2 um 0,8). Sie hat sich im Lauf der Jahre praktisch nicht verändert (7.2003 - 6.2008: $R^2 = 0,81$; 7.2008 - 6.2013: $R^2 = 0,79$).

- Die Korrelation zwischen der Absickerung aus beiden Lysimeterfeldern und dem Niederschlag ist für den Zeitraum 2003 bis 2013 sehr niedrig (K-Feld: $R^2=0,04$, U-Feld: $R^2 = 0,03$). Nur bei Starkniederschlagsereignissen mit circa 40 mm/d oder mehr scheinen die Abflüsse von U und K besser zu korrelieren (Abbildung 3-26).

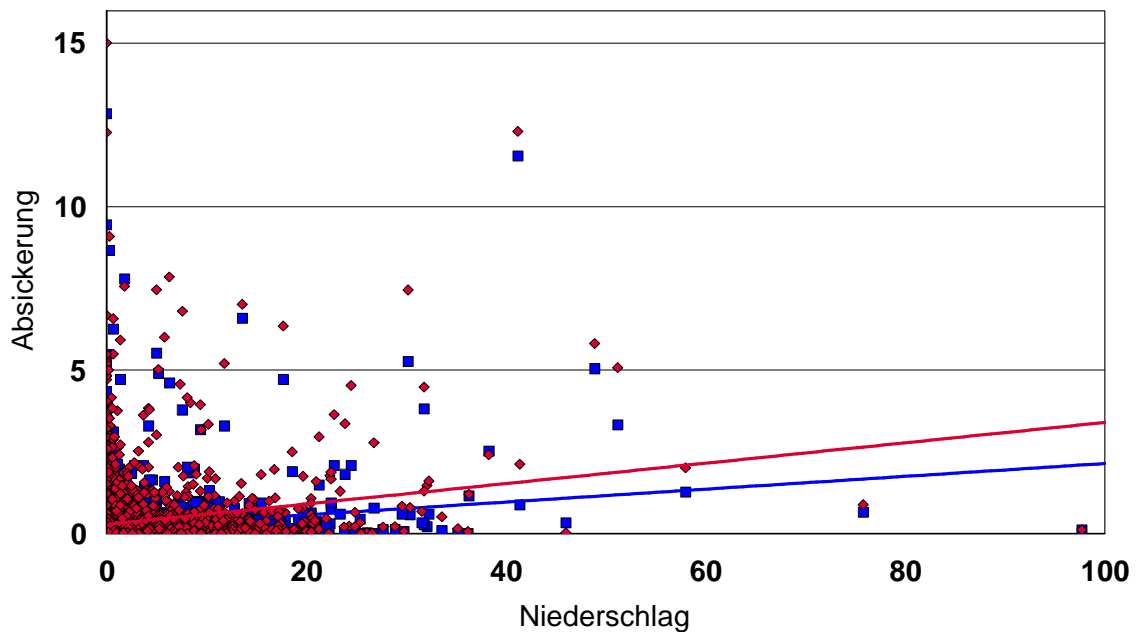


Abbildung 3-26: Korrelation zwischen Absickerung und Niederschlag [Werte in mm] für beide Felder von 2003 bis 2013; K (rot): $R^2=0,04$, U (blau): $R^2 = 0,03$

- Die Anzahl der Tage ohne Absickerung (Nullabflüsse) hat in beiden Feldern im Lauf der Jahre erheblich zugenommen, dies zeigt ein Vergleich der Häufigkeiten in zwei Fünfjahreszeiträumen (Abbildung 3-27).

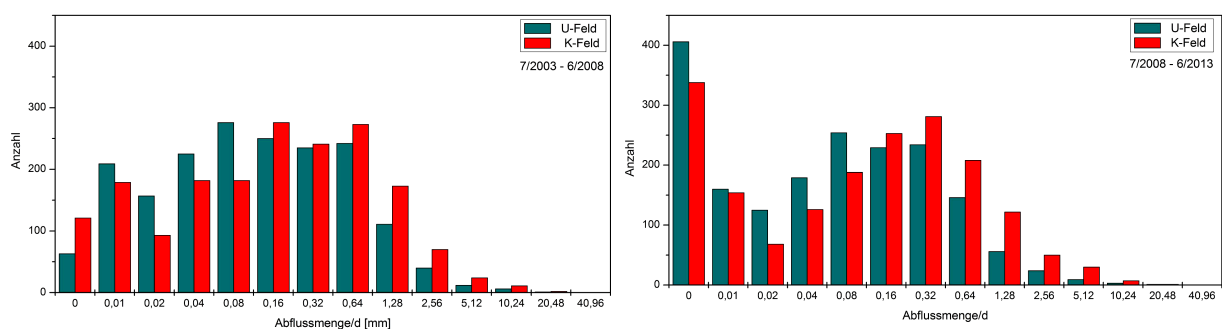


Abbildung 3-27: Häufigkeitsverteilung der täglichen Sickerwassermengen [mm] in den ersten fünf Jahren (links) und in der zweiten fünf Jahren (rechts) des Testfeldbetriebs

- Nicht immer entsteht nach Niederschlagsereignissen Sickerwasser aus den Lysimeterfeldern; bei geringen Niederschlagsmengen und geringer Intensität oder teilgesättigtem Boden erfolgt häufig keine Reaktion auf Regenereignisse. Eine

Auswertung der Reaktionszeiten¹⁰ der Lysimeterfelder auf Niederschlag zeigt, dass die Absickerung aus den Feldern mit in sehr unterschiedlicher Verzögerung einsetzen kann. In den meisten Fällen reagieren die Lysimeterfelder innerhalb von 3 bis 5 Stunden auf Niederschlagsereignisse mit einem Anstieg der Sickerwassermenge. Bei geringen Niederschlagsmengen steigt die Sickerwassermenge aus Feld U manchmal überhaupt nicht an, aus Feld K mit einer Verzögerung von circa 5 Stunden. Große Niederschlagsmengen können zur schnelleren Sickerwasserbildung innerhalb von circa 1 bis 2 Stunden führen, auch dann, wenn der Boden relativ trocken ist (siehe Abbildung 3-28).

