

Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS)

Zwischenbericht
anlässlich des Statuskolloquiums Umweltforschung Baden-Württemberg 2010
am 24. und 25. Februar 2010
im KIT-Campus Nord

Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten

von

P. Wattendorf, O. Ehrmann & W. Konold

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Landespflege

Förderkennzeichen: BWU 26004

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

Kurzfassung

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

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

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die Wassersättigung des Bodens über Feldkapazität keine notwendige Voraussetzung für die Sickerwasserbildung ist, bereits bei niedrigeren Wassergehalten sind kurzzeitige Abflüsse möglich. Die jährlichen Sickerwassermengen aus dem Lysimeterfeld mit unverdichtetem Boden betragen zu Beginn der Aufzeichnungen im hydrologischen Jahr 2001/02 circa 32 % des Niederschlags. Bis zum hydrologischen Jahr 2008/09 sind sie im Prinzip kontinuierlich auf 8,5 % der Niederschlagsmenge zurückgegangen. Als Grund hierfür ist die zunehmende Verdunstung durch den sich entwickelnden Gehölzbestand anzunehmen. Die Sickerwasserbildung wird auch von der Witterung, insbesondere der Niederschlagshöhe und -verteilung beeinflusst. Hinsichtlich der Sickerwassermenge bestehen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Lysimeterfeldern: Im Feld mit verdichtetem Boden versickern im langjährigen Mittel circa 18 %, im Feld mit unverdichtetem Boden dagegen 12 % der Gesamt-Niederschlagsmenge.

Summary

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

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

The results of the measurements indicate that the generation of leakage does not depend on complete soil water saturation. Already at water contents below field capacity brief discharge events occur. The annual leakage rates from the lysimeter field with uncompacted soil decrease in principle continuously from 32% of the precipitation amount in the hydrological year 2001/02 to 8,5% in 2008/09. As a reason for this the increasing evaporation due to the growth of woody species can be assumed. The leakage rates are also affected by the weather, in particular the amount and the seasonal distribution of precipitation. The comparison of the two lysimeter fields' leakage rates shows clear differences: The leakage from the field with compacted soil averages up to circa 18 % of the annual precipitation and the leakage from the field with uncompacted soil however amounts to circa 12%.

Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten (BWU 26004)

P. Wattendorf, O. Ehrmann & W. Konold

Institut für Landespfl ege, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

1. Vorhaben

1.1. Ausgangslage

Seit einigen Jahren wird im Interesse einer nachhaltigen Umweltvorsorge der Wasserhaushaltsfunktion von Rekultivierungsschichten im System der Oberflächenabdichtung von Deponien vermehrte Beachtung geschenkt. Aufgabe jeder Rekultivierungsschicht, insbesondere aber sogenannter „Wasserhaushaltsschichten“ ist es, möglichst viel Niederschlagswasser auf natürlichem Weg durch Verdunstung abzuführen, um die Absickerung zu minimieren. Bereits erste Empfehlungen (z.B. BRAUNS et al. 1997, DGGT 2000) zur Herstellung „qualifizierter Rekultivierungsschichten“ oder „Wasserhaushaltsschichten“ legen nahe, hierbei der Auswahl und schonenden Behandlung des Bodenmaterials besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Insbesondere ist es von Vorteil, wenn der Boden gut durchwurzelbar ist und eine möglichst hohe Wasserspeicherkapazität besitzt. Dies ist vor allem durch möglichst geringe Bodenverdichtung beim Baubetrieb zu erreichen. Weiterhin ist es wichtig, Boden und Bewuchs aufeinander abzustimmen.

