

**Hydrologisches Monitoring für ein alternatives
Deponieoberflächenabdichtungssystem**

LANUV-Fachbericht 35

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2011

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de
Autor	Prof. Dr. Harald Zepp, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Geowissenschaften, Geographisches Institut - Angewandte Physische Geographie
Projektbetreuung	Dr. Michael Tiedt (LANUV NRW)
Fotos	Prof. Dr. Harald Zepp, außer Abb. 2: A. Kadelka, BFUB
Titelbild	Zeitlicher Verlauf von Wasserspannungen in einer Rekultivierungsschicht im Vergleich zu Niederschlagsmengen
ISSN	1864-3930 LANUV-Fachberichte
Informations- dienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179
Bereitschafts- dienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV NRW (24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488 Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	3
Einleitung	4
1 Projektgrundlagen	5
2 Versuchsaufbau	7
3 Geotechnisch-bodenphysikalische Materialkennzeichnung	14
4 Hydrologische Messreihen und Bilanzen	19
4.1 Messreihen	19
4.1.1 Niederschlag und Witterung	19
4.1.2 Wasserspannungen	20
4.1.3 Wassergehalte	24
4.1.4 Abfluss	28
4.2 Tracerversuche	37
4.3 Bilanzen	38
4.3.1 Methodische Vorbemerkung	38
4.3.2 Verdunstung und lateraler Abfluß	40
5 Diskussion und Schlussfolgerungen	48
6 Sensitivitätsanalysen zum Einfluss unterschiedlicher Hangneigungen und Vegetationsbestände	55
Zusammenfassung	57
Literatur	58
Abbildungsverzeichnis	60
Tabellenverzeichnis	62

Einleitung

Das *Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen* (bis 2006: *Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen*) hat in den Jahren 1998 bis 2010 ein Untersuchungsvorhaben begleitet, mit dem die Funktionsfähigkeit eines Deponieoberflächenabdichtungssystems überprüft werden sollte, das alternativ zu den Regelanforderungen der TA Siedlungsabfall konzipiert worden ist.

Das Untersuchungsvorhaben wurde im Wesentlichen durch die folgenden Institutionen getragen und begleitet:

- *Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH (AGR)*
- *Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Geowissenschaften, Geographisches Institut – Angewandte Physische Geographie*
- *Bezirksregierung Münster, Dezernat 52*
- *Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Fachbereich 72*

Die baulichen Anlagen und die technische Infrastruktur wurden von der *AGR* bereitgestellt.

Die hydrologischen Messungen und Auswertungen wurden durch die *Ruhr-Universität Bochum* im Auftrag des *LANUV* vorgenommen. Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird im vorliegenden Fachbericht abschließend berichtet.

1 Projektgrundlagen

Die *Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH (AGR)* betreibt seit 1983 die von der Stadt Castrop-Rauxel übernommene Zentraldeponie Castrop-Rauxel. Sie ist in die Deponieklasse II eingestuft und gilt als eine Altdeponie im Sinne der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TA Siedlungsabfall) Nummer 11. Zum Nachweis, dass auch ein zu dem in der TA Siedlungsabfall beschriebenen Oberflächenabdichtungssystem alternativer Aufbau gewählt werden kann, wurden 1999 auf Vorschlag der *Abfallentsorgungsgesellschaft Ruhrgebiet (AGR) mbH* in Essen unter Beteiligung des *Landesumweltamtes Düsseldorf*, des *Geographischen Institutes der Ruhr Universität Bochum* und des *Erbaulabors Dr. Hennig* auf Versuchsfeldern der Zentraldeponie Castrop-Rauxel zwei alternative Oberflächenabdichtungen hergestellt.

In beiden mehrschichtigen Oberflächenabdichtungssystemen ist auf den Einbau einer Kunststoffdichtungsbahn verzichtet worden; deren Funktion soll eine Dichtungsschicht aus bindigem Lehm in ausreichender Stärke bei gleichzeitigem Einbau einer mächtigen, wasserspeichernden Rekultivierungsschicht übernehmen. So beinhalten beide Oberflächenabdichtungssysteme eine 1 m starke Dichtungsschicht aus kontrolliert verdichtetem Lehm, der in feuchtem Zustand eingebaut worden ist, und eine 1,3 m dicke Rekultivierungsschicht. Es war zu prüfen, ob das Abdichtungssystem unter den gegebenen Einbaubedingungen dauerhaft in der Lage ist, die Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper auf ein Maß zu senken, „dass das anfallende Sickerwasser hinsichtlich Menge und Qualität zu keiner Gewässerbeeinträchtigung führt“ (TA Siedlungsabfall Nummer 11.2.1 h). Dazu muss die Wasserdurchlässigkeit der Dichtungsschicht nach dem Einbau so gering sein, dass die Durchsickerung im oben angeführten, von der TA Siedlungsabfall geforderten Sinne wirksam reduziert ist. Neben der Wasserdurchlässigkeit der Dichtungsschicht bestimmen die in den mehrschichtigen Systemen auftretenden hydraulischen Potentialgradienten Richtung und Stärke der Wasserflüsse; sie variieren in Abhängigkeit vom Klima und vom Bewuchs. Somit bestand die zentrale Aufgabe des Forschungsprojekts in der Quantifizierung aller relevanten Wasserflüsse und Wasserhaushaltsgrößen am Standort Castrop-Rauxel.

Darüber hinaus war zu prüfen, ob das Abdichtungssystem langfristig stabil ist und insbesondere eine Gefährdung der Dichtwirkung durch die Bildung von Rissen in der Dichtungsschicht auszuschließen ist. Häufigste Ursache für eine Rissbildung in Dichtungsschichten ist Austrocknung. Risse in Dichtungsschichten würden - insbesondere nach Starkregen - schnellen und quantitativ bedeutsamen Wassertransport verursachen.

Der Wasserhaushalt von bautechnisch hergestellten Abdichtungssystemen unterliegt den gleichen Bedingungen wie der auf allen Landoberflächen. Für die Tiefensickerung (Durchsickerung durch die Dichtungsschicht) gilt:

$$Q_t = N - I_v - E - T - Q_o - Q_z \pm dB$$

Q_t	=	Tiefensickerung
N	=	Niederschlag
I_v	=	Interzeptionsverdunstung
E	=	Evaporation
T	=	Transpiration
Q_o	=	Oberflächenabfluss
Q_z	=	Zwischenabfluss (lateraler Abfluss)
dB	=	Bodenwasserspeicheränderung

In den alternativen Oberflächenabdichtungssystemen auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel sind in einem nunmehr 11-jährigen, umfangreichen Untersuchungsprogramm vorrangig die folgenden Wasserflüsse ermittelt und quantifiziert worden:

- der abwärts gerichtete Wasserfluss durch die Rekultivierungsschicht (Wurzelraum)
- ggf. der laterale Abfluss an der Grenzfläche zur kontrolliert verdichteten Schicht
- die Durchsickerung durch die kontrolliert verdichtete Schicht in den Deponiekörper hinein.

In Ergänzung zu dem regelmäßigen, periodischen Berichtswesen, sind im Folgenden die wichtigsten Messergebnisse und Erkenntnisse des Gesamtzeitraums zu einem Gesamtbild zusammengefasst.

2 Versuchsaufbau

Die Stationen 2a und 2b¹ sind Ende August 1999 im noch nicht rekultivierten Bereich der Deponie Castrop-Rauxel fertig gestellt und in Betrieb genommen worden. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 1 skizziert; unterhalb der alternativ vorgeschlagenen Oberflächenabdichtungssysteme sind Betonwannen mit Kies-Sand-Füllungen (Abbildung 2) errichtet worden.

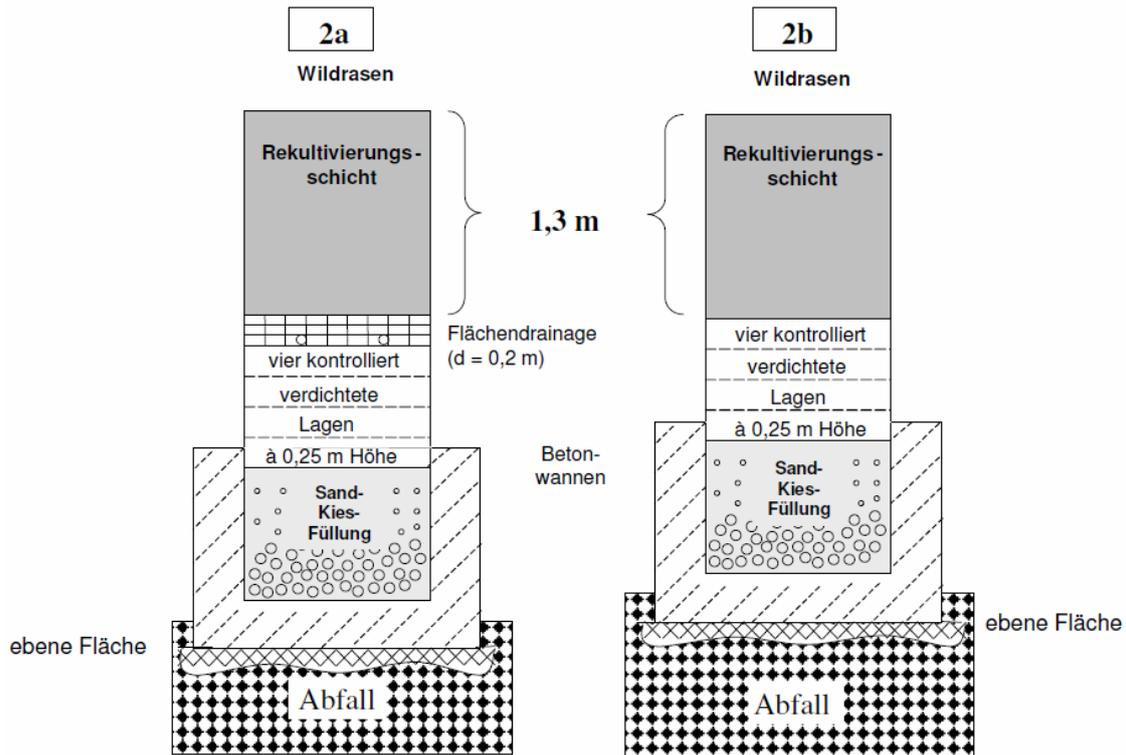


Abbildung 1 Aufbau des Abdichtungssystems auf Station 2a und b

¹ In diesem Bericht werden die Messflächen und die auf ihnen errichteten Messeinrichtungen als Station 2a, 2b sowie 2ax und 2bx bezeichnet und in ihrem Aufbau erläutert. Die Station 1, an der früher einmal anderen, außerhalb dieses Berichtes stehenden Fragestellungen nachgegangen worden war, wird in diesem Fachbericht nicht weiter erwähnt. Um die Kontinuität und die Übereinstimmung mit dem bisherigen Berichtswesen einschließlich der über dieses Projekt vorliegenden Publikationen beizubehalten, wurde auf eine neue Nummerierung verzichtet.



Abbildung 2 Betonwanne mit Kies-Sandfüllung
Foto: A. Kadelka, BFUB, Oktober 1998

Auf Station 2a wurde eine 20 cm starke Flächendrainage aus Schmelzkammergranulat ($k_f > 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) aufgetragen (Abbildung 3 und Abbildung 4). Auf das Granulat ist der Rekultivierungsboden mit einer Mächtigkeit von 1,30 m unverdichtet großtechnisch aufgebracht worden.

Auf Station 2b wurde auf die als Flächendrainage wirkende Schmelzkammergranulatschicht verzichtet. In einer Stärke von 1,30 m liegt hier der Rekultivierungsboden unmittelbar auf der kontrolliert verdichteten Schicht (Abbildung 1). Der Rekultivierungsboden wurde auf den Stationen 2a und 2b in den Tiefen 30, 60, 90 cm zur Feststellung der geotechnisch-bodenphysikalischen Parameter beprobt.



Abbildung 3 Profil des Oberflächenabdichtungssystems mit 25 cm mächtiger Granulatschicht als Flächendränage Aufnahme im Sept. 2001, zwei Jahre nach dem Einbau



Abbildung 4 Detailansicht der Granulatschicht vgl. Abbildung 3

Zeitgleich mit dem Einbau der Granulatschicht wurde auf Station 2a eine Felddrainage in der Tiefe der Unterkante der Granulatschicht verlegt (Abbildung 5). Die Drainagen sind so eingebaut, dass die Abflüsse den einzelnen Quadranten der Betonwanne (je 25 m²; vgl. Abbildung 2) zugeordnet werden können. Um laterale Zuflüsse zu vermeiden, wurden weitere, in Abbildung 5 nicht dargestellte Drainstränge in der Umgebung der Station 2a verlegt. Außerdem ist auf der Mittelachse zwischen den Stationen 2a und 2b ein Drainsammler eingebaut, der Wasserübertritte zwischen den Umgebungen der Stationen 2a und 2b verhindert.