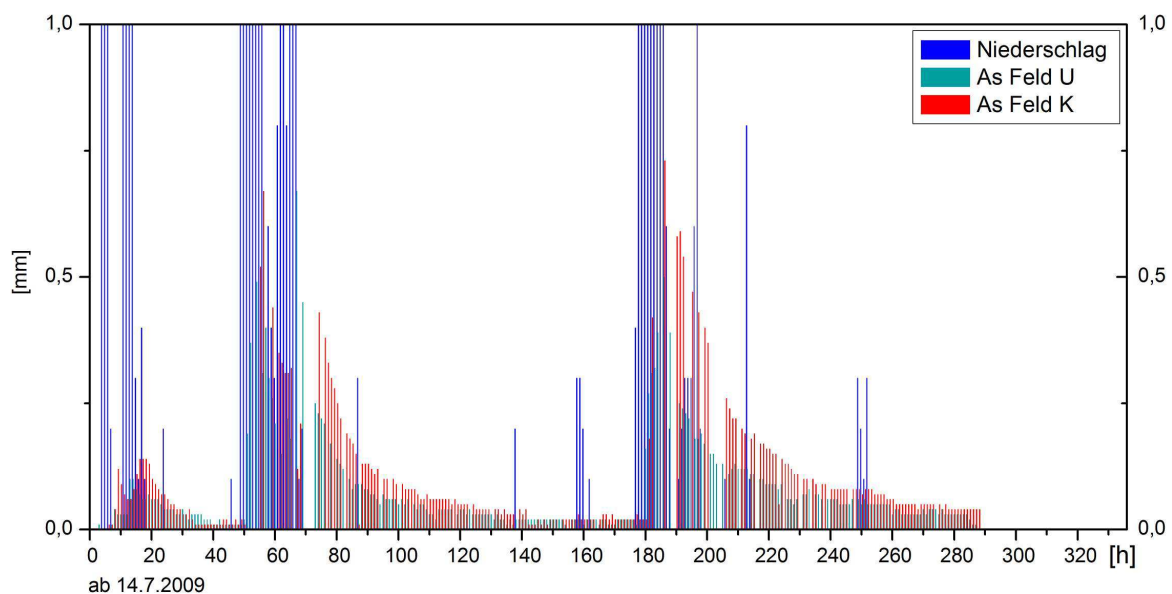


Abbildung 3-28: Reaktion der Leonberger Lysimeterfelder: Niederschlag und Absickerung [mm/30 min] bei einem Regenereignis am 14.7.2009

- In den meisten Fällen entsteht in Feld K zu Beginn der Reaktionsphase deutlich mehr Sickerwasser als in Feld U, danach geht die Sickerwassermenge kontinuierlich zurück. Hierbei ist die Reaktion der Felder uneinheitlich, manchmal überwiegt die Sickerwassermenge in Feld K, manchmal in Feld U.

3.6.2.4. Entwicklung der Sickerwassermengen

In Tabelle 3-4 und Abbildung 3-22 sind Zeitreihen der jährlichen beziehungsweise saisonalen Absickerungsmengen und der Absickerungsraten aus den Leonberger Lysimeterfeldern seit 2002 (U-Feld) und 2004 (K-Feld) dargestellt. Es ist für beide Testfelder grundsätzlich von einer ähnlich gerichteten Tendenz auszugehen: In beiden Feldern nahmen die Sickerwassermengen im Lauf der Jahre ab (vergleiche auch Abbildung 3-27) - im U-Feld allerdings schneller als im K-Feld. Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf das Lysimeterfeld U, da von diesem die längere Zeitreihe vorliegt.

¹⁰ Der Zeitraum zwischen Beginn des Niederschlags und der Absickerung aus den Lysimeterfeldern.

Die Absickerungsraten aus Lysimeterfeld U betragen im Jahr 2002 circa 45 % (401 mm) und 2003 immerhin 37 % (185 mm) des Jahresniederschlags (Abbildung 3-22). In den Jahren 2007 und 2008 versickerten jeweils circa 10 %, 2009 und 2010 circa 8 % der Jahresniederschlagsmenge. Im sehr niederschlagsarmen Jahr 2011 waren es noch 6,8 % und in 2012 noch 3,6 % (29 mm). Es zeigt sich, dass die absoluten Sickerwassermengen - mit Ausnahme 2013 - im Lauf der Jahre deutlich zurückgegangen sind.

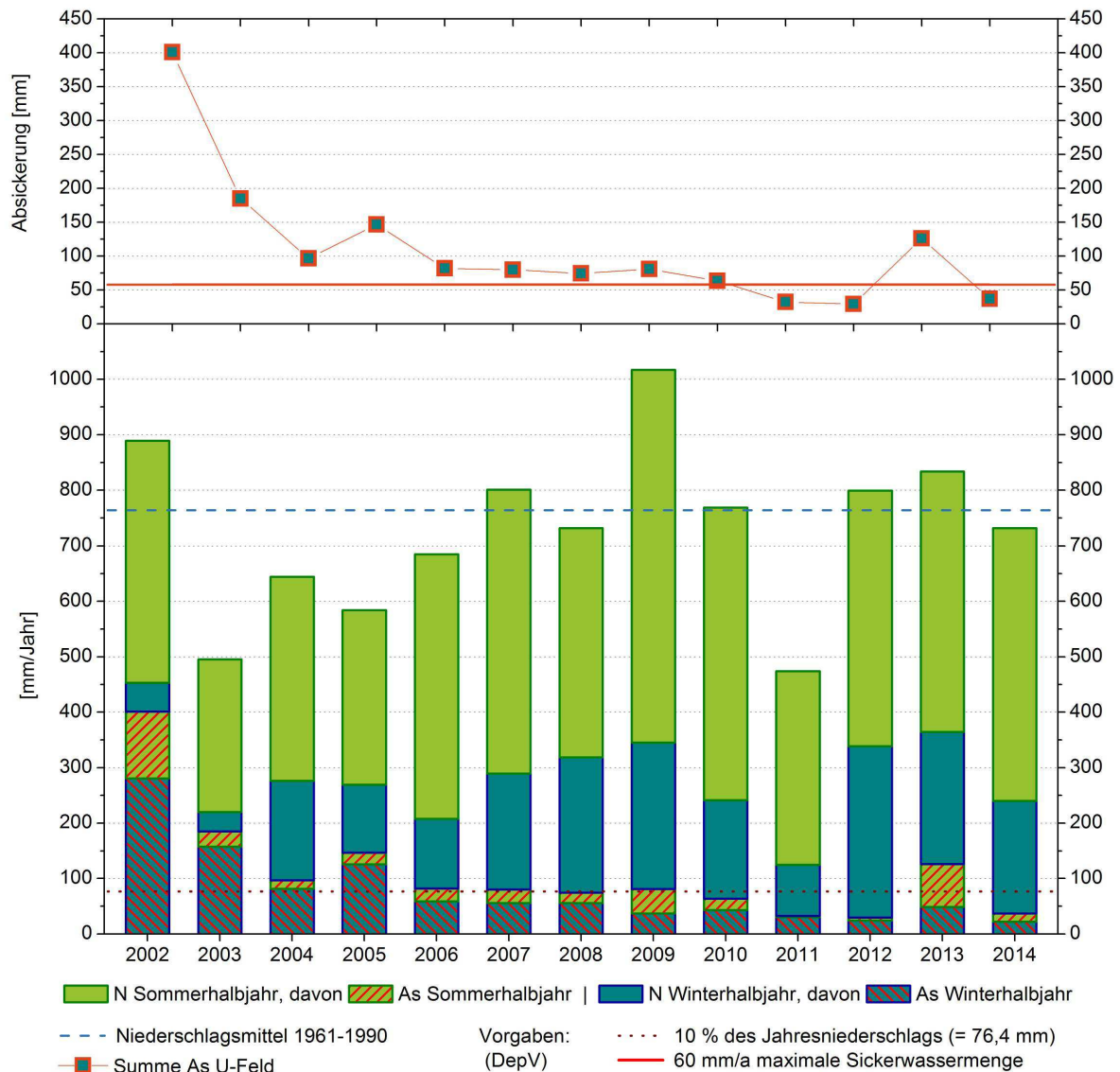


Abbildung 3-29: Niederschlag und Absickerung aus Lysimeterfeld U, Jahressummen 2002 bis 2014; Sommerhalbjahr: 1.05. - 31.10., Winterhalbjahr: 1.11. - 30.04.

Hierbei ist keine kontinuierliche Abnahme zu verzeichnen, sondern es lassen sich drei Phasen unterscheiden:

- a. Bis 2005 liegen die jährlichen Sickerwassermengen mit grundsätzlich abnehmender Tendenz deutlich über 10 % des langjährigen Niederschlagsmittels. Dies ist trotz stark unterdurchschnittlicher jährlicher Niederschlagsmengen in den Jahren 2003 bis 2005

der Fall - sie betragen im Mittel für diese drei Jahre nur 574 mm und somit circa 75 % des Mittelwerts der Periode 1961-90.