Das im Jahr 2009 novellierte Deponierecht (Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts) trägt dieser Entwicklung der Erkenntnisse unter anderem dadurch Rechnung, dass für Rekultivierungsschichten eine Untergrenze der nutzbaren Feldkapazität von 140 mm definiert wird (Anhang 1, 2.3.1). Weiterhin werden „Wasserhaushaltsschichten“ als Sonderfall von Rekultivierungsschichten zugelassen, die unter bestimmten Voraussetzungen - vor allem in niederschlagsarmen Regionen - Dichtungselemente ersetzen können. Eine Wasserhaushaltsschicht hat nach dem derzeitigen Stand des Rechts folgende besondere Voraussetzungen zu erfüllen (Anhang 1, 2.3.1.1):

1. Die Mindestdicke muss 1,50 m betragen.
2. Die Wasserhaushaltsschicht soll eine nutzbare Feldkapazität von wenigstens 220 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Wasserhaushaltsschicht, aufweisen.
3. Die Durchsickerung darf höchstens 10 Prozent vom langjährigen Mittel des Niederschlags (in der Regel 30 Jahre), höchstens 60 mm pro Jahr, spätestens fünf Jahre nach Herstellung betragen.

Bislang wurden in der Deponiebaupraxis nur wenige qualifizierte Rekultivierungsschichten realisiert (WATTENDORF 2005). Dies mag auch darin begründet sein, dass Vorteile, die überwiegend den Wasserhaushalt und die Vegetationsentwicklung betreffen, allgemein noch nicht gebührend wahrgenommen werden. 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, wurde in einem interdisziplinären Forschungsvorhaben (Projekte BWSD

99003 und BWD 21010) auf dem Gelände der Kreismülldeponie Leonberg eine umfangreiche Versuchsanlage installiert.

1.2. Versuchsanlage Leonberger Lysimeterfelder

Die Versuchsanlage der Leonberger Lysimeterfelder besteht im Wesentlichen aus zwei Großlysimetern (Tabelle 1), deren Aufbau einer Regel-Oberflächenabdichtung nach TA Siedlungsabfall (1993) entspricht: Auf dem als mineralische Abdichtung ausgeführten Auflager liegt eine verschweißte 2,5 mm starke Kunststoffdichtungsbahn. Sie wurde zur Begrenzung der Lysimeterfelder über Randdämme hochgezogen, so dass zwei nebeneinander liegende geschlossene Wannen entstanden. In diese wurden im Herbst 2000 eine 30 cm starke mineralische Entwässerungsschicht mit einer Sammeleinrichtung für das Sickerwasser 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). Nach Abschluss der Bodenarbeiten wurden die Testfelder eingesät und überwiegend mit Aspen (*Populus tremula*) bepflanzt (Abbildung 1).

Tabelle 1: Eigenschaften der Leonberger Lysimeterfelder

Lysimeterfeld	K	U	
Fläche	360	360	[m ²]
Exposition	Ost-Süd-Ost		
Hangneigung	< 1:2,7		
Mächtigkeit Rekultivierungsschicht*	circa 2,1**		[m]
Bodenart	Ut2 / Ut3		
Steingehalt	< 1		[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 Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht werden gesammelt und mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten registriert. Der Bodenwassergehalt der Rekultivierungsschicht kann an drei Messstellen pro Lysimeterfeld in jeweils 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe gemessen

werden. Zusätzlich besteht im K-Feld ein Messprofil mit 10 Sonden, die den Bodenwassergehalt in Schichten unterschiedlichen Verdichtungsgrades erfassen. Weitere Angaben zur Versuchsanlage finden sich in WATTENDORF et al. (2005).



Abbildung 1: Die Leonberger Lysimeterfelder im Juli 2009; links: K-Feld (Boden verdichtet), rechts: U-Feld (Boden unverdichtet)

1.3. Arbeitsprogramm und Umfang des Vorhabens

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

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

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

- Wartung der Lysimeteranlage

2. Arbeitsbericht 2009

Die oben aufgeführten laufenden Arbeiten wurden entsprechend des Arbeitsprogramms ausgeführt, darüber hinaus waren außerplanmäßige Reparaturarbeiten erforderlich. Im aktuellen Zwischenbericht 2009 stehen die Ergebnisse der Wasserhaushaltsuntersuchungen im Focus, im folgenden Jahr sollen die Ergebnisse des Untersuchungsprogramms zur Entwicklung der Bodenstruktur, Vegetation und Regenwurmpopulation schwerpunktmäßig betrachtet werden.