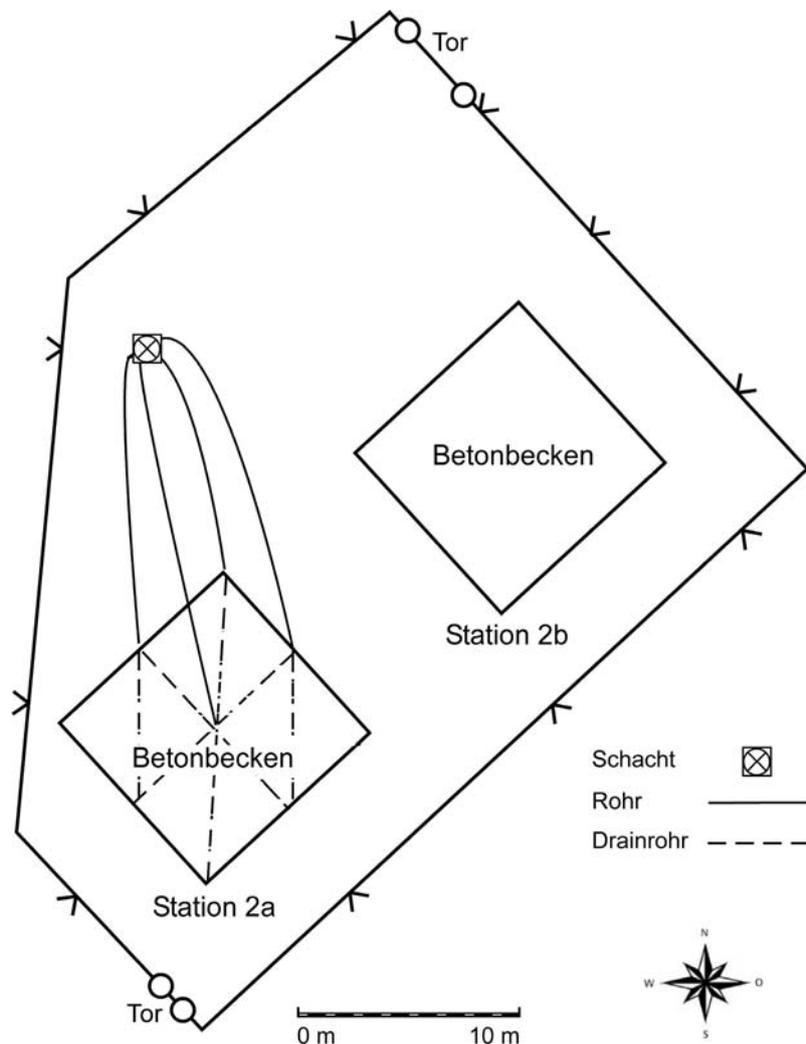


Abbildung 5 Lage der Versuchsfelder 2a und 2b mit Anordnung der Drainageleitung für Feld 2a

Nördlich unterhalb der Versuchsfelder 2a und 2b ist ein ca. 5,0 m tiefer Messschacht aus PE-HD errichtet (Abbildung 5 und Abbildung 6), in den die Oberflächendrainagen der Station 2a, der Drainsammler und die Betonwannenabläufe der Stationen 2a und 2b münden. Das Längsgefälle der Zuleitungen beträgt etwa 1-2 %. Die geringe Distanz zwischen Betonwannen und Schacht soll Messgenauigkeiten durch Benetzungsverluste innerhalb der Rohrleitungen minimieren. An der Sohle des Messschachtes ist eine Ablaufleitung mit Gefälle zur Deponieaußenböschung angeschlossen worden.

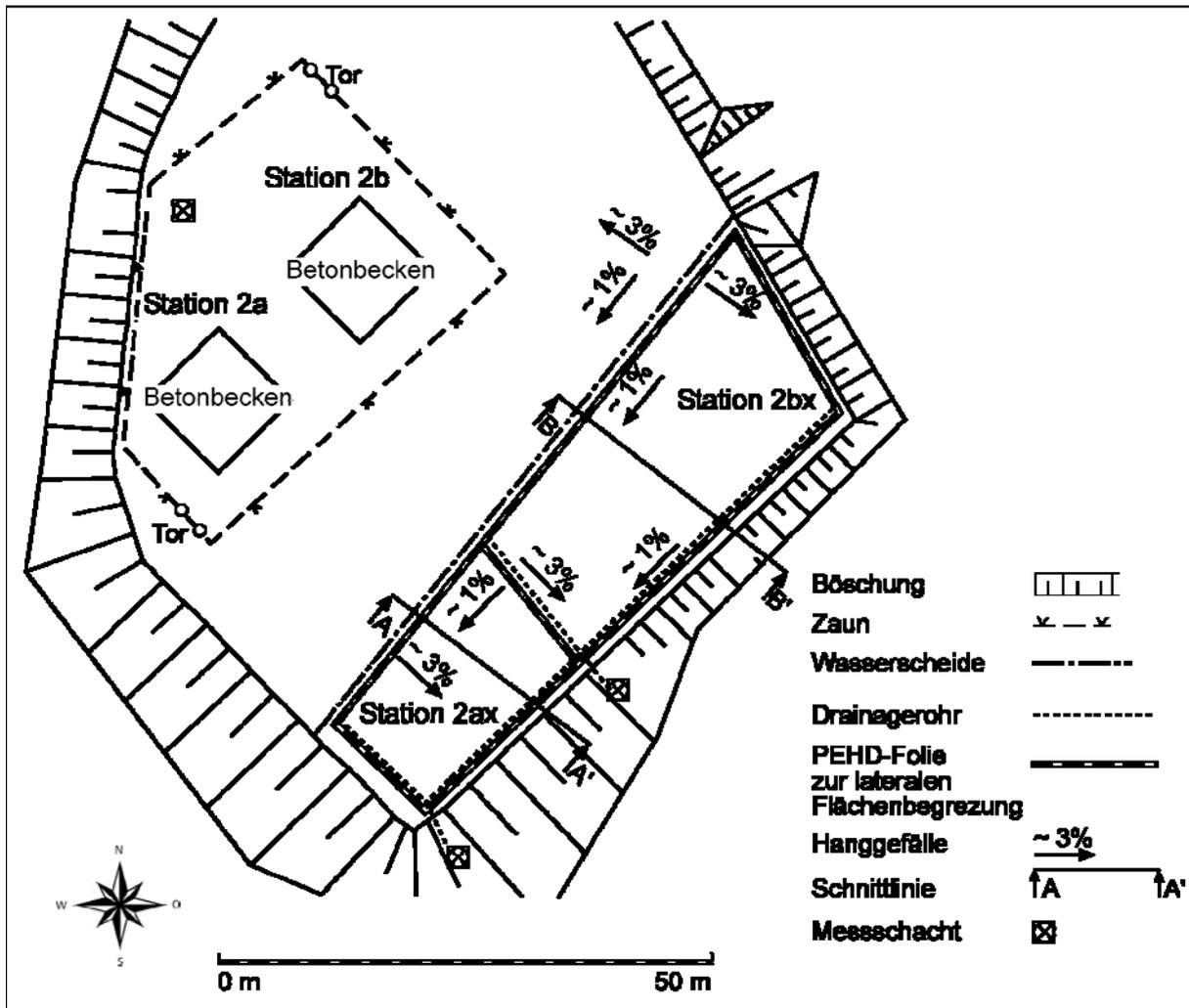


Abbildung 6 Lage der Versuchsflächen

Die Herstellung des Abdichtungssystems auf Station 2 wurde Anfang August 1999 mit der Einsaat einer Grünlandmischung (Zusammensetzung: Klee, Luzerne, Lieschgras, versch. Deutsches Weidelgras-Arten) abgeschlossen. Zur Vorbereitung des Bodens wurde eine Kalk- und Kompostgabe ausgebracht, um die Nährstoffverfügbarkeit im Boden sicherzustellen und Bodenleben zu initiieren.

Messtationen 2ax und 2bx

Der gesamte laterale Wasserfluss war bis Herbst 2001 nur als Restglied (Q_z) der Wasserbilanzgleichung (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) berechnet worden. Methodische Unsicherheiten, die bei der Messung und Bestimmung der übrigen Bilanzglieder unvermeidbar sind (Niederschlags- und Bodenfeuchtemessung, Verdunstungsbestimmung), wirken sich auf die Bilanzierung aus (vgl. Kapitel 5). Deshalb entstand das Bedürfnis, auch den lateralen Abfluss messtechnisch zu erfassen. Hierzu wurden die Flächen 2ax und 2bx mit einem identischen Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems vorbereitet. Um die hydraulischen Verhältnisse der bestehenden Stationen 2a und 2b nicht zu modifizieren, liegen sie auf dem Deponieplateau jenseits der ober- und unterirdischen Wasserscheide (Abbildung 6). Sie bilden große Lysimeter, deren Basis die kontrolliert ver-

dichtete Schicht ist. Somit wird überprüfbar, ob die berechneten Flüsse in der Größenordnung der gemessenen liegen.

Die Versuchsflächen zur Ermittlung des lateralen Abflusses oberhalb der kontrolliert verdichteten Schicht sind 352 m² (Station 2ax) und 711 m² (Station 2bx) groß. Der Aufbau dieser beiden Versuchsfelder (Stationen 2ax und 2bx) und die Fassung des lateralen Flusses über die Drainleitungen sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt. Zu den Seiten und gegeneinander sind die Materialien durch Kunststoffdichtungsbahnen abgetrennt. Um die Folie zur Flächenbegrenzung einzubauen, wurde die kontrolliert verdichtete Schicht lokal in Gräben bis in 25 cm aufgeschlitzt. Anschließend wurde die Folie hineingelegt und durch Ton mit der Dichtungsschicht verklebt. Darüber wurde zur Wasserfassung eine Fangdrainage mit Granulatüberdeckung eingebaut.