- b. Ab 2006 beginnt eine Phase mit geringerer Absickerung und Anteilen um 10 % der langjährigen mittleren Jahresniederschlagsmenge von 76,4 mm/a. Es ist davon auszugehen, dass die Verringerung der Sickerwassermengen durch die ansteigende Verdunstungsleistung der Gehölze bedingt wird. Der Übergang von der ersten zur zweiten Phase ist wegen stark unterdurchschnittlicher Niederschlagsmengen in den Jahren 2003 bis 2005 (Abbildung 3-29) wenig deutlich ausgeprägt.
- c. Seit 2011 liegen die Sickerwassermengen des U-Feldes - mit Ausnahme von 2013 - unter 60 mm pro Jahr.

In Abbildung 3-29 ist die saisonale Verteilung von Niederschlag und Absickerung gezeigt, um den Einfluss der sich entwickelnden Gehölze (siehe auch Abbildung 3-13) zu verdeutlichen: Trotz der meist höheren Niederschläge (Ausnahme 2011) sind die Sickerwassermengen nach 2006 mit Ausnahme von 2013 stets niedriger als in der ersten Phase, was nur durch höhere Transpiration der Pflanzen erklärt werden kann. Auch in den Winterhalbjahren der zweiten Phase fällt nur noch wenig Sickerwasser an; auch dieser Effekt ist mit dem höheren Wasserverbrauch und daraus resultierender stärkerer und tieferer Entwässerung der Rekultivierungsschicht durch die größeren und tiefer wurzelnden Pflanzen erklärbar. Nach der sommerlichen Austrocknung werden erhebliche Wassermengen benötigt, um den in Leonberg mit circa 700 mm Feldkapazität sehr großen Bodenwasserspeicher wieder soweit aufzusättigen, dass kontinuierlich Wasser versickern kann. Die stärkere Austrocknung des Bodens im Sommer (siehe 3.6.1) beeinflusst damit bei günstigen Bodeneigenschaften den Wasserhaushalt fast des gesamten Jahres.

Allerdings modifizieren die saisonale Niederschlagsverteilung, Wetterereignisse (insbesondere Starkniederschläge) und die Witterung (anhaltende Nassphasen) diesen prinzipiellen Trend fallweise, so dass es in einzelne Jahren zu deutlichen Abweichungen kommt (siehe Abbildung 3-29):

- So führten hohe Verdunstung und geringer Niederschlag des „Jahrhundertsommers“ 2003 noch im Folgejahr 2004 zu reduzierten Sickerwassermengen (Tabelle 3-4). Im Winter 2003/04 wurde zuerst der tief entleerte Bodenwasserspeicher aufgefüllt, so dass im Januar und Februar 2004 nur geringe Sickerwassermengen auftraten.
- Im Jahr 2005 war ein sehr hoher Anteil an Winterniederschlägen zu verzeichnen, der vor allem durch große Sickerwassermengen im März (66 mm) und April (39 mm) verursacht wurde. Bestimmte Niederschlagsereignisse konnten nicht als Ursache für diese sehr hohen Absickerungsraten identifiziert werden.
- Im Gegensatz dazu führten große Regenmengen im Mai, August und September 2009 zu einer Niederschlagssumme im Sommerhalbjahr von 716 mm. Hierdurch stieg der Anteil der sommerlichen Absickerung auf über 54 % der Gesamtsickerung, die jedoch mit 81 mm/a nur geringfügig über dem vorausgegangenen und dem folgenden Jahr lag.

- Die Situation im Jahr 2013 wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt analysiert. In Abbildung 3-29 fällt auf, dass aufgrund der beschriebenen Ereignisse, entgegen der Tendenz der Vorjahre, der größte Teil des Sickerwassers (über 60 %) im Sommer anfiel. Zuvor hatte die Absickerung im Sommer auch bei höheren Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr (siehe z. B. 2009 oder 2010) nur einen geringen Anteil an der Gesamtsickerwassermenge. Auch 2014 war der Sommeranteil der Absickerung aufgrund der Witterung (s.o.) relativ hoch.

3.6.3. Fazit Wasserhaushalt

Der Vergleich der beiden Leonberger Lysimeterfelder zeigt bei Betrachtung der bisherigen Gesamtsummen (1.6.2003 - 31.12.2014) eine um circa 30 % niedrigere Sickerwassermenge aus Feld U mit unverdichtetem Boden. Aufgrund der Vegetations- (und Boden-) entwicklung sind die anfänglich sehr hohen Sickerwasserraten in beiden Testfeldern deutlich zurückgegangen. und liegen im Jahr 2014 erstmals auf dem gleichen Niveau.

Wie der Vergleich der Absickerung und der Bodenwassergehalte zeigt, entsteht Sickerwasser in Winter-Halbjahren regelmäßig durch Aufsättigung des Bodens bis zur Feldkapazität. Im Sommer dagegen reagieren die Lysimeterfelder auch dann schnell auf Niederschlagsereignisse, wenn der Boden nicht aufgesättigt ist; es besteht daher keine enge Beziehung zwischen Sickerwasser und Bodenwassergehalten. In diesem Fall sind in Leonberg schnelle Flüsse in Makroporen anzunehmen, deren Anteil schwer quantifizierbar ist. Die fallweise recht schnelle - aber in der Höhe sehr stark reduzierte - Reaktion beider Lysimeterfelder auf Niederschlagsereignisse zeigt den Einfluss des schnell dränierenden Sekundärporensystems auf die Absickerung. Dieser Einfluss dürfte auf Grund der Bodenverdichtung im K-Feld größer sein (siehe DGGT 2000a) und kommt neben der geringeren Verdunstung der weniger wüchsigen Gehölze als Mitursache der höheren Absickerungsraten in Frage. Diese Wirkung zeigt sich auch in den höheren maximalen täglichen Sickerwassermengen des K-Feldes. Dass es sich bei den schnellen Abflüssen in Sekundärporen nicht um sogenannte Umläufigkeiten, also Fehlstellen am Rand der Lysimeterfelder handelt, schließt einerseits die besondere Bauweise der Leonberger Testfelder aus (siehe WATTENDORF et al. 2005) und beweisen andererseits die sehr stark gedämpften Reaktionen sowie die vielen Niederschlagsereignisse ohne sofortigen Anstieg der Absickerung. Die schnellen Abflüsse verursachen ereignisbedingt fallweise höhere Sickerwasserraten, weil der Bodenwasserspeicher als Puffer teilweise umgangen wird. Ihnen könnte nur durch die Verwendung von nicht schrumpfungsanfälligem Bodenmaterial entgegengewirkt werden, dieses ist jedoch in Baden-Württemberg in vielen Regionen praktisch nicht verfügbar.

Die Ergebnisse der Sickerwassermessungen der beiden Leonberger Lysimeterfelder zeigen, dass die entsprechenden Vorgaben der DepV für Wasserhaushaltsschichten

- Sickerwassermenge unter 10 % des Jahresniederschlags,
- höchstens aber 60 mm/a

2010 fast erreicht werden konnten (64 mm) und erstmals 2011, also mehr als 10 Jahre nach Bau der Testfelder eingehalten werden konnten. Dies gilt jedoch nur für Testfeld U mit unverdichtetem Boden. In Lysimeterfeld K wurde die Grenze von 60 mm in den Jahren 2012 und 2014 unterschritten.