3. Ergebnisse: Wasserhaushalt der Lysimeterfelder

Die Absickerung aus den Testfeldern ergibt sich prinzipiell als Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung, Oberflächenabfluss tritt nicht auf. Modifiziert wird das Ergebnis noch durch die Zwischenspeicherung des Bodens. Das Jahr 2009 war durch insgesamt hohe Niederschlagsmengen gekennzeichnet, bis zum 30.11.2009 wurden von der projekteigenen Wetterstation bereits 967 mm registriert. Überdurchschnittlich hoch war hierbei der Anteil der Sommerniederschläge mit 716 mm; allein in den Monaten Juli und August fielen 261 mm beziehungsweise 120 mm Regen, davon 75,8 mm bei einem Einzelereignis am 3.7.2009. Das langjährige Mittel in der Umgebung der Testfelder liegt bei 764 mm, mit 434 mm Sommer- und 330 mm Winterniederschlag². Die Sickerwassermenge aus dem K-Feld betrug 2009 circa 134 mm, aus dem U-Feld versickerten dagegen nur circa 78 mm.

Eine Betrachtung der Niederschlags- und Sickerwassermengen in täglicher Auflösung zeigt die außergewöhnliche Situation im Sommer 2009 (Abbildung 2). Während im durchschnittlich regenreichen Sommer 2008 (431 mm) ab Ende Juni die Absickerungsmengen niedrig bleiben, verursachen im Juli 2009 die hohen Niederschläge Spitzenabsickerungen. Die großen Regenmengen wirken sich auch auf die Bodenfeuchte aus, denn während 2008 der Bodenwassergehalt im Sommer zumindest in größeren Bodentiefen nahezu kontinuierlich absinkt, steigt er im Juli 2009 nochmals hoch an.

Abbildung 2 zeigt weiterhin, dass Bodenwassergehalte und Absickerung nur bedingt miteinander in Beziehung stehen. Vor allem außerhalb der Vegetationszeit, wenn die Pflanzen kaum Wasser transpirieren, erreichen die (mittleren) Bodenwassergehalte die Feldkapazität und es bildet sich verstärkt Sickerwasser. Im Sommer dagegen findet auf Grund von präferentiellem Fluss auch dann Absickerung nach Niederschlagsereignissen statt, wenn die gemittelten Bodenwassergehalte nur wenig ansteigen oder gleich bleiben. Eine bessere Beziehung besteht zwischen maximalem Bodenwassergehalt (in Abbildung 2 als maximaler Wassergehalt aller Messpunkte und Tiefenstufen eines Testfeldes am jeweiligen Messtermin dargestellt) und Absickerung.

² DWD-Station Renningen-Ihinger Hof (ca. 5,5 km südwestlich der Testfelder) Normalperiode 1961 - 1990