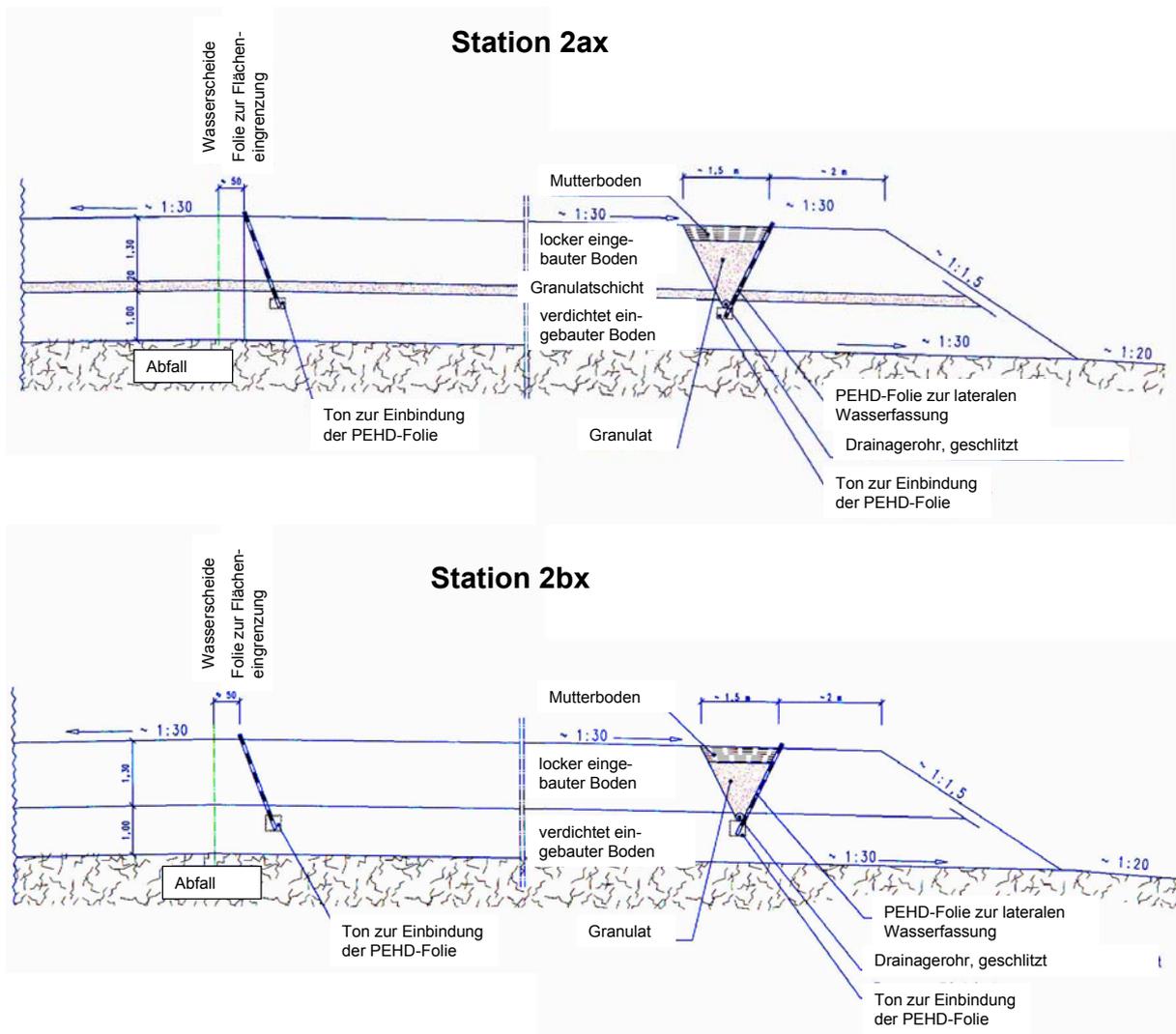


Abbildung 7 Versuchsaufbau der Stationen 2ax und 2bx

Instrumentierung

Im Oberflächenabdichtungssystem oberhalb der Betonwannen sind vollautomatische Druckwandler-Tensiometer in vertikalen Abständen von 0,3 m bis in eine Tiefe von 2,1 m (6 Parallelen à 7 Tiefenstufen) im Abdecksystem installiert (Abbildung 8). Die Tensiometer sind stati-

onsweise an Datenlogger angeschlossen. Das Intervall der Datenaufzeichnungen beträgt eine Stunde. Ergänzend zu den Tensiometern sind 6 TDR-Sonden-Messrohre vertikal installiert worden, in denen bis Ende 2003 einmal wöchentlich das Bodenwassergehalts-Tiefenprofil bestimmt wurde.

Die im Messschacht installierten Kippzähler erfassen sowohl die Abflüsse der 4-teiligen Betonwannen auf den Stationen 2a und 2b als auch den Abfluss der Felddrainage auf Station 2a. Von den 4 Abflüssen aus jeder Betonwanne werden 2 Teilströme zusammengefasst und über einen Kippzähler gemessen (2 Kippzähler je Wanne). Gemeinsam erfasst werden jeweils die beiden rechten und die beiden linken Hälften der Betonwannen. Somit beziehen sich die in einem Kippzähler gemessenen Abflüsse auf eine Gesamtfläche von 50 m². Die Abflüsse aus den vier diagonal über der Betonwanne 2a in der Granulatschicht eingebauten Felddrainagen werden separat über je einen Kippzähler erfasst. Alle Messwerte werden über Datenlogger in einem Messintervall von einer Stunde abgerufen und gespeichert. Jeweils ein Hundertstel des Abflussvolumens wird automatisch in Sammelgefäßen gesammelt und wöchentlich gemessen (ausgelitert), um die Loggerregistrierungen kontrollieren zu können.

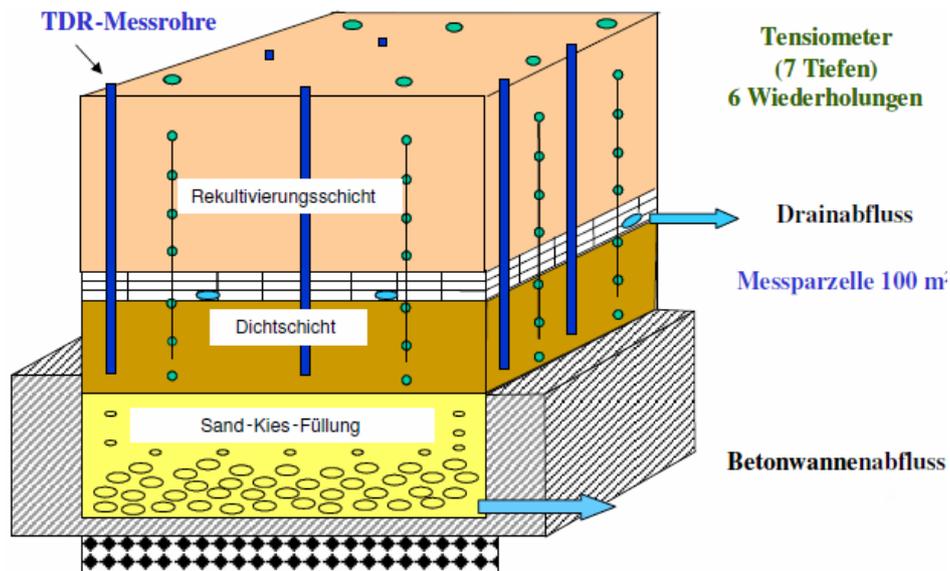


Abbildung 8 Instrumentierung der Station 2a

Die lateralen Abflüsse oberhalb der kontrolliert verdichteten Schicht an den Stationen 2ax und 2bx werden getrennt gefasst und ebenfalls über Kippzähler zu Messintervallen von einer Stunde von einem Datenlogger registriert. Im Jahr 2003 erfolgte ein Austausch der Kippzähler durch größere Geräte, um sicherzustellen, dass Spitzenabflüsse vollständig erfasst werden können. Zusätzlich sind zur Kontrolle der automatischen Messungen Wasseruhren im Ablauf eingebaut, die in der Lage sind, auch große Abflüsse zu quantifizieren. Diese doppelten Messungen wurden eingeplant, um bei einem Ausfall der Elektronik oder der Kippzähler keinen gravierenden Datenverlust zu riskieren.

An der Wetterstation der Zentraldeponie Castrop-Rauxel wurden die für die Dokumentation des Witterungsgeschehens und für Bilanzrechnungen wichtigen Klimadaten Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte gemessen und stündlich registriert.

3 Geotechnisch-bodenphysikalische Materialkennzeichnung²

Für die Stationen 2a und 2b liegen Daten zur geotechnisch-bodenphysikalischen Kennzeichnung für die im Sommer 1999 oberhalb der Betonwannen (Lage 1-4) ausgebrachten kontrolliert verdichteten Lagen sowie für die Rekultivierungsschichten vor. Lage 1 ist die zuerst ausgebrachte, kontrolliert verdichtete Schicht, liegt also ca. 230 cm unterhalb der jetzigen Geländeoberkante.

Im Spätsommer 2001 erfolgte eine erneute Aufgrabung und Beprobung des Abdichtsystems an dessen südöstlichem Rand.

Zur Feststellung der Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit, Trockendichte, Proctordichte und der pF-Kurve wurden Stechzylinderproben entnommen, ebenso gestörte Proben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung. Vom *Erdbaulabor Dr. Hennig* wurden die Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) [nach DIN 18130, Teil 1], Proctor-Dichte (ρ_{pr}) [nach DIN 18127 - 9 100 Y], Trockendichte (ρ_d) [nach DIN 18125] und Körnung [nach DIN 18123] untersucht, die pF-Kurve wurde von der *Ruhr-Universität Bochum* mittels Verdunstungsmethode bestimmt. Die wichtigsten Ergebnisse sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

² vgl. auch die ergänzenden Untersuchungen von Kiewitt (2010) und die weiterführenden Betrachtungen von Zepp (2010b)

Tabelle 1 Geotechnisch-bodenphysikalische Eigenschaften der Stationen 2a und 2b
Mittelwerte unmittelbar nach dem Einbau

Tiefe	Station 2a			Station 2b		
	k_f	ρ_d	D_{pr}	k_f	ρ_d	D_{pr}
	[m/s]	[g/cm ³]	[%]	[m/s]	[g/cm ³]	[%]
30 cm, Rekultivierungsschicht	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1,72	94,0	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,67	90,9
60 cm, Rekultivierungsschicht	$4,4 \cdot 10^{-6}$	1,65	90,7	$2,6 \cdot 10^{-7}$	1,69	91,8
90 cm, Rekultivierungsschicht	$5,7 \cdot 10^{-7}$	1,70	92,9	$9,4 \cdot 10^{-6}$	1,69	93,9
4. Lage (kontrolliert verdichtete Schicht) 2a: 175-200 cm; 2b: 130-155 cm	$5,2 \cdot 10^{-9}$	1,63	89,8	$2,2 \cdot 10^{-9}$	1,61	88,7
3. Lage (kontrolliert verdichtete Schicht) 2a: 175-200 cm; 2b: 155-180 cm	$3,8 \cdot 10^{-10}$	1,71	94,2	$2,8 \cdot 10^{-10}$	1,69	93,1
2. Lage (kontrolliert verdichtete Schicht) 2a: 200-225 cm; 2b: 180-205 cm	$2,3 \cdot 10^{-10}$	1,68	92,6	$3,1 \cdot 10^{-10}$	1,70	93,7
1. Lage (kontrolliert verdichtete Schicht) 2a: 225-250 cm; 2b: 205-230 cm	$6,3 \cdot 10^{-10}$	1,64	90,4	$7,3 \cdot 10^{-9}$	1,70	93,7

In der Rekultivierungsschicht waren die k_f -Werte unmittelbar nach dem Einbau und auch bei der Nachuntersuchung um 2-3 Zehnerpotenzen höher (10^{-8} - 10^{-6} m/s) als in der kontrolliert verdichteten Schicht.

Die Körnungsdiagramme für die „kontrolliert verdichteten Schichten“ zeigen Abbildung 9 und Abbildung 10.

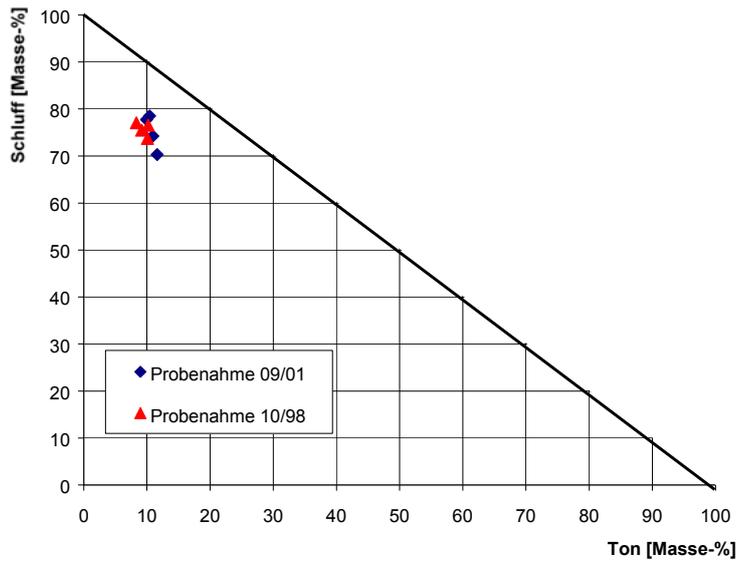


Abbildung 9 Körnungsdigramme der „Kontrolliert verdichteten Schicht“ der Station 2a

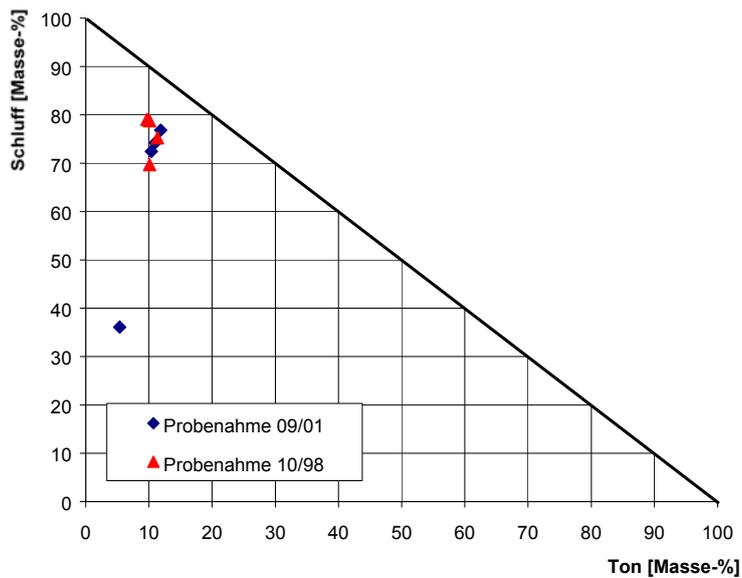


Abbildung 10 Körnungsdigramme der „Kontrolliert verdichteten Schicht“ der Station 2b

Die Körnungsdigramme für die Rekultivierungsschichten zeigen Abbildung 11 und Abbildung 12.