Abweichend von der vorbeschriebenen Tendenz wurden im Jahr 2013 in beiden Testfeldern, vor allem aufgrund eines Starkniederschlagsereignisses mit circa 93 mm/48 h, diese Vorgaben nicht erreicht. Nach DWD (2005) könnte dieses Ereignis für Leonberg eine Jährlichkeit von $T = 100$ a besitzen und es könnte somit bei der Beurteilung der Funktionsfähigkeit gemäß Pkt. 2 BQS 7-2 (2011) ausgenommen bleiben (siehe hierzu die Diskussion in 4.). Jedoch wurde der Grenzwert von 60 mm Absickerung/a nicht allein aufgrund dieses Ereignisses überschritten, sondern überwiegend durch die ungünstige nass-kalte Witterung im Frühjahr 2013, das Starkniederschlagsereignis verschärfte diese Situation lediglich nochmals.

Die Messergebnisse der Sickerwassermengen seit Fertigstellung der Testfelder decken sich gut mit der in Kap. 3.5.1 beschriebenen Gehölzentwicklung in Leonberg (siehe Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15) sowie auch mit anderen Beobachtungen zu Gehölzentwicklung und Sickerwassermengen wie beispielsweise auf Testfeldern der Deponie Georgswerder (siehe WATTENDORF & SOKOLLEK 2003).

Es ist aktuell nicht abzuschätzen, ob und inwieweit die zukünftige Gehölzentwicklung die zurzeit erreichte Wirksamkeit der Rekultivierungsschicht in Leonberg noch wesentlich steigern kann. In durchschnittlichen Jahren ist demnach davon auszugehen, dass die in der DepV gemachten Vorgabe von jährlich höchstens 60 mm Absickerung im langjährigen Mittel eingehalten werden kann. Wie die Ergebnisse des Jahres 2013 zeigen, ist dies jedoch keineswegs in jedem Jahr möglich, sondern ein kurzzeitiges Überschreiten dieser Grenze dürfte auch zukünftig bei entsprechendem Wetter und Witterungsverlauf möglich sein.

4. Diskussion

4.1. Erkenntnisse für die Praxis

Die Versuche in Leonberg zeigen, dass - unter Berücksichtigung der unter 4.2 genannten Einschränkungen - in mäßig niederschlagsreichen Gebieten (bis circa 700 mm/a) Wasserhaushaltsschichten mit günstigen Bodeneigenschaften grundsätzlich eine Dichtungsfunktion gemäß DepV/BQS 7-2 übernehmen können. Rekultivierungsschichten, die aufgrund ihrer Bodeneigenschaften eine hohe (nutzbare) Wasserspeicherkapazität besitzen und einen hohen Wasserverbrauch durch günstige Vegetationsentwicklung ermöglichen, können sehr niedrige Sickerwassermengen erzielen.

Dies gilt vor allem für das unverdichtet eingebaute Feld U der Leonberger Lysimeterfelder, aber auch – mit gewissen Einschränkungen – für Feld K. Das bessere Wachstum der Bäume im U-Feld induziert relativ feine, aber bedeutsame Unterschiede in den Standorteigenschaften der beiden Testfelder, die sich mit üblichen bodenkundlichen Messungen nur unzureichend belegen lassen (WATTENDORF et al. 2009). Sie sind somit in jedem Fall ein Argument für Boden schonende Verfahren bei der Herstellung von Rekultivierungsschichten, insbesondere den ungeschichteten (s.u.) Einbau mit möglichst geringer Verdichtung. Die Unterschiede zwischen den Beständen im K- und U-Feld (siehe 3.5) wirken sich auch deutlich auf den Wasserhaushalt der Lysimeterfelder aus. Der besser entwickelte Gehölzbestand im U-Feld verbraucht mehr Wasser, hierdurch reduziert sich in der Summe die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht des U-Feldes deutlich (siehe z.B. WATTENDORF et al. 2010). Zwar sind diese Unterschiede in den letzten Jahren geringer geworden, aber auch in 2013 und 2014 lag die Sickerwassermenge des K-Feldes um circa 10 % über der des U-Feldes (siehe 3.6.2).

Beim Vergleich der Leistung der beiden Leonberger Lysimeterfelder ist allerdings zu beachten, dass auch Feld K mit konventionell verdichtet eingebauter Rekultivierungsschicht das gleiche, sehr hochwertige Bodenmaterial mit großer nutzbarer Wasserspeicherkapazität enthält wie Feld U, weil im Versuch ausschließlich der Einfluss des Einbauverfahrens betrachtet werden sollte. Tatsächlich „konventionell“ ausgeführte Rekultivierungsschichten werden in der Praxis nach wie vor häufig aus weniger gutem (höhere Ton- und vor allem Steingehalte) und zusätzlich verdichtetem Bodenmaterial hergestellt. Die bislang gemessenen Unterschiede zwischen den Feldern wären bei einem konventionellen Vergleichsfeld unter Verwendung weniger günstigen Bodenmaterials mit geringerer nutzbarer Wasserspeicherkapazität erheblich größer ausgefallen.

In diesem Zusammenhang halten wir es für wichtig zu erwähnen, dass die Anforderungen der DepV hinsichtlich der nutzbaren Wasserspeicherkapazität (nWSK/nFk) der Rekultivierungsschicht mit 140 mm bezogen auf die gesamte Schichtmächtigkeit insofern wenig zielführend oder sogar kontraproduktiv sind, dass keine Bewertung der Durchwurzelbarkeit, der tatsächlichen Durchwurzelungstiefe oder der effektiven Durchwurzelungstiefe in die Berechnung eingeht. Bei den heute üblichen Schichtmächtigkeiten von mindestens 1,5 m bis (meistens) 2 m kann mit nahezu jedem beliebigen Bodenmaterial, vorausgesetzt, die Stein-

gehalte sind nicht allzu hoch, die erforderliche nFk erreicht werden¹¹. Im Interesse einer nachhaltigen Umweltvorsorge über den Zeitraum der Lebensdauer technischer Dichtungselemente (mindestens 100 Jahre) hinaus sollten daher in der Praxis die Vorgaben für die nutzbare Wasserspeicherkapazität im anzunehmenden Wurzelraum der Rekultivierungsschicht angestrebt werden.

Aus den Leonberger Versuchen lassen sich folgende Empfehlungen für die Baupraxis von Rekultivierungsschichten ableiten:

- Der Auswahl geeigneter Bodenarten kommt die größte Bedeutung im Hinblick auf die Wasserhaushaltsfunktion zu. Hierbei sind die bestehenden Empfehlungen (z.B. BÖNECKE 1997, BQS 7-1) zu berücksichtigen.
- Ein zweischichtiger Aufbau (wie z.B. in BQS 7-1, 4.1 vorgegeben) unter Verwendung von bis zu 30 cm humosem Oberboden ist nicht erforderlich. Der Auftrag bereits geringer Kompostmengen – wie auf den Leonberger Lysimeterfeldern –, gegebenenfalls ergänzt durch eine mineralische Düngung, reicht aus, um eine günstige Boden- und Vegetationsentwicklung in Gang zu bringen. Da humoser Oberboden meist teuer und schwer zu beschaffen ist, sind hier Kostenreduktionen ohne Qualitätseinbußen möglich. Wir erachten es als besser, gegebenenfalls mehr Mittel in günstigeres mineralisches Bodenmaterial zu investieren.
- Eine mit Verbesserungen der Bodeneigenschaften verbundene Bodenentwicklung kann nur für die oberflächennahe Bodenschicht (bis circa 30 cm Tiefe) in Zeiträumen von wenigen Jahrzehnten prognostiziert werden. Verbesserungen der physikalischen Eigenschaften des Unterbodens durch Bodenentwicklung sind auf absehbare Zeit nicht zu erwarten. Alle durch den Einbau bedingten Schädigungen wie Verdichtung oder Bildung von Grenzschichten sind somit praktisch irreversibel.
- Hieraus ergibt sich die Verantwortung, in Abstimmung der unterschiedlichen Erfordernisse wie Materialauswahl, Standsicherheitsverhalten etc. den Erdbau so Boden schonend wie möglich zu bewerkstelligen. Insbesondere sollen Verdichtungen auf das unbedingt notwendige Maß reduziert werden.
- Besonders feinkörnige Bodenarten (beispielsweise Lösslehme) mit natürlicherweise relativ geringer Luftkapazität sind empfindlich gegen Verdichtung und damit weiterer Reduktion der Luftkapazität.
- Die Leonberger Versuche haben gezeigt, dass unverdichteter Bodeneinbau nicht zwingend mit Bandabsetzer (z.B. „Telebelt“-Geräte), Bagger oder Moorraupe ausgeführt werden muss. Wichtig ist vor allem, dass der Einbau in Höhe der Gesamtmächtigkeit der Rekultivierungsschicht in einem Zug erfolgt, damit keine horizontalen

¹¹ Beispiel: Bei Bodenart Tt (reiner Ton), sehr stark verdichtet ($\rho_t > 1,8 \text{ g/cm}^3$ = Stufe 5 nach AG BODEN 2005) und zur Rekultivierung völlig ungeeignet, ergeben sich nach AG BODEN (2005) bei 2 m Mächtigkeit (20 dm*12 mm/dm) 240 mm nFk für die gesamte Schichtstärke. Selbst bei 20 % Steingehalt und Berücksichtigung eines Abschlags für die Strukturschädigung beim Einbau (siehe MELCHIOR 2010) von 20 % erreichte dieses ungeeignete Bodenmaterial mit 154 mm noch die Mindestanforderung der DepV.

Schichtgrenzen im Boden entstehen. Eine leistungsfähige Raupe mittlerer Größe kann größere Bodenmengen bewegen und dadurch die Anzahl der Überfahrten reduzieren. Verdichtungen des Oberbodens sind reparabel.

- In der Praxis ist unverdichteter Bodeneinbau häufig wegen der Unmöglichkeit des Nachweises der Standsicherheit erschwert. Hier sehen wir großen Forschungsbedarf, um der Baupraxis Parameter zu Schereigenschaften unverdichteter Bodenmaterialien zur Verfügung zu stellen.

4.2. Bewertung der Wasserhaushaltsfunktion

Gemäß BQS 7-2 (2011) ist die Wasserhaushaltsschicht als Rekultivierungsschicht die oberste Komponente des Oberflächenabdichtungssystems von Deponien. Sie hat unter anderem die Aufgabe der Verminderung der Durchsickerung auf das gemäß DepV vorgegebene Maß.

Rekultivierungs- oder Wasserhaushaltsschichten unterscheiden sich als natürliche Systeme von den technischen Komponenten der Oberflächenabdichtung dahingehend, dass sie nicht bis zu einer messbaren und damit für die Lebensdauer der Komponente voraussagbaren Belastungsgrenze „dicht“ sind. Somit kann auch kein allgemein und über einen längeren Zeitraum gültiger definierter Wirkungsgrad angegeben werden. Dichtungsfunktion oder Wirkungsgrad einer Rekultivierungsschicht hängen nicht nur von den relativ konstanten „technischen“ Eigenschaften - insbesondere Mächtigkeit, Bodeneigenschaften, Topografie, Bewuchs - und dem Klima am Standort ab, sondern werden relativ kurzfristig von weiteren, nicht konstanten und sich darüber hinaus gegenseitig beeinflussenden Faktoren modifiziert. Die wichtigsten wurden oben bereits genannt, es sind der Witterungsverlauf und die Vegetationsentwicklung.

Indirekt Bezug nehmend auf diese Ausgangsbedingungen formulieren die DepV (2009) und BQS 7-2 die Anforderungen an die Dichtheit von Wasserhaushaltsschichten wie folgt:

Im fünfjährigen Mittel² darf die Durchsickerung der Wasserhaushaltsschicht höchstens 10 Prozent vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens 5 Jahre nach Herstellung (s. Nr. 10) betragen (DepV Anhang 1 Nr. 2.3.1.1, Satz 1, Ziffer 3).

[Fußnote]² Der Nachweis, dass der geforderte höchstens zulässige Durchfluss im fünfjährige Mittel nicht überschritten wird, gilt dann als erfüllt, wenn sich das fünfjährige Mittel auf die ungünstigsten 5 aufeinander folgenden Jahre der betrachteten Zeitreihe bezieht. Durchflüsse in Jahren mit extremen Jahresniederschlägen, deren Wiederkehrwahrscheinlichkeit über 100 Jahren liegen, müssen nicht berücksichtigt werden. (BQS 7-2 2011, 6)

...

Wird anstelle der Abdichtungskomponente für eine Deponie der Klasse I die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht ausgeführt, darf der Durchfluss durch die Wasserhaushaltsschicht im fünfjährigen Mittel spätestens 5 Jahre nach Herstellung nicht mehr als 20 mm/Jahr betragen. (DepV Anhang 1, Tabelle 2, Fußnote 5)

Die ersten fünf Jahre nach Herstellung bleiben für einen Funktionsnachweis unberücksichtigt ausgenommen, die Anforderung wird schon innerhalb der ersten Jahren erfüllt (s. hierzu auch Fußnote 2 zu Nr. 3). Die Bestimmung des fünfjährigen Mittels beginnt nach dem 5. Jahr nach Herstellung. Daher ist der Funktionsnachweis spätestens nach Ablauf des 10. Jahrs nach Herstellung zu erbringen. (BQS 7-2 2011, 19)