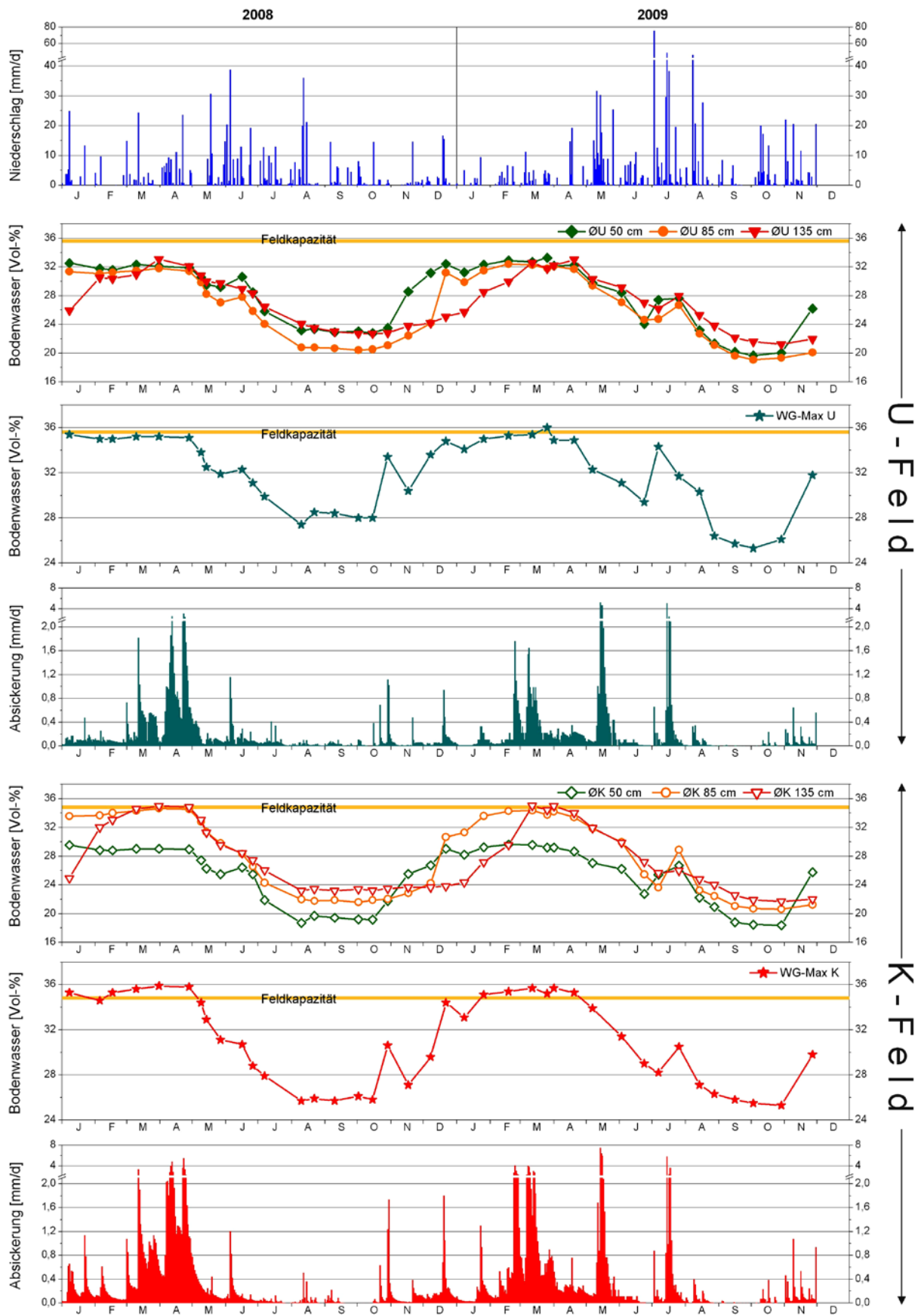


Abbildung 2: Niederschlag, mittlere (\emptyset in 50, 85 und 135 cm Tiefe) und maximale (WG-Max) Bodenwassergehalte und Feldkapazität des Bodens sowie Absickerung, U- und K-Feld, Tageswerte vom 1.1.2008 bis 30.11.2009

Die recht prompte - 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 2000) und kommt neben der geringeren Verdunstung der weniger wüchsigen Gehölze als Mitursache der deutlich höheren Absickerungsraten in Frage. Dass es sich bei dem präferentiellen Fluss 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.