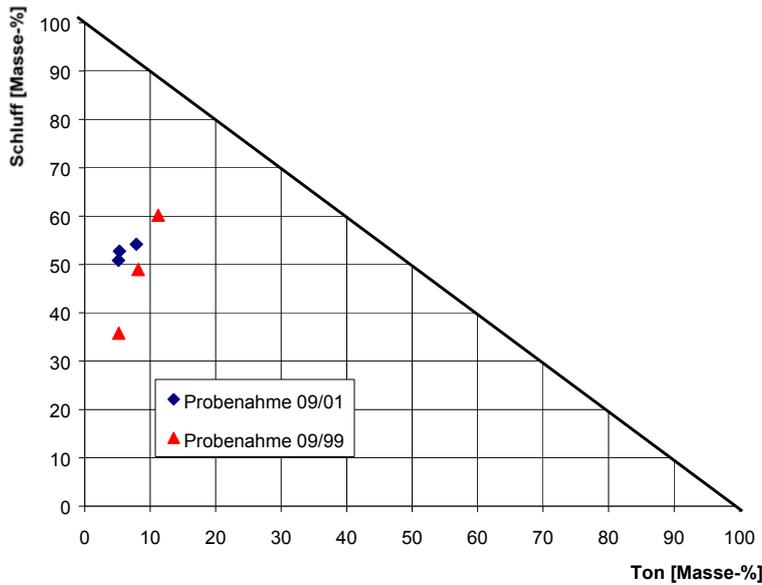


Abbildung 11 Körnungsdiagramm der „Rekultivierungsschicht“ der Station 2a

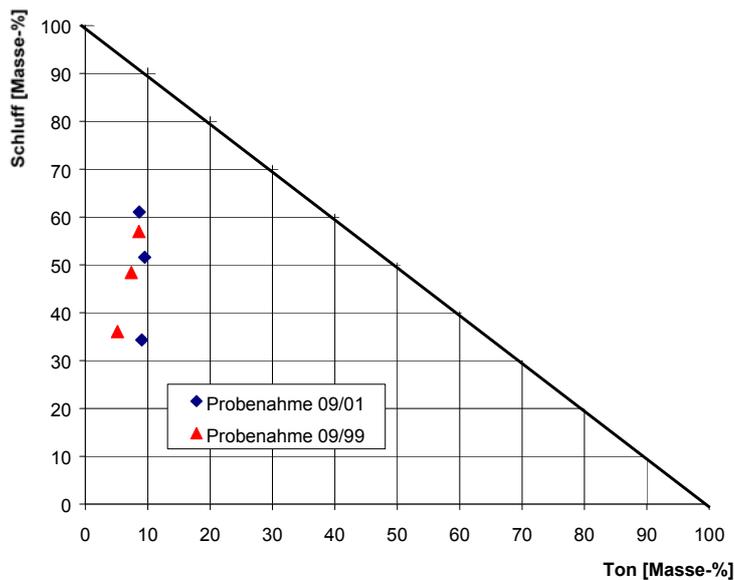


Abbildung 12 Körnungsdiagramm der „Rekultivierungsschicht“ der Station 2b

Die Oberflächenabdichtungssysteme an Station 2, die mit Verdichtungskontrolle aufgebaut worden sind, zeigen die angestrebten systematischen Unterschiede der gesättigten Wasserleitfähigkeit zwischen Rekultivierungsschicht und kontrolliert verdichteter Schicht. Die Körnung ist homogen und wird durch Schluffanteile zwischen 70 und 80 % sowie Tonanteile von rund 10% charakterisiert; es handelt sich durchweg um schwach tonigen Schluff mit leicht plastischen Eigenschaften. Die k_f -Werte aller kontrolliert verdichteten Lagen liegen zwischen 10^{-10} und 10^{-9} m/s. Die Proben wurden unmittelbar nach Einbau und Verdichtung einer jeden 25 cm starken Lage entnommen. Die mittleren Verdichtungsgrade von 92% liegen knapp unterhalb einer optimalen Verdichtung; während des Einbaus war das Material sehr feucht.

Die Trockenrohdichten lagen bei $1,67 \text{ g/cm}^3$. Bei ähnlichen Bodenarten, gleichen Trockenrohdichten und Verdichtungsgraden in der Rekultivierungsschicht ist die geringere gesättigte Wasserleitfähigkeit der unteren Lagen auf die Verdichtung mit der Schafffußwalze zurückzuführen. Dadurch sind die Anteile der bevorzugt wasserleitenden Grob- und Mittelporen minimiert worden. Bei einer Nachuntersuchung zwei Jahre nach dem Einbau (Tabelle 2) wurden bei ähnlichen Wasserleitfähigkeiten höhere Trockenrohdichten ($1,78 \text{ g/cm}^3$) und Verdichtungsgrade (98%) angetroffen. Dies kann mit einer auflastbedingten Nachverdichtung erklärt werden [21].

Tabelle 2 Geotechnisch-bodenphysikalische Eigenschaftender verdichteten Lagen an den Stationen 2a und 2b
Mittelwerte bei einer Kontrolle 2 Jahre nach dem Einbau

Nr.	Parameter	Mittelwert	Bemerkungen
1	Trockendichte (ρ_d)	$1,78 \text{ g/cm}^3$	n = 24
2	Proctordichte (ρ_{Pr})	$1,81 \text{ g/cm}^3$	n = 24
3	Verdichtungsgrad (D_{Pr})	98,3 %	berechnet aus 1 und 2
4	gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)	$1,0 * 10^{-9} \text{ m/s}$	n = 24

4 Hydrologische Messreihen und Bilanzen

4.1 Messreihen

4.1.1 Niederschlag und Witterung

Auf der Wetterstation der *Zentraldeponie Castrop-Rauxel* (bzw. Bochum, Datteln/Emscherbruch) wurden im Zeitraum 04.09.1999 – 28.10.2010 insgesamt 9.391,7 mm Niederschlag registriert. (siehe Tabelle 3).

Besonders regenreiche Kalenderjahre waren 2000, 2002 und 2007 mit bis zu 190 mm mehr Niederschlag am Messstandort, als dem langjährigen Mittel der Vergleichsstation Bochum entspricht. Im trockensten Jahr 2003 blieb der Niederschlag etwa 60 mm unter dem langjährigen Mittel. Wegen der hohen Juli-Niederschläge (Gewitterregen) fiel der „Jahrhundertsummer“ in Castrop-Rauxel nicht ganz so trocken aus wie in anderen Teilen Nordrhein-Westfalens.

Bemerkenswert trocken blieben die Hydrologischen Sommerhalbjahre 2001 und 2003 sowie das Frühjahr 2010. Der August dieses Jahres war mit 192,8 mm der niederschlagsreichste Monat im gesamten Untersuchungszeitraum. Eine Sonderstellung nahm das Jahr 2009 ein: Fünf trockene Monate umrahmen einen sehr regenreichen Juli.

Tabelle 3 Niederschlag in Castrop-Rauxel und Bochum

Monat	Niederschlag												Niederschlag Bochum langj. Mittel [mm]
	Castrop-Rauxel												
	1999 [mm]	2000 [mm]	2001 [mm]	2002 [mm]	2003 [mm]	2004 [mm]	2005 [mm]	2006 [mm]	2007 [mm]	2008 [mm]	2009 [mm]	2010 [mm]	
Januar	78,7	71,8	66,6	78,2	100,9	114,9	75,1	24,4	139,5	80,3	37,45	45,9	66,3
Februar	62,6	117,1	69,8	144,8	17,1	71,7	82,4	64,1	90,3	32,1	55,0	59,4	54,7
März	74,2	103,8	87,6	65,3	52,8	44,4	44,5	83,1	79,2	97,2	90,3	74	56,3
April	57,5	31,7	77,8	69,2	42,4	48,4	85,1	60,6	0,2	60,3	31,95	6,9	54,7
Mai	66,4	84,3	34,8	57,4	60	56,4	76,9	110,7	115,9	51,2	33,7	42,1	63,3
Juni	47,9	59	97,2	56,8	52,3	84,5	48,1	32,1	110,4	45,5	53,1	11,9	78,8
Juli	41,8	142,1	56,7	82,3	115,8	91,3	88,5	70,6	77,3	118,8	146,9	63,7	85,9
August	101,7	90,1	57,7	97,2	32,6	105,1	73,2	93,7	109,4	62,3	28,6	192,8	80,7
September	51,2	75,3	86,5	41,3	60,2	73,5	32,0	23,5	101,9	75,0	35,6	57,0	67,2
Oktober	72,9	65,2	25,5	76,8	97,0	49,8	51,7	50,9	32,5	71,8	134,4	37,8	66,2
November	64,1	38,6	76,5	96,5	54,4	91,4	47,6	86,0	72,9	54,5	125,0		65,0
Dezember	127,7	48,7	82,7	99,8	64,3	47,5	48,8	78,3	66,5	32,55	71,6		69,5
Summe	846,7	927,5	819,4	965,6	749,8	878,9	743,9	778	996	781,55	843,6		808,6

Thermisch fallen die warmen Sommer 2003 und 2010 sowie Juni und Juli des Jahres 2006 auf. Strengere Wintermonate gab es in den Jahren 2001, 2006, sowie 2009 und 2010 (Tabelle 4).

Tabelle 4 Lufttemperatur in Castrop-Rauxel und Bochum

Monat	Lufttemperatur												Lufttemperatur Bochum langj. Mittel
	Castrop-Rauxel												
	1999 [°C]	2000 [°C]	2001 [°C]	2002 [°C]	2003 [°C]	2004 [°C]	2005 [°C]	2006 [°C]	2007 [°C]	2008 [°C]	2009 [°C]	2010 [°C]	
Januar	5,8	2,4	1,1	1,8	1,9	2,6	4,0	0,0	6,7	6,1	-0,1	-1,2	2,5
Februar	3,3	4,2	2,7	4,5	1,8	4,1	1,1	1,1	6,1	5,3	2,8	1,3	3,1
März	8,0	5,3	3,4	4,9	8,0	5,7	6,5	3,2	8,5	5,7	5,9	5,8	6,0
April	10,9	10,2	6,6	7,3	10,3	10,9	10,8	9,8	14,3	9,2	13,5	10,7	9,3
Mai	15,2	15,2	14,1	12,7	14,9	12,9	14,1	15,7	15,8	16,9	15,3	11,7	13,8
Juni	16,9	17,1	14,5	16,6	20,2	16,6	18,4	19,6	18,9	18,8	16,9	19,3	16,5
Juli	21,3	14,5	18,6	17,4	20,3	17,8	19,2	25,0	18,8	19,2	18,9	22,6	18,3
August	18,0	16,8	17,9	19,5	20,8	19,9	16,4	16,8	17,7	18,5	19,1	17,4	17,9
September	17,6	14,1	10,8	14,2	14,4	15,1	15,9	18,7	13,8	13,5	15,0	13,7	14,9
Oktober	9,3	9,7	12,2	9,6	7,0	11,3	12,9	14,3	10,0	10,1	9,6	10,1	10,8
November	4,6	6,3	3,6	8,1	8,4	5,2	5,8	9,2	6,3	6,3	9,6		6,2
Dezember	3,0	3,2	-0,1	2,8	3,7	2,0	2,9	6,7	3,7	2,1	1,8		3,5

4.1.2 Wasserspannungen

Im Beobachtungszeitraum 03.09.1999 – 28.10.2010 war eine fast lückenlose stündliche Erfassung der Messdaten möglich. Die Änderungen der Wasserspannungen über die Tiefe des Bodens werden für den Zeitraum September 1999 bis Oktober 2010 in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. Die Darstellung der Wasserspannungen erfolgt in Isolethen-Diagrammen. In diesen Diagrammen sind auf der x-Achse die Zeit und auf der y-Achse die Messtiefen abgebildet. Mit Hilfe der Farbskala kann dann für einen bestimmten Zeitpunkt und eine bestimmte Messtiefe der Wasserspannungsbereich abgelesen werden.