Die Ergebnisse der Leonberger Lysimeterversuche zeigen, dass diese Vorgaben - zumindest in zeitlicher Hinsicht - nicht einzuhalten sind (siehe auch WATTENDORF & EHRMANN 2015). Fünf Jahre nach Herstellung der Rekultivierungsschicht (= Jahr 2005) begannen die Bäume in den Leonberger Lysimeterfeldern erstmals, einen messbaren Einfluss auf den Wasserhaushalt auszuüben. Unsere Ergebnisse korrespondieren, wie bereits oben erwähnt, hier mit anderen Untersuchungen zum Gehölzaufwuchs und Wirkungen auf den Wasserhaushalt bei der Rekultivierung sowie mit Erfahrungen aus der forstlichen Rekultivierung und Empfehlungen zur Bepflanzung von Deponien (z.B. SCHABER-SCHOOR 2006, dort weitere Literaturhinweise). Nach MAIER-HARTH (2009, 124) sind die Vorgaben von DepV und BQS 7-2 in dieser Hinsicht *praxisfremd und würden bei entsprechender Umsetzung das „Aus“ der Wasserhaushaltsschichten bedeuten. Er empfiehlt daher: Fünf Jahre nach der Herstellung ... beginnt frühestens der Umbau von der Initialbepflanzung zur Zielbepflanzung, letztere muss sich erst an Ort und Stelle etablieren, um sich auch tatsächlich auf den Wasserhaushalt auszuwirken. Erst dann sollte im „gleitenden Mittel über fünf Jahre“ die maximale Durchsickerung eine Beschränkung erfahren, deren Einhaltung oder Überschreitung über die Zukunft des Dichtsystems entscheidet.* Dieser Aussage kann aufgrund der Messergebnisse und Erfahrungen in Leonberg zugestimmt werden; sie sollte wenn möglich bei Überarbeitungen der einschlägigen Vorgaben und Empfehlungen entsprechend berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse des Jahres 2013 zeigen darüber hinaus jedoch auch, dass eine Fixierung der Betrachtung einzig auf die Jahres-Niederschlagsmengen nicht zielführend ist. Viel bedeutender sind einzelne Wetterereignisse und Witterungsverläufe innerhalb eines Jahres. So liegt 2013 die Jahresniederschlagsmenge mit 834 mm zwar über dem langjährigen Durchschnitt, jedoch weit von einer Jährlichkeit von 100 Jahren entfernt. Im mit 1017 mm/a deutlich niederschlagsreicheren Jahr 2009 entstanden beispielsweise nur 81 mm Absickerung aus dem U-Feld (152 mm aus dem K-Feld). 2013 jedoch kam es in Verbindung mit ungünstiger Witterung im Frühjahr zu einzelnen Ereignissen, die kurzzeitig (24 - 48 h) diese Jährlichkeit erreicht haben dürften, und die Sickerwassermengen waren außergewöhnlich hoch. Das System der Wasserhaushaltsschicht bedarf daher einer Betrachtung in kürzeren Zeiträumen, da Wetter und Witterung offensichtlich als Haupteinflussfaktoren auf die Wirksamkeit zu sehen sind.

4.3. Herstellung zweilagiger Rekultivierungsschichten

Auf Wunsch des BWPLUS-Gutachtergremiums folgen einige Anmerkungen zu zweilagig aufgebauten Rekultivierungsschichten. Hierbei sind mehrere Varianten zu unterscheiden:

- a) Rekultivierungsschichten, die in Anlehnung an den Aufbau natürlicher Böden aus mineralischem Unterboden- und humosem Oberbodenmaterial (meist circa 30 cm mächtig) aufgebaut sind. Nach unseren Erfahrungen in Leonberg ist ein Auftrag von humosem Oberbodenmaterial für die forstliche Rekultivierung nicht notwendig. (siehe 4.1 und WATTENDORF et al. 2005)
- b) In Rheinland-Pfalz (z.B. MAIER-HARTH 2005, 2009) werden zweilagige Rekultivierungsschichten aus Versickerungsschicht (obere Lage) und Wasserspeicherschicht (untere Lage) ausgeführt, um optimale Wasserspeichereigenschaften und Erosionssicherheit zu erreichen. Beide Lagen werden möglichst unverdichtete eingebaut. Steht geeignetes, vor allem ausreichend wasserdurchlässiges Bodenmaterial zur Verfügung, so können mithilfe dieses Konzepts sehr wirkungsvolle Wasserhaushaltsschichten gebaut werden.
- c) In letzter Zeit werden auch in der baden-württembergischen Deponiepraxis Zwei-Schicht-Modelle diskutiert und auch ausgeführt, um die Unsicherheiten hinsichtlich des Standsicherheitsverhaltens unverdichteter Böden zu umgehen. Hierbei wird eine untere Bodenschicht mit einer Mächtigkeit von circa 0,5 - 1 m abhängig von der Gesamtstärke der Rekultivierungsschicht entsprechend der Standsicherheitsberechnungen verdichtet. Die zweite obere Lage wird dagegen ohne zusätzliche Verdichtung eingebracht.

Definiert verdichtetes Bodenmaterial ist bei hohen Niederschlagsmengen grundsätzlich weniger anfällig für Wasseraufsättigung als unverdichtetes Material, solange dieses noch nicht durch Setzungen konsolidiert ist. Trotzdem können die Eigenschaften solcher zweilagiger Aufbauten hinsichtlich Standsicherheit und Wasserhaushalt aber nur im Einzelfall beurteilt werden:

- Wenig problematisch ist der zweilagige Aufbau bei gut wasserdurchlässigem Bodenmaterial - siehe b.) – zu sehen.
- In Baden-Württemberg kommt aber in weiten Landesteilen Bodenmaterial mit relativ hohen Tonanteilen über 25 % vor. Dies gilt beispielsweise für das Keuperland, viele Lössgebiete (Lösslehme) oder die Schwäbische Alb. Bei Bodenmaterialien mit höheren Tonanteilen wird die Wasserdurchlässigkeit durch Verdichtung stark herabgesetzt. In diesem Fall besteht bei einem zweischichtigen Aufbau die Gefahr, dass sich auf der Grenzschicht zwischen oberer und unterer Lage Hangwasser aufstaut, teilweise lateral abzieht und teilweise zur Wassersättigung im unteren Teil der oberen Lage führt. Solche Bedingungen wirken sich nachteilig auf die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht aus (siehe WITT 2014), hierdurch ist die Gefahr einer Böschungsrutschung auf der Grenzschicht als Gleitfuge gegeben. Die Funktion der Entwässerungsschicht ist in diesem System weitgehend außer Kraft gesetzt, da die untere Lage in Material und Ausführung oft einer mineralischen Dichtung nahe kommt.

Der zweilagige Aufbau von Rekultivierungsschichten nach Punkt c.) wird von uns als Notlösung gegenüber einer vollständigen Verdichtung der Rekultivierungsschicht gesehen, um zumindest teilweise geeignete Bodenbedingungen im Wurzelraum (bis circa 1 m Tiefe) herzustellen. Er ist jedoch aus unserer Sicht bei feinkörnigen und wenig wasserdurchlässigen Bodenmaterialien mit erheblichen Standsicherheitsproblemen behaftet, weil durch den Aufbau eine potenzielle Gleitfuge innerhalb der Rekultivierungsschicht geschaffen wird und die Wirkung der Entwässerungsschicht praktisch aufgehoben wird.

5. Zusammenfassung/Summary

Zusammenfassung

Forschungsvorhaben BWU 11003 befasst sich mit der Optimierung von Rekultivierungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungen. Boden schonender Einbau soll die Evapotranspiration steigern und die Absickerung reduzieren. In vorangegangenen Vorhaben wurden auf der Deponie Leonberg zwei Großlysimeterfelder eingerichtet und mit Bäumen bepflanzt. Ein Lysimeterfeld enthält eine unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht (Feld U), das zweite eine in vier Lagen verdichtet eingebaute (Feld K). Die Felder unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren. Bodenmaterial, Bepflanzung und Behandlung der Felder sind identisch. Mit dieser Versuchsanlage wird der Wasserhaushalt unterschiedlich verdichteter Rekultivierungsschichten sowie die ihn beeinflussenden Faktoren untersucht.

Vorhaben BWU 11003 verfolgt das Ziel, die Forschungsarbeiten vorangegangener Projekte fortzuführen, um lückenlose Datenreihen vom Initialstadium des Bodeneinbaus bis zum ausgebildeten Waldbestand zu gewinnen. Das Arbeitsprogramm beinhaltet das Erfassen von Wetterdaten, Absickerungsraten und Bodenwassergehalten sowie Untersuchungen zur Entwicklung der Vegetation, der Regenwurmpopulation und der Bodenstruktur.