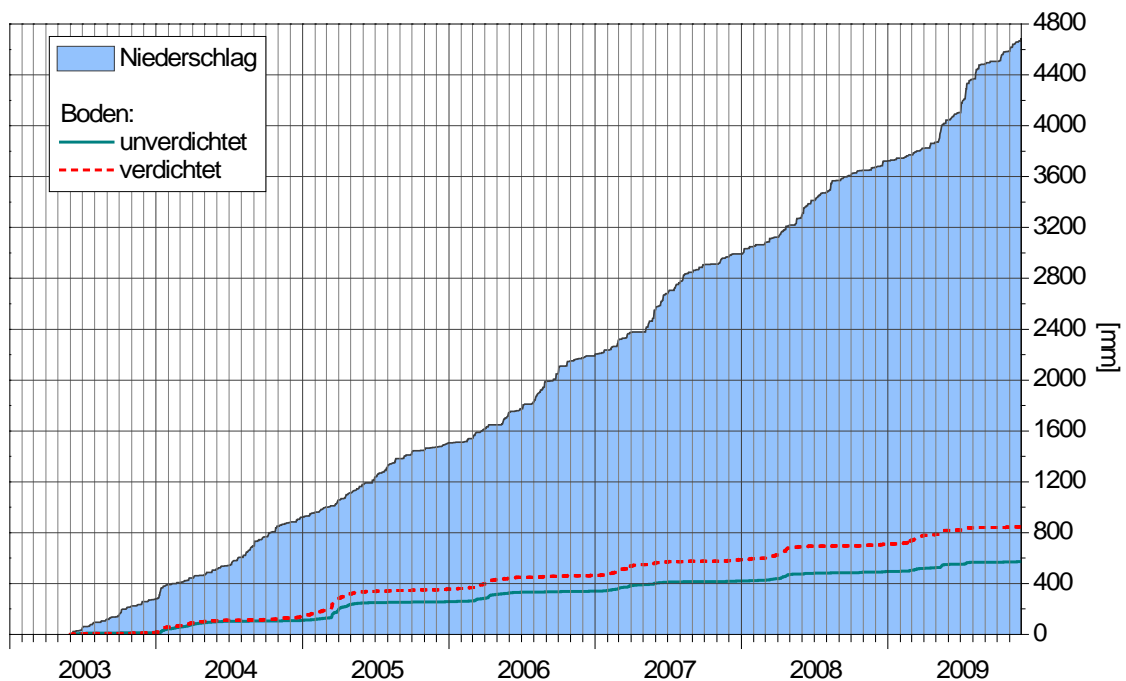


Abbildung 3: Niederschlag in Leonberg und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U (Boden unverdichtet) und K (verdichtet) von Juni 2003 bis November 2009

Die bis 30.11.2009 fortgeschriebenen Summen der Sickerwassermengen aus den Lysimeterfeldern U (Boden unverdichtet) und K (Boden konventionell verdichtet) in Abbildung 3 zeigen wie in der Vergangenheit weiterhin einen nahezu synchronen, aber nicht genau parallelen Verlauf der beiden Absickerungskurven, so dass sich ihre Distanz 2009 weiter vergrößert hat. Die Niederschlagssumme seit dem Beginn kontinuierlicher Messungen am 1.6.2003 betrug bis zum 30.11.2009 insgesamt 4690 mm. Hiervon versickerten im K-Feld 848 mm, also circa 18 % des Niederschlags. Im U-Feld waren dagegen insgesamt nur 572 mm Sickerwasser zu verzeichnen, circa 12 % der Gesamt-Niederschlagsmenge. Aus dem U-Feld versickerte demnach bislang fast 1/3 weniger Wasser als aus dem K-Feld. Der im Vergleich zur Niederschlagskurve erheblich flachere Anstieg der Sickerwasserlinien - vor allem im Jahr 2009 - in Abbildung 3 belegt, dass der Anteil des Sickerwassers am Niederschlag nach wie vor geringer wird.