Die Wasserspannungen zeigen auf den Stationen 2a und 2b einen ähnlichen Verlauf. Auf beiden Stationen wird ein jahrestypischer Verlauf der Wasserspannungen wiedergespiegelt. In den Winterhalbjahren liegen die Wasserspannungen in allen Messtiefen der Rekultivierungsschicht im Bereich der Wassersättigung. Der Beginn der Vegetationsperiode wird in jedem Jahr durch eine über die Tiefe zeitlich versetzte Abtrocknung des Bodens gekennzeichnet.

Der unterschiedliche Aufbau des Abdichtungssystems auf den Stationen 2a (mit Granulatschicht) und 2b (ohne Granulatschicht) zeigt sich in den Messtiefen unterhalb 120 cm. Auf Station 2a dient die zwischen Rekultivierungsboden und den kontrolliert verdichteten Schichten eingebaute Flächendrainage als Barriere für den aufwärtsgerichteten Wasserfluss aus der kontrolliert verdichteten Schicht. Somit kam es auf Station 2a in den Tiefen 150-210 cm zu keinen nennenswerten Wasserspannungsänderungen. Die Messwerte liegen in der kontrolliert verdichteten Schicht meist etwas oberhalb des Sättigungspunkts (Abbildung 13). Die im gesamten Versuchszeitraum in der kontrolliert verdichteten Schicht der Station 2a gemessenen maximalen Wasserspannungen betragen in 150 cm Tiefe 8,25 kPa (November

2006) sowie 9,4 kPa in 180 cm Tiefe (November 2006). Die stärkste Abtrocknung in 120 cm Tiefe - im Übergang zwischen dem Rekultivierungsboden und der Granulatschicht - ist Anfang August 2010 mit 68 kPa gemessen worden. Auf Station 2a kann trotz der geringen Niederschläge im Sommerhalbjahr 2010 eine Abtrocknung nur in der Rekultivierungsschicht oberhalb der Drainage beobachtet werden.

Aus der fehlenden Granulatschicht auf Station 2b resultiert dagegen auch in den unteren Messtiefen eine Zunahme der Wasserspannung in den Sommermonaten 2001 und 2003: In 150 cm Tiefe wurden im Oktober 2003 maximale Wasserspannungen von 28 kPa, in 210 cm Tiefe 12 kPa gemessen. Die in der kontrolliert verdichteten Schicht gemessenen maximalen Wasserspannungen waren in den Sommermonaten 2001 und 2003 nahezu identisch; im Herbst 2006 stieg in 150 cm Tiefe die Wasserspannung auf 10,6 kPa und in 180 cm auf 8,0 kPa. Dagegen bewirkten die starken Augustniederschläge des Jahres 2010, dass sich die Abtrocknung in größeren Tiefen innerhalb der Dichtschicht nicht noch verstärkte. Es konnte nämlich in allen Messtiefen ein Anstieg der Tensiometerwerte, in 210 cm Tiefe Mitte August auf über 7 kPa beobachtet werden.

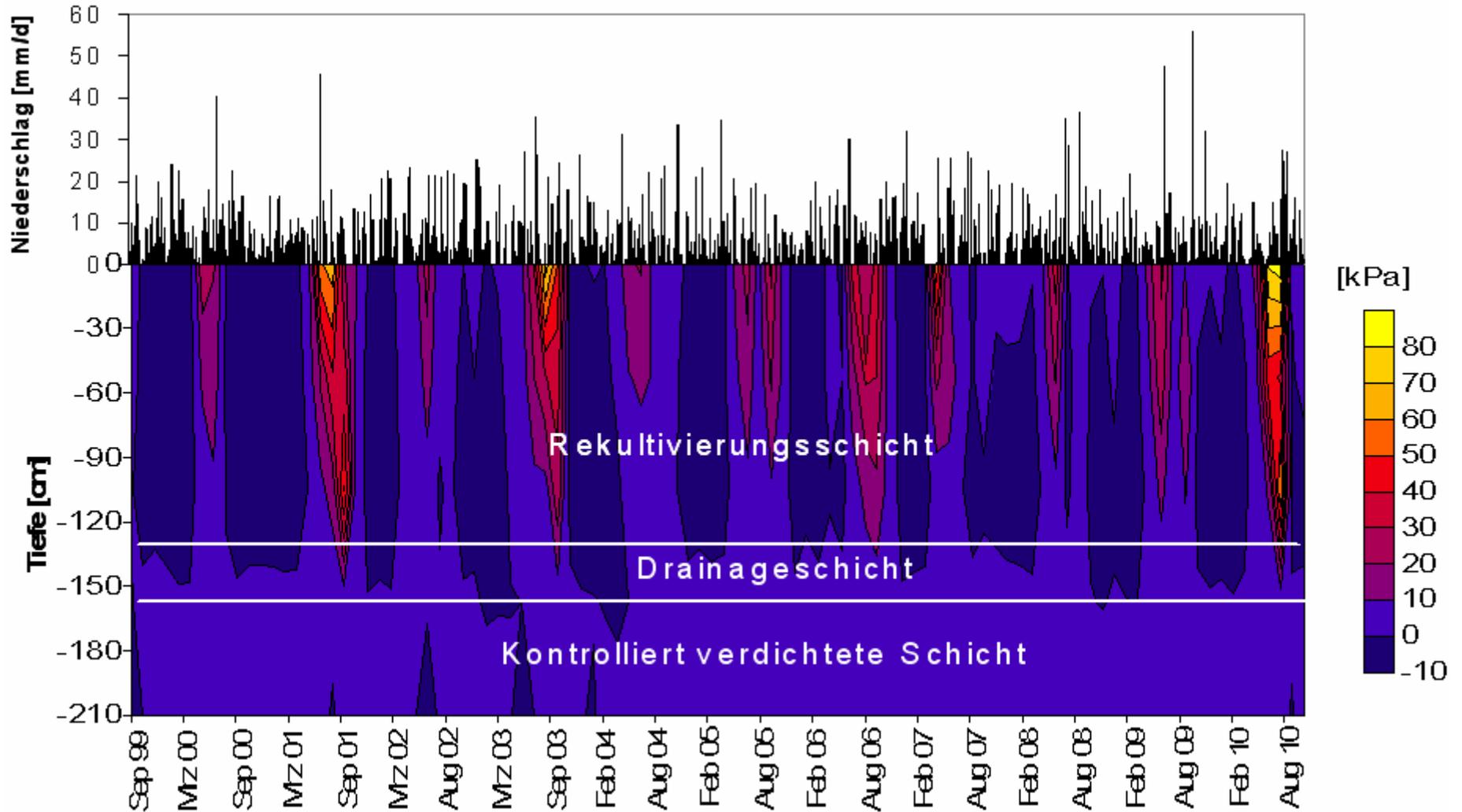


Abbildung 13 Wasserspannung über die Tiefe und Tagesniederschlag auf Station 2a
im Zeitraum 04.09.1999 – 28.10.2010

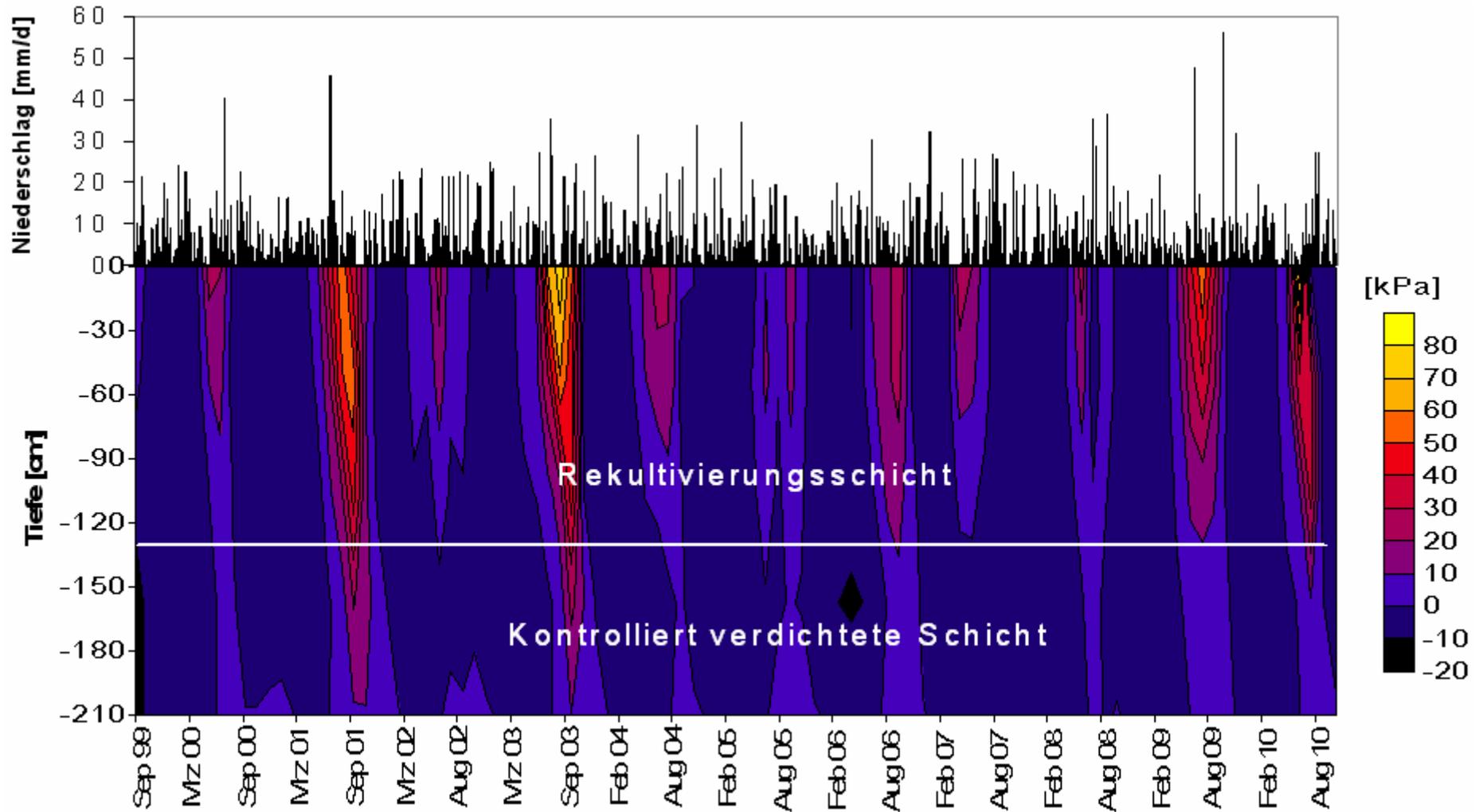


Abbildung 14 Wasserspannung über die Tiefe und Tagesniederschlag auf Station 2b
im Zeitraum 04.09.1999– 28.10.2010

4.1.3 Wassergehalte

Stationen 2a und 2b

Die bis in 170 cm Tiefe einmal wöchentlich mittels TDR-Handsonde gemessenen Wassergehalte zeigen auf den Stationen 2a und 2b ein differenziertes Bild der Wassergehaltsänderungen über die Zeit (Abbildung 15 und Abbildung 16). Die Messungen sind anschließend nicht weitergeführt worden, weil der Aufwand (Personaleinsatz) zur Fortsetzung der wöchentlichen Messungen in keinem vertretbaren Verhältnis zum erwarteten zusätzlichen Erkenntnisgewinn gestanden hätte. Dargestellt sind in den Abbildungen die Mittelwerte der Feldwiederholungen für den Zeitraum September 1999 bis Oktober 2003. Auf beiden Stationen wird ein jahrestypischer Verlauf der Wassergehalte widergespiegelt. In hydrologischen Sommerhalbjahren werden im Rekultivierungsboden Wassergehalte bis unter 15 Vol.-% und im Winter über 40 Vol.-% gemessen. Der unterschiedliche Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems auf den Stationen 2a (mit Granulatschicht) und 2b (ohne Granulatschicht) zeigt sich auch bei der Darstellung der Wassergehalte.