Mikromorphologische Betrachtungen der Bodenstruktur zeigen, dass seit dem Einbau der Rekultivierungsschicht vor ungefähr 15 Jahren bis circa 10 cm Tiefe Verdichtungen durch Regenwurmaktivität aufgelöst und mineralische und organische Bodenbestandteile durchmischt wurden. Diese Schicht ist durch niedrige Eindringwiderstände und Trockenraumdichten sowie intensive Durchwurzelung gekennzeichnet; hier ist ein günstiges Bodengefüge entstanden. Darunter sind die verdichteten Lagen in Feld K noch mikromorphologisch sowie am Eindringwiderstand zu erkennen. In beiden Feldern sind keine Anzeichen einer Gefügeverbesserung in dichten Zonen zu erkennen. In weniger dichten Zonen haben sich Hohlräume erhalten, die jedoch wegen fehlender Porenkontinuität nur wenig zur Bodenbelüftung beitragen können.

Die im Ausgangsmaterial vorhandene Regenwurmpopulation starb beim Bau der Testfelder im Zuge der Rekultivierung im Winter 2000 fast vollständig aus. Da Regenwürmer auch unter günstigen Bedingungen nur sehr langsam einwandern, wurde die Population durch Einbringen von Regenwürmern im Frühjahr 2002 gefördert. Bis 2008 nahmen Biomassen und bis 2009 auch Abundanzen zu. Im Jahr 2010 war ein moderater Rückgang zu verzeichnen. Die 2010 in den Lysimeterfeldern vorhandene Population war sehr artenreich und entsprach bezüglich Abundanz und Biomasse guten Grünlandböden, was auf sehr gute Habitatbedingungen schließen lässt. Im Jahr 2011 gab es aufgrund der Trockenheit einen drastischen Einbruch der Population in beiden Versuchsfeldern, in 2014 gingen Abundanzen und Biomassen nochmals zurück. Die Regenwurmbesiedlung der Testfelder U und K unterscheidet sich mittlerweile nur noch geringfügig.

Die Durchwurzelung ist im Oberboden des K-Feldes intensiver als im U-Feld. Im Unterboden wurde bei der letzten Beprobung im Jahr 2013 eine reduzierte Durchwurzelung in den verdichteten Schichten des Feldes K gegenüber dem unverdichteten Boden (Feld U) festgestellt. In den übrigen Tiefenstufen des Unterbodens variieren die Durchwurzelungsintensitäten stark und es finden sich in keine durchgehenden Unterschiede zwischen den

Feldern mehr. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Durchwurzelung des Unterbodens im K-Feld mit einer Verzögerung von circa acht Jahren gegenüber dem U-Feld erfolgt ist.

Die Ergebnisse der Vegetationsuntersuchungen belegen ein rascheres Wachstum der im Jahr 2000 gepflanzten Aspen (*Populus tremula*) im Feld mit unverdichtetem Boden; die Bäume haben nach nunmehr 14 Jahren einen um circa 20 % höheren mittleren Stammumfang. Die jährliche Zuwachsleistung der Aspen im U-Feld ist mit Ausnahme von 2014 ebenfalls höher. Diese Ergebnisse lassen auf relativ feine, aber für die Standortqualität bedeutsame Bodenunterschiede zwischen den Testfeldern schließen. Als Erklärung für die in 2014 höhere Zuwachsrate im K-Feld und den verringerten Zuwachs im U-Feld kommt möglicherweise zeitweiser Wassermangel der besser entwickelten Bäume im U-Feld in Frage. Unterschiede in der Nährstoffversorgung der Bäume wurden anhand von Blattanalysen nicht festgestellt. Als Grund für die unterschiedlichen Wuchsleistungen scheidet die Nährstoffversorgung demnach aus.

Der Vergleich der Absickerungsraten aus beiden Lysimeterfeldern im Zeitraum 1.6.2003 - 31.12.2014 zeigt eine um circa 30 % niedrigere Sickerwassermenge aus Feld U (unverdichteter Boden). Aufgrund der Vegetations- und Bodenentwicklung sind die anfänglich sehr hohen Sickerwasserraten in beiden Testfeldern deutlich zurückgegangen und liegen im Jahr 2014 erstmals auf ähnlichem Niveau. Die entsprechenden Vorgaben der DepV für Wasserhaushaltsschichten konnten mit dem U-Feld 2010 fast erreicht (64 mm) und erstmals 2011 eingehalten werden. In Lysimeterfeld K wurde die Grenze von 60 mm/a erstmals 2012 unterschritten. Das Jahr 2013 mit in beiden Feldern erheblich höheren Absickerungsmengen als in den Vorjahren zeigt, dass die Wirkung einer natürlichen Dichtungskomponente wie der Rekultivierungsschicht stark von den Witterungsbedingungen und nicht nur von der Niederschlagsmenge beeinflusst wird.

Aus den Erkenntnissen über die Bodenentwicklung und den Ergebnissen der Sickerwassermessungen ergibt sich die Empfehlung, bei der Rekultivierung bodenschonende Verfahren, insbesondere den ungeschichteten Einbau mit möglichst geringer Verdichtung im Unterboden, zu bevorzugen. Dies trägt dazu bei, um auch auf lange Sicht - über die Lebensdauer technischer Oberflächenabdichtungselemente hinaus - Sickerwassermengen zu minimieren.

Summary

Research project BWU 11003 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 Leonberg landfill (Landkreis Böblingen) two large lysimeter fields were constructed and planted with trees. The only difference between these two fields is the manner of the installation of the recultivation layers. In field U the soil installed was not compacted, whereas in field K it was installed in four mechanically compacted single layers. 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 project BWU 11003 are to continue the examinations on the water regime and the development of soil and vegetation to obtain continuous data series from the outset and to 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 micromorphological observations of soil structure show that since the installation of the recultivation layer about 15 years ago compactations were dissolved to circa 10 cm depth and mineral and organic soil constituents have been mixed by earthworm activities. This layer is characterized by a low penetration resistance, a low bulk density and intensive rooting - signs for a favorable soil structure. Compacted layers in field K can still be identified micromorphologically and due to the penetration resistance. In both fields no signs of a bettering of the soil structure in dense zones can be observed. In less dense areas cavities have persisted, but due to the lack of continuity they may contribute little to soil aeration .

The earthworm population originally existing in the soil material nearly completely died off with the construction of the test fields in the year 2000. Because the resettlement of large areas by earthworms is very slow, earthworms were brought in to foster the populations rehabilitation in spring 2002. Up to 2008 biomasses and until 2009 also abundances of earthworms increased. In 2010 a moderate decline took place. The earthworm population found in 2010 was very rich in species and correspond to good grassland soils, which suggests very good site conditions in the test fields. In 2011 the population of both test fields drastically decreased because of draught and in 2014 abundance und biomass died down to a very low level. By now, the differences between Field U and K are very small.

The rooting in the topsoil is actually as well as in previous years more intense in field K than in field U. In the subsoil, a reduced root penetration in compacted layers of the field K opposite to the uncompacted soil in field U was observed in the sampling 2013. In the remaining depth levels of the subsoil the rooting intensities vary strongly and no continuous differences between the fields can be found. It can be concluded that the root penetration of the subsoil in K-field proceeded with a delay of approximately eight years compared to the U-field.