Eine genauere Betrachtung der jährlichen Sickerwassermengen aus Lysimeterfeld U seit 1. Januar 2002³ (Abbildung 4) zeigt anfangs sehr hohe Absickerungsraten. Diese betragen im Jahr 2002 circa 45 % und 2003 immerhin 37 % des Niederschlags. In den Jahren 2007 und 2008 versickerten jeweils nur noch circa 10 % der Jahresniederschlagsmenge. Es ist zu erkennen, dass die absoluten Sickerwassermengen im Lauf der Zeit deutlich und im Prinzip kontinuierlich zurückgehen. Hierbei spielt jedoch die Witterung eine große Rolle. So führten hohe Verdunstung und geringer Niederschlag des „Jahrhundertssommers“ 2003 noch im Folgejahr 2004 zu reduzierten Sickerwassermengen. Im Winter 2003/04 wurde zuerst der tief entleerte Bodenwasserspeicher aufgefüllt, so dass nur geringe Sickerwassermengen im Januar und Februar 2004 auftraten. Die sehr ungleichmäßige saisonale Verteilung der Sickerwassermengen mit starkem Übergewicht im Winterhalbjahr ist auch in dieser Abbildung offensichtlich. Lediglich im Jahr 2009 ist auf Grund des hohen Anteils der Sommerniederschläge die Absickerung nahezu gleichmäßig verteilt.

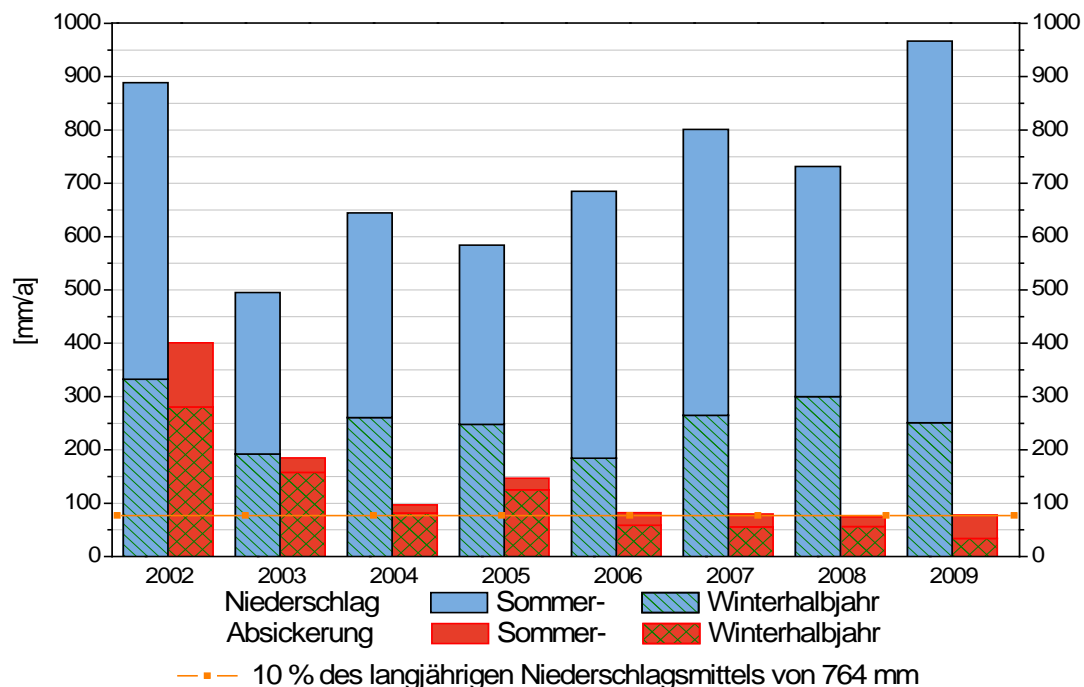


Abbildung 4: Niederschlag in Leonberg und Absickerung aus Lysimeterfeld U (Boden unverdichtet), Jahressummen 2002 bis 2008; 2009 nur bis 30.11.

Bleibt das außergewöhnlich sommertrockene Jahr 2003 unberücksichtigt, so zeigen sich bisher zwei Entwicklungsphasen: In den ersten Jahren, bis 2005, ist die Absickerung mit grundsätzlich abnehmender Tendenz relativ hoch. Danach beginnt eine Phase mit geringerer Absickerung um 10 % der Jahresniederschlagsmenge, bedingt durch die ansteigende Verdunstungsleistung der Gehölze. Dieses Ergebnis deckt sich gut mit Beobachtungen auf Testfeldern der Deponie Georgswerder (WATTENDORF & SOKOLLEK 2003). Abbildung 4 zeigt außerdem, dass inzwischen die Sickerwassermengen knapp unterhalb der Grenze von 10 %