Deutlich ist in Abbildung 15 die Lage der Granulatschicht in 130 bis 150 cm Tiefe zu sehen. Gekennzeichnet ist diese Schicht durch Wassergehalte unter 15 Vol.-%. Auf Station 2a liegen zu Beginn dieses Winterhalbjahres 2001/02 die Wassergehalte im Rekultivierungsboden um 22 bis 25 Vol.-%. Zwischen Mitte November und Ende März ist der Rekultivierungsboden unterhalb 30 cm Tiefe nahezu wassergesättigt, so dass Niederschläge kaum Wassergehaltsänderungen hervorrufen. Anfang April nehmen die Wassergehalte bedingt durch 22 niederschlagsfreie Tage wieder auf 26 bis 31 Vol.-% ab. In der kontrolliert verdichteten Schicht sind für den Zeitraum November 2001 bis April 2002 nur geringe Wassergehaltsänderungen gemessen worden. Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2002 wurden in der Rekultivierungsschicht auf den Stationen 2a und 2b minimale Wassergehalte bei ca. 20 Vol.-% ermittelt. Im Sommer 2002 konnte mittels TDR eine geringere Abtrocknung des Rekultivierungsbodens gemessen werden als in den vorangegangenen hydrologischen Sommerhalbjahren. Zwischen Dezember 2001 und April 2003 wurden auch auf Station 2b in der kontrolliert verdichteten Schicht nur sehr geringe Wassergehaltsänderungen gemessen.

Zwischen Mitte Dezember 2002 und Mitte März 2003 ist der Rekultivierungsboden unterhalb 30 cm Tiefe nahezu wassergesättigt, so dass Niederschläge kaum Wassergehaltsänderungen hervorrufen. Von Mitte März bis Ende April 2003 nehmen die Wassergehalte in der Rekultivierungsschicht um durchschnittlich 6,9 Vol.-% ab. In der kontrolliert verdichteten Schicht sind für den Zeitraum November 2002 bis April 2003 nur geringe Wassergehaltsänderungen gemessen worden. Insgesamt deutet sich zwischen September 1999 und April 2003 eine langfristige Tendenz zur Wassergehaltszunahme in der kontrolliert verdichteten Schicht an. Im Sommer 2003 wurden in 10 cm Tiefe die geringsten Wassergehalte des Versuchszeitraums aufgezeichnet. Unterhalb von 10 cm Tiefe wurde jedoch im Sommer 2001 eine stärkere Abtrocknung des Rekultivierungsbodens gemessen, nämlich minimale Wassergehalte unter 25 Vol.-%. Im Sommer 2003 lagen die Wassergehalte unterhalb von 80 cm Tiefe über 25 Vol.-%.

Für Station 2b (Abbildung 16) gelten prinzipiell dieselben Aussagen wie für Station 2a. Die Wassergehalte in den oberen 30 cm der Rekultivierungsschicht liegen auf Station 2b in den hydrologischen Winterhalbjahren jedoch um bis zu 15 Vol.-% über denen auf Station 2a. In abgeschwächter Form gilt ähnliches für die Tiefen 40 bis 80 cm. Auf Station 2b wurden im Sommer 2003 bis in 40 cm Tiefe die geringsten Wassergehalte des gesamten Versuchszeitraums ermittelt. Unterhalb von 40 cm Tiefe wurde jedoch im Sommer 2001 eine stärkere Abtrocknung der Rekultivierungsschicht mittels TDR gemessen. Auch die kontrolliert verdichtete Schicht war im Sommer 2001 stärker in die Abtrocknung mit einbezogen.

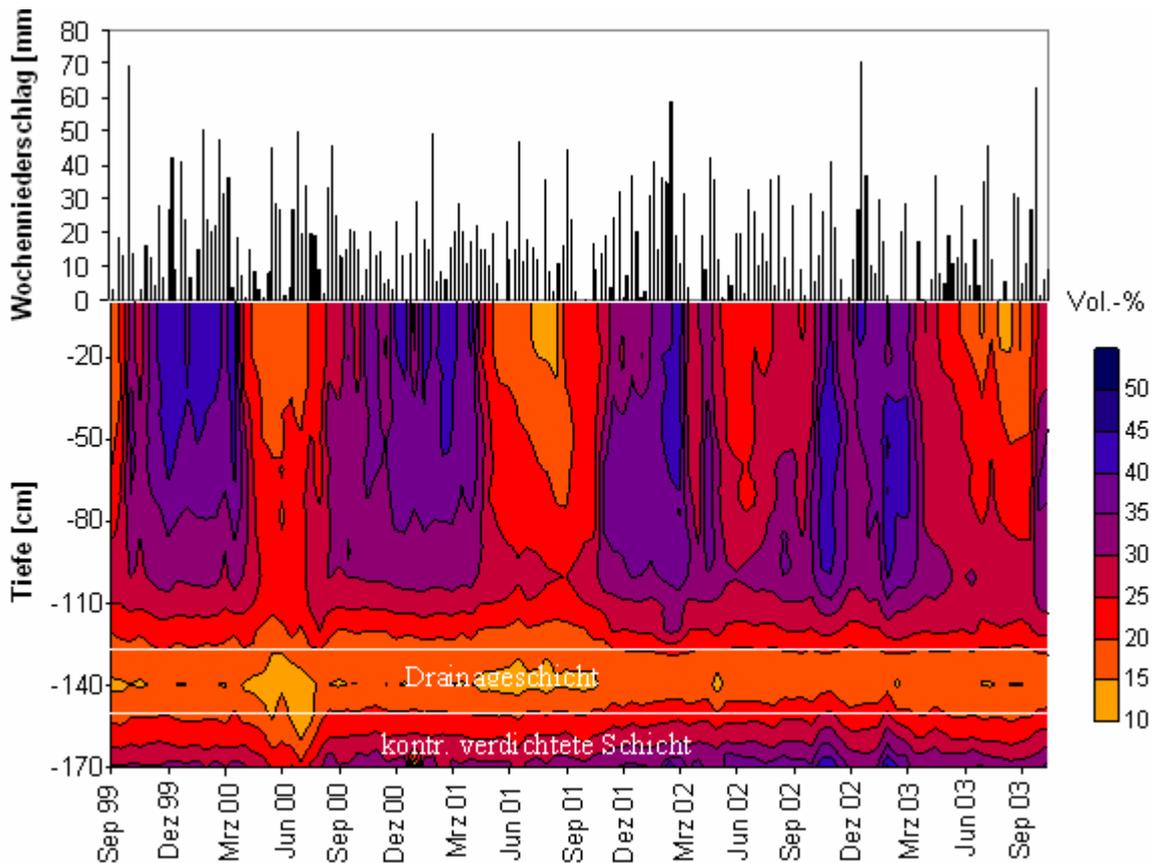


Abbildung 15 Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2a

Zeitraum September 1999 bis Oktober 2003
(Wochenmittelwerte der TDR-Handsondenmessungen)

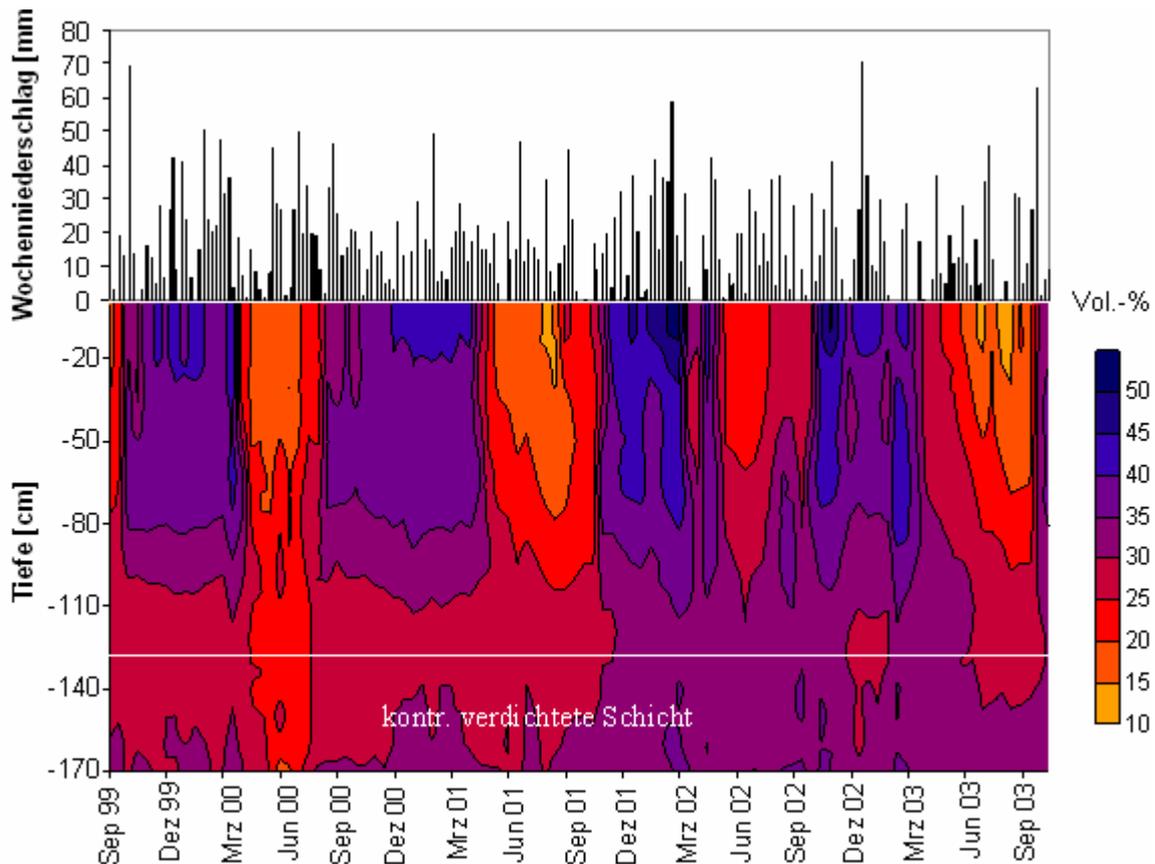


Abbildung 16 Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2b
für den Zeitraum September 1999 bis Oktober 2003
(Wochenmittelwerte der TDR-Handsondenmessungen)

Stationen 2ax und 2bx

Zwischen Oktober 2002 und Oktober 2003 wurden auf den Stationen 2ax und 2bx die Wassergehalte bis in 70 cm Tiefe gemessen. Zu Beginn dieser Messreihe (02.10.02) liegen die Wassergehalte auf der Station 2ax zwischen 26 und 29 Vol.-% (siehe Abbildung 17). Von Oktober 2002 bis Oktober 2003 wurden auf Station 2ax ein minimaler Wassergehalt von 16,5 Vol.-% und ein maximaler Wassergehalt von 37 Vol.-% gemessen. Bis in 50 cm Tiefe wird eine Abtrocknung des Bodens auf unter 20 Vol.-% ermittelt.

Auf Station 2bx (Abbildung 18) wurden im gesamten Messzeitraum um durchschnittlich 3,2 Vol.-% höhere Wassergehalte gemessen als auf Station 2ax. Von Oktober 2002 bis Oktober 2003 wurde auf Station 2bx ein minimaler Wassergehalt von 16,9 Vol.-% und ein maximaler Wassergehalt von 41 Vol.-% gemessen.