The results of the vegetation studies show a more rapid growth of the Aspen trees (*Populus tremula*) in the field with uncompacted soil. Today, 14 years after they were planted, these

trees have an approximately 20 % higher stem girth. The annual growth rates of the Aspen trees in field U are - with the exception of 2014 - also higher. These results indicate differences in soil characteristics between the test fields, which are relatively fine, but nonetheless important for site conditions. As an explanation for the higher growth rate of the Aspen trees in 2014 in test field K and their reduced growth in field U intermittent water shortage of the better developed trees in the U-field can be presumed. Leaf analyzes did not indicate any differences between the two fields concerning the nutrient supply of the trees. Therefore, nutrient supply may not be considered as a reason for the different growth rates in 2014.

Comparing the two lysimeter fields' leakage rates in the period 1.6.2003 - 31.12.2014 shows an approx. 30 % lower leakage rate from lysimeter field U (uncompacted soil). Because of the vegetation and soil development the initially very high leakage from the two test fields decreased significantly and for the first time in the year 2014 reached a similar level. The relevant specifications of the DepV for "Wasserhaushaltsschichten" could almost be reached in 2010 (64 mm) and for the first time definitely fulfilled in 2011. The leakage from lysimeter field K undercut the limit of 60 mm/a according to DepV for the first time in 2012. The year 2013 with considerable higher leakage rates than in the previous years indicates that the performance of the "Wasserhaushaltsschicht" as a natural component of the surface sealing is partly depending on the weather conditions and not only on sum of precipitation.

The results about soil development and leakage rates lead to the recommendation to favour soil protecting procedures, in particular not stratified installation of recultivation layers with merest compaction possible in the subsoil. This contributes to minimizing leakage rates from recultivation layers in the long term.

6. Literatur

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Stuttgart, 438 S.
- BARTELS, H., B. DIETZER, G. MALITZ, F. M. ALBRECHT & J. GUTTENBERGER (2005): KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000), Fortschreibungsbericht, 53 S., Offenbach
- BERGMANN, W. (1993): Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen, 614 S., Stuttgart
- 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
- BÖNECKE, G. (1997): Hinweise zur Aufforstung von Deponien mit Oberflächenabdichtung, in: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt [Hrsg.]: Rekultivierung von Deponien, FVA-Arbeitsberichte 1/97: S. 39 – 50
- BQS 7-1 = LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“ (2011): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1 Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen, 33 S., <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>
- BQS 7-2 = LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“ (2011): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-2 Wasserhaushaltsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen, 33 S., <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>
- 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
- BUNGART, R. & R.F. HÜTTL (2004): Growth dynamics and biomass accumulation of 8-year-old hybrid poplar clones in a short-rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget, European Journal of Forest Research, Vol 123/2:105 - 115
- DepV = Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, BGBl 2009 Teil I Nr. 22, vom 29.4.2009, S. 900 - 950
- DGGT = DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2000a): GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617 – 626
- DGGT = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2000b): GDA-Empfehlung E 2-32 Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 627 – 629

- DWD = Deutscher Wetterdienst (2014): Wärmstes Jahr seit dem Beginn regelmäßiger Temperaturmessungen, Pressemitteilung, 3 S.
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressemitteilungen/2014/20141230_Deutschlandwetter_Jahr_2014,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/20141230_Deutschlandwetter_Jahr_2014.pdf
- EHRMANN, O., M. SOMMER, & T. VOLLMER (2002): Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs: In: SOMMER, M., EHRMANN, O., FRIEDEL, J.K., MARTIN, K., VOLLMER, T. & G. TURIAN: Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart
- 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. & C. EMMERLING (2007): Mögliche Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf Regenwürmer. Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 110/1, 285-286.
- EHRMANN, O., M. SOMMER. & T. VOLLMER (2002): Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs: In: SOMMER, M., EHRMANN, O., FRIEDEL, J.K., MARTIN, K., VOLLMER, T. & G. TURIAN: Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwürmer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart, 163 S.
- EHRMANN, O. & P. WATTENDORF (2010): Rekultivierung der Kreismülldeponie Böblingen, Standortgutachten und Pflanzempfehlung – Schlussbericht, unveröff. Gutachten Büro für Bodenmikromorphologie und Bodenbiologie Dr. Otto Ehrmann im Auftrag der Abfallwirtschaft Landkreis Böblingen, 27 S. + Anhang
- EHRMANN, O. & P. WATTENDORF (2012): Altabschnitt der Kreismülldeponie Sindelfingen – Standortgutachten und Waldbauempfehlung, unveröff. Gutachten Büro für Bodenmikromorphologie und Bodenbiologie Dr. Otto Ehrmann im Auftrag der Abfallwirtschaft Landkreis Böblingen
- FRAZER, G.W., C..D. CANHAM & K.P. LERTZMAN, (1999): Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York

- MAIER-HARTH, U. (2005): Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushaltsschichten auf Deponien in Rheinland-Pfalz, Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung „Qualifizierte Rekultivierungsschichten“: 92 – 115, Freiburg
- MAIER-HARTH, U. (2009): 10 Jahre Erfahrung beim Bau von Wasserhaushaltsschichten, in: Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV) [Hrsg.]: Wasserhaushaltsschichten im Deponiebau, Tagungsband zum Expertengespräch am 25.11.2009: 111 - 126
- MARINISSEN, J.C.Y. & F. VAN DEN BOSCH (1992): Colonization of new habitats by earthworms, *Oecologia* 91: 371 – 376
- MELCHIOR, S. (2010): Rekultivierungsschichten - Geltende Anforderungen, Stand der Technik und Praxiserfahrungen, *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* Bd. 63: 25 - 42
- NOTZ, E. (2012) Wurzelentwicklung in Rekultivierungsschichten. Bachelorarbeit an der Forst- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät, Universität Freiburg
- PROMIS, A., S. GÄRTNER, D. BUTLER-MANNING, C. DURÁN-RANGEL, A. REIF, G. CRUZ & L. HERNÁNDEZ (2011): Comparison of four different programs for the analysis of hemispherical photographs using parameters of canopy structure and solar radiation transmittance, *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 11: 19 - 33
- SCHABER-SCHOOR, G. (2006): Regulierung des Wasserhaushalts von Deponien durch Gehölzbewuchs, *AFZ-Der Wald* 19/2006: 1050 - 1056
- STOCK, U. (2014): Rekultivierungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen - Diskussionsstand der Evaluierung des BQS 7.1, Tagungsband 24. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar: 93 - 99
- TA SIEDLUNGSABFALL (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, *Bundesanzeiger* Jahrg. 45, Nr. 99a, Hrsg. v. Bundesministerium der Justiz
- 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. & O. EHRMANN (2015): Bodenentwicklung und Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten - Ergebnisse aus 14 Jahren Langzeituntersuchungen auf der Deponie Leonberg, *Veröffentlichungen des TR-LGA-Grundbauinstituts Nürnberg*, Heft 94: 37 - 46

- 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 (2012): Projekt Leonberg 2005+ Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten, Schlussbericht, 46 S., Freiburg
- WATTENDORF, P. & V. SOKOLLEK (2003): Gestaltung und Entwicklung des Bewuchses auf Rekultivierungsschichten von Deponien und Altlasten, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10/1: 171 –183, Weimar
- WITT, K. J. (2014): 30 Jahre Erfahrung mit der Beurteilung der 100-jährigen Standsicherheit von Deponieböschungen, 30. Fachtagung „Die sichere Deponie – Geokunststoffe im Umweltschutz“ (2014). Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V., Berlin, 11 S., <http://www.wittundpartner.de/Jahr-2014.veroeffentlichungen-2014.0.html>