³ Von Feld K liegen erst seit Juni 2003 durchgehende aussagekräftige Messwerte der Sickerwassermengen vor.

des langjährigen Mittels der Jahresniederschläge liegen. Die Funktion der Rekultivierungsschicht als „natürliches Dichtungssystem“ ist dabei aber zwangsläufig vom Witterungs-geschehen abhängig. Die relativ geringe Differenz zwischen den Sickerwassermengen der Jahre 2006 bis 2009 bei allerdings stark unterschiedlichen Niederschlagsmengen zwischen 685 mm (2006) und 967 mm (bis 30.11.2009) legen aber den Schluss nahe, dass solche Witterungs-unterschiede in gewissen Umfang abgepuffert werden können. Außerdem kann angenommen werden, dass die weitere Gehölzentwicklung den Wirkungsgrad der Rekultivierungsschicht in Leonberg insgesamt noch steigert. Die bisher erreichte Verbesserung der Verdunstungs-leistung des Gehölzbestandes zeigt ein Vergleich der Jahre 2009 (bis 30.11., N = 967 mm) und 2002 (N = 889 mm): 2009 wurde bei überdurchschnittlichen Niederschlägen nur noch 19 % der Sickerwassermenge von 2002 gebildet (78,1 mm gegenüber 401,0 mm).