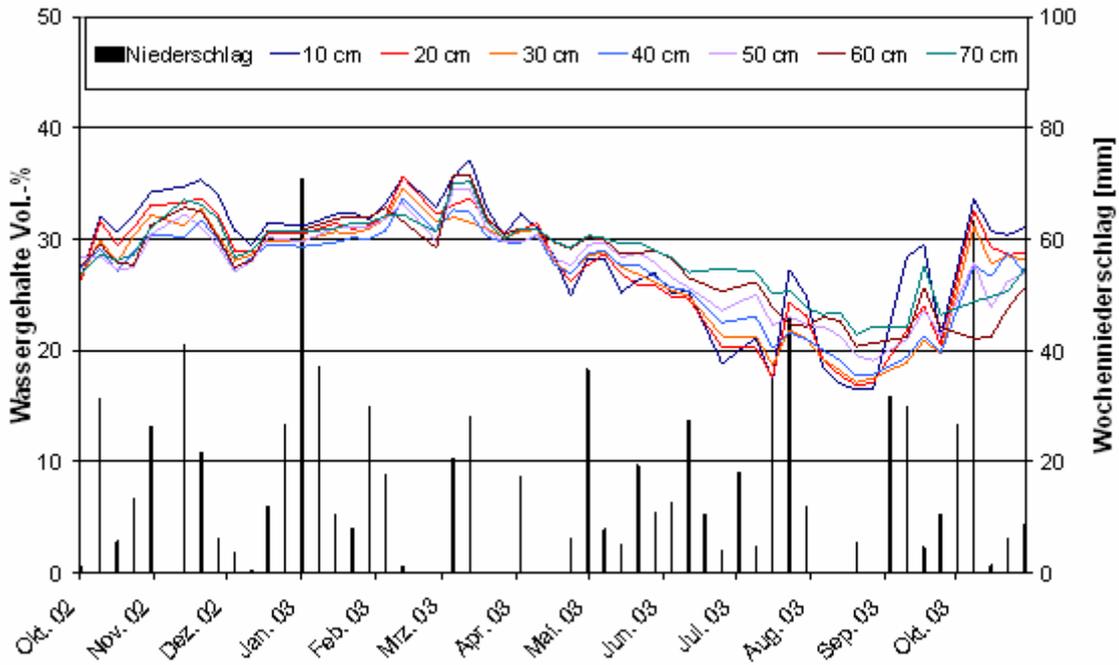


Abbildung 17 Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2ax

Zeitraum Oktober 2002 bis Oktober 2003
(Wochenmittelwerte der TDR-Handsondenmessungen)

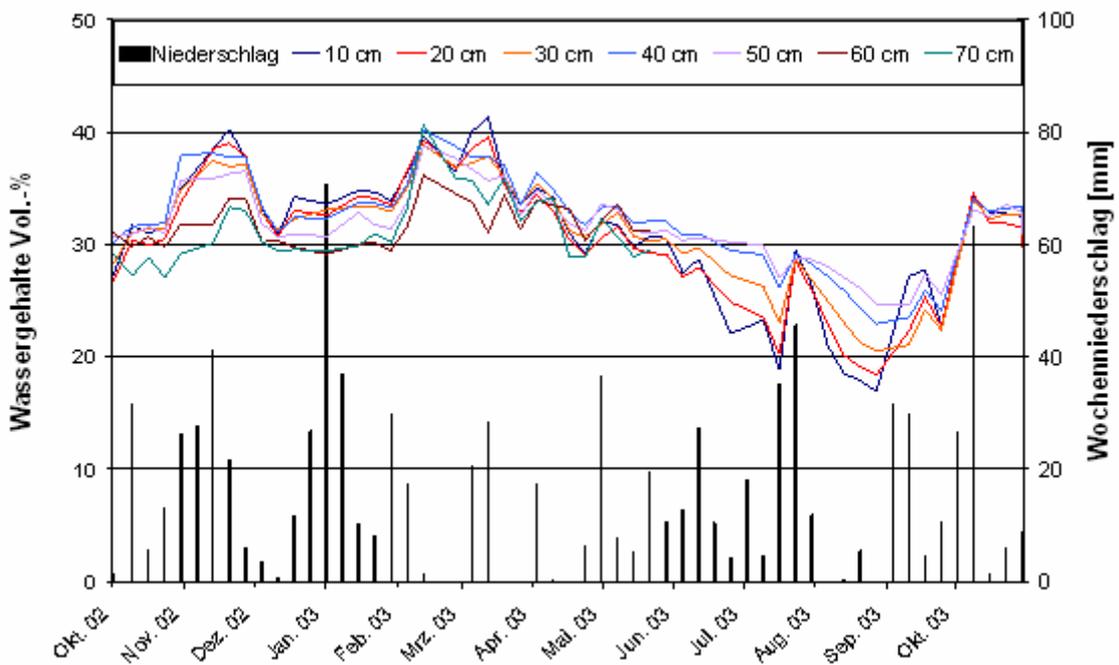


Abbildung 18 Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2bx

Zeitraum Oktober 2002 bis Oktober 2003
(Wochenmittelwerte der TDR-Handsondenmessungen)

Die zu Beginn (02.10.2002) dieser Untersuchung auf den Stationen 2ax und 2bx gemessenen Wassergehalte entsprechen den auf Station 2a und 2b gemessenen. Im Verlauf des Oktobers wurde jedoch auf den Stationen 2a und 2b ein größerer Anstieg der Wassergehalte in 10 bis 70 cm Tiefe beobachtet als auf den Stationen 2ax und 2bx. Bis Mitte März werden in der Rekultivierungsschicht auf den Stationen 2a und 2b höhere Wassergehalte gemessen als auf den Station 2ax und 2bx. Dies ist vermutlich auf die Existenz der zusätzlichen vertikalen Drainage (mit Granulat verfüllte Gräben) auf den Station 2ax und 2bx zurückzuführen (siehe Abbildung 7), die zur Fassung des lateralen Abflusses an den beiden tiefsten Begrenzungen der Flächen eingebaut werden mussten. Die zeitliche Dynamik der Wassergehalte zeigen auf den Station 2a/2b und den Stationen 2ax/2bx jedoch das gleiche Muster. Sowohl die Messungen auf den Stationen 2a/2b als auch auf 2ax/2bx zeigen, dass in der Rekultivierungsschicht der Flächen ohne Granulatschicht (2b/2bx) mehr Wasser zwischengespeichert wird als auf den Stationen 2a und 2ax (mit Granulatschicht).

4.1.4 Abfluss

Die im Beobachtungszeitraum 09/99-10/2010 auf den Stationen 2a und 2b aus den 4-teiligen Betonwannen registrierten Abflüsse waren gering. Der Gesamtabfluss auf Station 2a betrug 22,6 mm, auf Station 2b wurde ein Gesamtabfluss von 7,4 mm gemessen (Abbildung 19, Tabelle 5). Auf Station 2a sind 0,24 % des Gesamtniederschlages im Beobachtungszeitraum durch die kontrolliert verdichtete Schicht abgeführt worden; auf Station 2b waren es 0,08 % des Gesamtniederschlages.

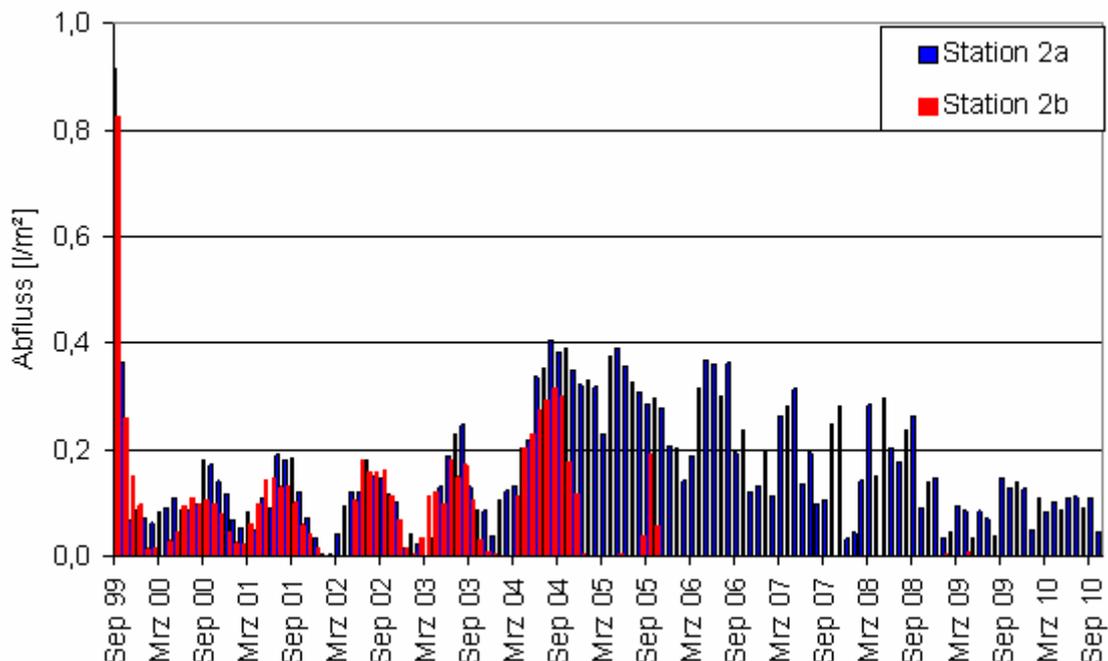


Abbildung 19 Monatliche Abflusssummen aus den Betonwannen der Stationen 2a und 2b

Zeitraum 03.09.1999 – 28.10.2010

(mm = l/m²)

Fast der gesamte nicht verdunstete Niederschlagsüberschuss (Klimatische Wasserbilanz) wird oberhalb der kontrolliert verdichteten Schicht lateral abgeführt.

Tabelle 5 Abfluss an den Stationen 2a und 2b
in mm sowie in % des Niederschlags

Zeitraum	Betonwannenabfluss				Abfluss Oberflächendrainage		Niederschlag [mm]
	Station 2a		Station 2b		Station 2a		
	[l/m ²]	[%]	[l/m ²]	[%]	[l/m ²]	[%]	
04.09.-31.10.1999	1,28	1,03	1,09	0,87	0,24	0,19	124,1
01.11.1999-30.04.2000	0,46	0,09	0,31	0,06	6,38	1,24	516,0
01.05.-31.10.2000	0,73	0,14	0,55	0,11	4,77	0,92	516,0
01.11.2000-30.04.2001	0,51	0,13	0,33	0,09	50,87	13,07	389,1
01.05.-31.10.2001	0,88	0,24	0,71	0,20	2,33	0,65	358,4
01.11.2001-30.04.2002	0,25	0,05	0,06	0,01	199,84	38,67	516,7
01.05.-31.10.2002	0,84	0,20	0,87	0,21	22,41	5,44	411,8
01.11.2002-30.04.2003	0,21	0,05	0,36	0,09	207,02	50,55	409,5
01.05.-31.10.2003	1,01	0,24	0,74	0,18	4,96	1,19	417,9
01.11.2003-30.04.2004	0,69	0,17	0,33	0,08	157,79	39,63	398,1
01.05.-31.10.2004	2,09	0,45	1,59	0,34	3,24	0,70	460,6
01.11.2004-30.04.2005	1,92	0,45	0,12	0,03	88,06	20,67	426,0
01.05.-31.10.2005	1,97	0,54	0,29	0,08	0,00	0,00	365,4
01.11.2005-30.04.2006	1,33	0,41	0,00	0,00	55,23	17,07	323,6
01.05.-31.10.2006	1,82	0,48	0,00	0,00	6,77	1,77	381,5
01.11.2006-30.04.2007	1,11	0,23	0,00	0,00	141,66	29,92	473,5
01.05.-31.10.2007	1,10	0,20	0,00	0,00	36,47	6,66	547,4
01.11.2007-30.04.2008	0,94	0,23	0,00	0,00	66,86	16,34	409,3
01.05.-31.10.2008	1,27	0,30	0,00	0,00	0,19	0,04	424,6
01.11.2008-30.04.2009	0,55	0,18	0,01	0,00	12,08	4,00	301,8
01.05.-31.10.2009	0,50	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	432,3
01.11.2009-30.04.2010	0,61	0,16	0,01	0,00	146,37	38,24	382,8
01.05.-31.10.2010	0,55	0,14	0,00	0,00	19,21	4,74	405,3
Summe	22,62	0,24	7,37	0,08	1232,75	13,13	9391,7

Station 2a

Der Abfluss aus der Betonwanne auf Station 2a lässt sich im Gesamtbeobachtungszeitraum in vier Phasen einteilen (Abbildung 19). Die erste Phase reichte von September bis Dezember 1999. In dieser „Kompressionsphase“ war der im Vergleich zur Folgezeit relativ höhere Abfluss auf die einbaubedingte Kompression der Dichtungsschicht durch die aufliegende Rekultivierungsschicht zurückzuführen. Das überschüssige Wasser wurde aus der kontrolliert verdichteten Schicht nach unten gedrückt [21]. Die zweite Abflussphase begann im Januar 2000 und endete mit dem Jahr 2003. Sie war gekennzeichnet durch einen periodischen Verlauf der Betonwannen-Abflüsse mit einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Winter. In der anschließenden dritten Phase kam es zu

einer Erhöhung der Abflüsse gegenüber der zweiten Phase und der periodische Verlauf des Betonwannenabflusses war weniger stark ausgeprägt als in der vorherigen Phase. Die monatlichen Abflusssummen bewegten sich zwischen April 2004 und Oktober 2006 zwischen 0,142 und 0,406 mm. In der ab November 2006 beginnenden vierten Phase nehmen die monatlichen Betonwannenabflüsse kontinuierlich ab, bis sie in den letzten beiden Jahren quasi-konstant bei 0,5-0,6 mm pro Halbjahr verharren.

Über die Kippzähler der Oberflächendrainage der Station 2a wurden im Beobachtungszeitraum September 1999 bis Oktober 2010 insgesamt 1.232,7 mm Bodenwasser abgeführt – dies entspricht 13,1 % des Gesamtniederschlags (9.391,7 mm) im Beobachtungszeitraum. Der Abfluss aus der Oberflächendrainage macht nur einen Teil des gesamten lateralen Abflusses oberhalb der kontrolliert verdichteten Schicht (siehe Abschnitt Station 2x) aus; zusätzliches Wasser verlässt in seitlicher Richtung den Boden oberhalb der Granulatschicht. Der auf Station 2a gemessene Drainageabfluss lässt sich in 23 Phasen einteilen (Abbildung 20).