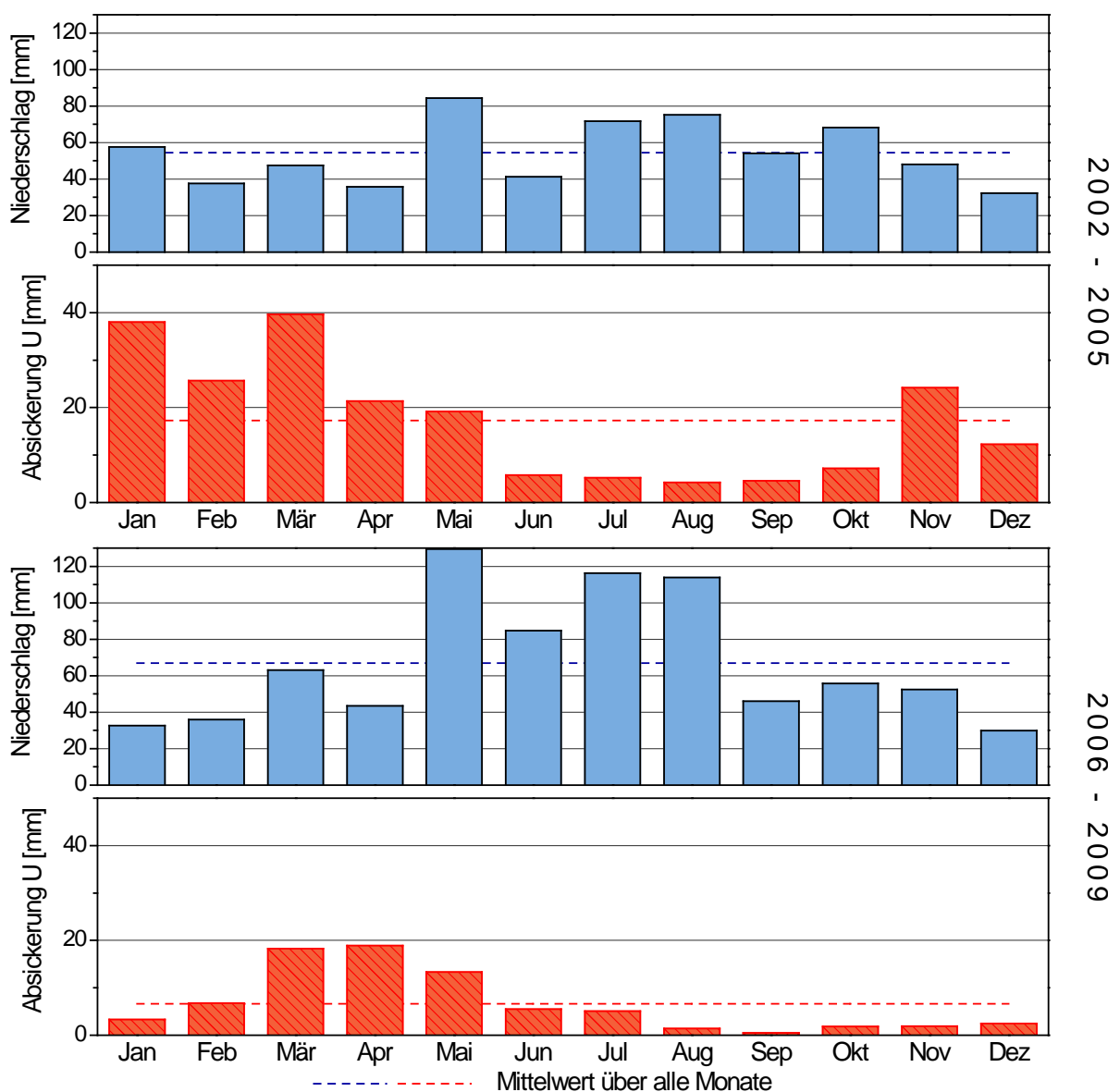


Abbildung 5: Mittlere Monatssummen [mm] von Niederschlag und Absickerung aus dem U-Feld in den Jahren 2002 - 05 (oben) und 2006 - 2009 (unten); Daten 2009 nur bis 30.11.

In Abbildung 5 wird die saisonale Verteilung von Niederschlag und Absickerung anhand der gemittelten Monatssummen in den Phasen 2002 - 05 und 2006 - 09 gezeigt, um den Einfluss der sich entwickelnden Gehölze zu verdeutlichen: Trotz durchgehend höherer Niederschläge von Mai bis August sind die Sickerwassermengen dieser Monate in der zweiten Phase von 2006 - 09 stets niedriger als in der ersten Phase, was nur durch höhere Transpiration der Pflanzen erklärt werden kann. Weiterhin fällt auf, dass im Herbst und Winter (September bis Dezember) bei nur geringfügig kleineren Niederschlagsmengen in der zweiten Phase im Mittel kaum noch Sickerwasser anfällt. Auch dieser Effekt ist mit dem höheren Wasserverbrauch und daraus resultierender stärkerer Entwässerung der Rekultivierungsschicht durch die größeren 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 versickert. In der zweiten Phase war dies im Mittel erst im Monat März der Fall.

4. Literatur

- BRAUNS, J., KAST, K., SCHNEIDER, H., KONOLD, W., WATTENDORF, P. & B. LEISNER (1997):
Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfallkonformer
Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall Band 13, 97 S. + Anhang, Karlsruhe
- DGGT = DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2000): GDA-Empfehlung E 2-31
Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617 – 626
- Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, BGBl 2009 Teil I Nr. 22, vom 29.4.2009,
S. 900 - 950
- WATTENDORF, P. (2005): Konzeption einer Wasserhaushaltsschicht für die Deponie Neuen-
burg (BA I), in: Institut für Landespflege [Hrsg.]: Tagungsband der Fachtagung
„Qualifizierte Rekultivierungsschichten“: 130 – 145, Freiburg
- WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2005): Rekultivierungsschichten und
Wurzelsperren, Herstellung – Eigenschaften – Bodenentwicklung – Funktion, Culterra
Band 41, 269 S., Freiburg
- WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN (2007): Wasserhaushalt qualifizierter Rekulti-
vierungsschichten (BWU 26004), 11 S., <http://www.bwplus.fzk.de>
- WATTENDORF, P. & V. SOKOLLEK (2003): Gestaltung und Entwicklung des Bewuchses auf
Rekultivierungsschichten von Deponien und Altlasten, Schriftenreihe Geotechnik,
Heft 10/1: 171 –183, Weimar