1. Anlaufphase: Von September 1999 bis Mai 2000 wurden sehr geringe Drainabflüsse gemessen. Nur 1 % des Niederschlages sind über die Drainage gefasst worden. Für das Winterhalbjahr ist dies – sowohl absolut als auch im Vergleich zu den Folgejahren – ein sehr geringer Wert. Das Drainverhalten kann noch mit dem Einbau der Drainage zusammenhängen („das System muss sich noch einspielen“) und benötigte einen zeitlichen Vorlauf. Im geschütteten Substrat sind bodenstrukturbildende Prozesse abgelaufen, die ein wasserwegsameres Porensystem geschaffen haben. Derartige Prozesse sind auch aus dem landwirtschaftlichen Wasserbau bekannt.

2. erste Trockenphase: Aufgrund des wasserungesättigten Oberbodens fand in den Sommermonaten 2000 (Mai – Anfang September) erwartungsgemäß kein Abfluss über die Drainage statt.

3. erste Drainphase (mit sehr schwacher Schüttung): Im Zeitraum September – Dezember 2000 wurden über die Drainage ca. 4 % des Niederschlages dieses Zeitraumes abgeführt.

4. zweite Drainphase (mit schwacher Schüttung): Ab Januar 2001 kam es zu einem Anstieg des Drainabflusses. Die Abstände der Schüttintervalle wurden kürzer. Von Januar bis April 2001 wurden ca. 15 % des Niederschlages in diesem Zeitraum über die Oberflächendrainage abgeführt. Im Januar und Februar 2001 sind 20 % des Niederschlages in der Drainage gefasst worden.

5. zweite Trockenphase: Sie umfasst das Hydrologische Sommerhalbjahr 2001 und den Beginn des folgenden Winterhalbjahres (Mai bis November 2001).

6. dritte Drainphase (mit starker Schüttung): Sie umfasst den Zeitraum von Ende November 2001 bis Ende Mai 2002. Der Drainabfluss hatte sich gegenüber den vorausgegangenen Winterhalbjahren deutlich erhöht. Im hydrologischen Winterhalbjahr 2001/2002 wurden 38,7 % des Niederschlages über die Drainage abgeführt. Im niederschlagsreichen Januar und Februar 2002 sind 56 % des Niederschlages in der Drainage aufgefangen worden.

7. dritte Trockenphase: Sie begann Ende Mai, nachdem im Mai noch 38,1 % des Niederschlages über die Drainage abgeführt worden waren und endete Ende Oktober.

8. vierte Drainphase (mit starker Schüttung): Der Drainageabfluss erhöhte sich gegenüber dem vorangegangenen Winterhalbjahr 01/02 nochmals. Der maximale Tagesabfluss betrug im hydrologischen Winterhalbjahr 02/03 23,05 mm. Im Januar und Februar wurden insgesamt 87 % des Niederschlages über die Drainage gefasst, im April kein Drainageabfluss mehr aufgezeichnet.

9. vierte Trockenphase: Sie beginnt – bedingt durch die trockene Witterung im Februar und März 2003 – schon im März und endet nach starken Niederschlägen Anfang Oktober 2003.

10. fünfte Drainphase (mit starker Schüttung): Sie setzt Anfang Oktober ein, und der Abfluss kommt aufgrund der trockenen Witterung im Frühjahr 2004 (Ende März) kurzfristig zum Erliegen. Im hydrologischen Winterhalbjahr 03/04 (November bis April) wurden ca. 40 % des Niederschlages über die Drainage abgeführt. Der maximale Monatssummenabfluss des gesamten Versuchszeitraumes wurde im Januar 2004 mit 96,3 l/m² gefasst.

11. fünfte Trockenphase: Nach geringen Abflüssen von 3,24 mm Anfang Mai werden bis Oktober 2004 keine Abflüsse über die Drainage der Station 2a gemessen.

12. sechste Drainphase: Gegenüber den drei vorangegangenen Winterhalbjahren wurde im hydrologischen Winter ein geringerer Abfluss über die Drainage der Station 2a gefasst. Nur 20,7 % des Niederschlages – gegenüber den Vorjahren um mindestens 18 % weniger – konnte über die Kippzähler der Drainagen als Abfluss registriert werden.

13. sechste Trockenphase: Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005 ist erstmals im Versuchszeitraum über einen Zeitraum von sechs Monaten kein Abfluss über die Drainage gefasst worden. Aufgrund der warmen Witterung im Mai ist trotz der relativ hohen Niederschläge dieses Monats kein Niederschlag mehr zum Abfluss gekommen. Die in den folgenden Sommermonaten vorherrschende warme und trockene Witterung bis in den Herbst hatte zur Folge, dass bis zum Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres keine Drainageabflüsse mehr aufgetreten sind. Hierin spiegelt sich die Feststellung, dass das Sommerhalbjahr 2005 das zweittrockenste der langjährigen Reihe war (Kap. 2.1).

14. siebte Drainphase: Gegenüber den Winterhalbjahren 01/02 bis 03/04 wurde im hydrologischen Winter 05/06 ein geringerer Abfluss über die Drainage der Station 2a gefasst. Der Drainageabfluss im Winterhalbjahr 05/06 ist mit 55,23 mm nur gering höher als im Winterhalbjahr 00/01. Nur 17,1 % des Niederschlages wurden über die Kippzähler der Drainagen als Abfluss registriert. Dies ist vor Allem durch die sehr kalte und trockene Witterung bedingt.

15. siebte Trockenphase: Nach geringen Abflüssen von 6,77 mm Ende Mai werden bis Oktober 2006 keine Abflüsse über die Drainage der Station 2a gemessen.

16. achte Drainphase: Gegenüber den Winterhalbjahren 04/05 und 05/06 wurde im hydrologischen Winter 06/07 ein erhöhter Abfluss über die Drainage der Station 2a gefasst. Der Drainageabfluss im Winterhalbjahr 06/07 ist mit 141,66 mm fast dreimal so groß wie im Winterhalbjahr 05/06. Fast 30 % des Niederschlages konnte über die Kippzähler der Drainagen als Abfluss registriert werden. Dies ist vor Allem durch die relativ feuchte Witterung bedingt.

17. achte Trockenphase: Nachdem die Abflüsse im Mai und Juni zum Erliegen gekommen sind, werden ab Ende Juli Drainageabflüsse aufgezeichnet. Bedingt durch die feuchte Witterung werden im Sommerhalbjahr 2007 die höchsten Drainageabflüsse eines Sommerhalbjahres aufgezeichnet.

18. neunte Drainphase: Gegenüber den Winterhalbjahren 01/02 bis 03/04 und 06/07 wurde im hydrologischen Winter 07/08 ein geringerer Abfluss über die Drainage der Station 2a gefasst. Der Drainageabfluss im Winterhalbjahr 07/08 ist mit 66,9 mm nur geringfügig höher als im Winterhalbjahr 00/01 und 05/06. Nur 16,3 % des Niederschlages wurden über die Kippzähler der Drainagen als Abfluss registriert.

19. neunte Trockenphase: Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2008 werden nur sehr geringe Drainageabflüsse (0,19 mm) gemessen.

20. zehnte Drainphase: Im hydrologischen Winterhalbjahr 2008/2009 treten nur geringe Drainageabflüsse auf (12,1 mm).

21. zehnte Trockenphase: Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2009 treten gar keine Drainageabflüsse auf.

22. elfte Drainphase: Gegenüber den Winterhalbjahren 07/08 und 08/09 wurde im hydrologischen Winter 09/10 ein erhöhter Abfluss über die Drainage der Station 2a gefasst. Der Drainageabfluss im Winterhalbjahr 09/10 ist mit 146,37 mm in etwa so groß wie im Winterhalbjahr 06/07. Fast 40 % des Niederschlages konnte über die Kippzähler der Drainagen als Abfluss registriert werden. Dies ist vor Allem durch die feuchte Witterung Ende 2009 bedingt.

23. zwölfte Trockenphase: Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2010 treten gegenüber den Vorjahren im Sommer erhöhte Drainageabflüsse in Höhe von 19,2 mm auf. Eine Ursache sind die hohen Augustniederschläge (192,8 mm).

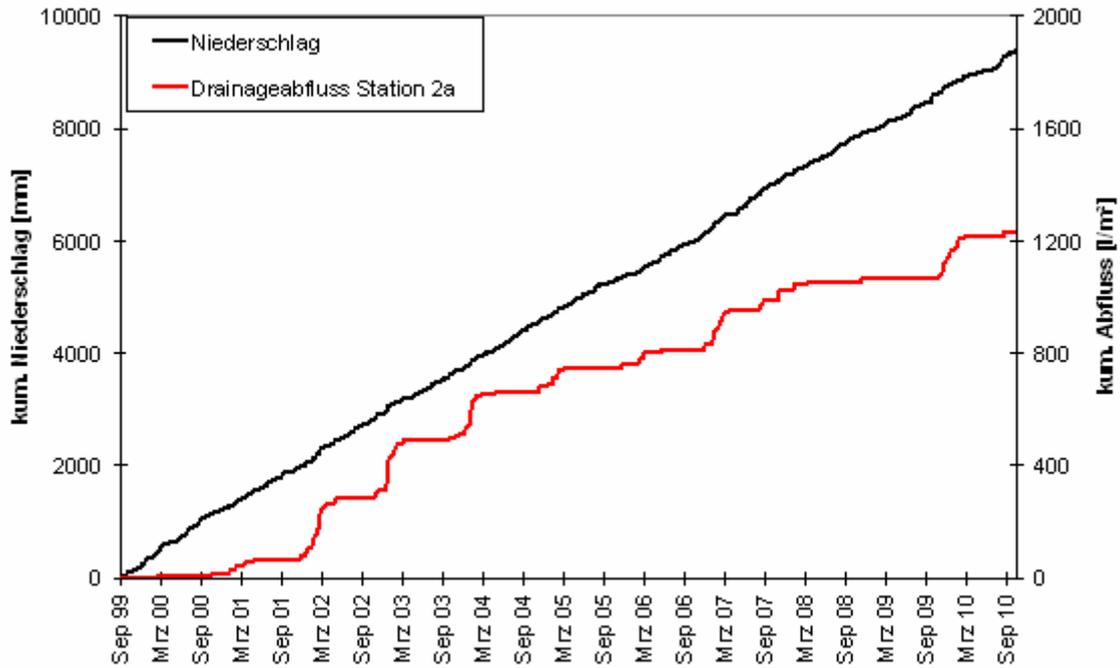


Abbildung 20 kumulierter Niederschlag und Abfluss aus der Oberflächendrainage der Station 2a
Zeitraum 04.09.1999 – 28.10.2010

Station 2b

Der Betonwannenabfluss lässt sich sieben Phasen einteilen (Abbildung 19). Es handelt sich in der ersten Phase um die „Kompressionsphase“. In der zweiten Phase ist der Verlauf der Betonwannenabflüsse periodisch. Damit ergibt sich auch hier insgesamt ein jahreszeitlicher Verlauf mit einem Abflussmaximum im Herbst und Abflussminimum im Winter (Januar/Februar). In der dritten Phase kommt es zu einer geringen Erhöhung der Abflüsse gegenüber der zweiten Phase. Der periodische Verlauf des Betonwannenabflusses ist – anders als auf Station 2a – ähnlich wie der der zweiten Phase. Im Dezember 2004 zum Beginn der vierten Phase kommen die Abflüsse fast zum Erliegen. In der vierten Phase, die bis Juli 2005 andauert, werden an nur drei Tagen Abflüsse aus der Betonwanne aufgezeichnet. In der folgenden fünften Phase entspricht die Höhe der Abflüsse aus der Betonwanne der zweiten Phase. In der sechsten Phase – ab Oktober 2005 – kommen die Abflüsse wieder fast vollständig zum Erliegen. Von Januar 2006 bis Dezember 2008 werden keine Abflüsse aus der Betonwanne 2b aufgezeichnet. Seit dem 15. Dezember 2008 werden wieder vereinzelte, geringe Abflüsse aus der Betonwanne der Station 2b aufgezeichnet.

Station 2x

Die im Beobachtungszeitraum 11/2001 – 10/2010 registrierten lateralen Abflüsse betragen auf der Station 2ax 2.653,5 mm und auf Station 2bx insgesamt 2.674,1 mm (Abbildung 21).

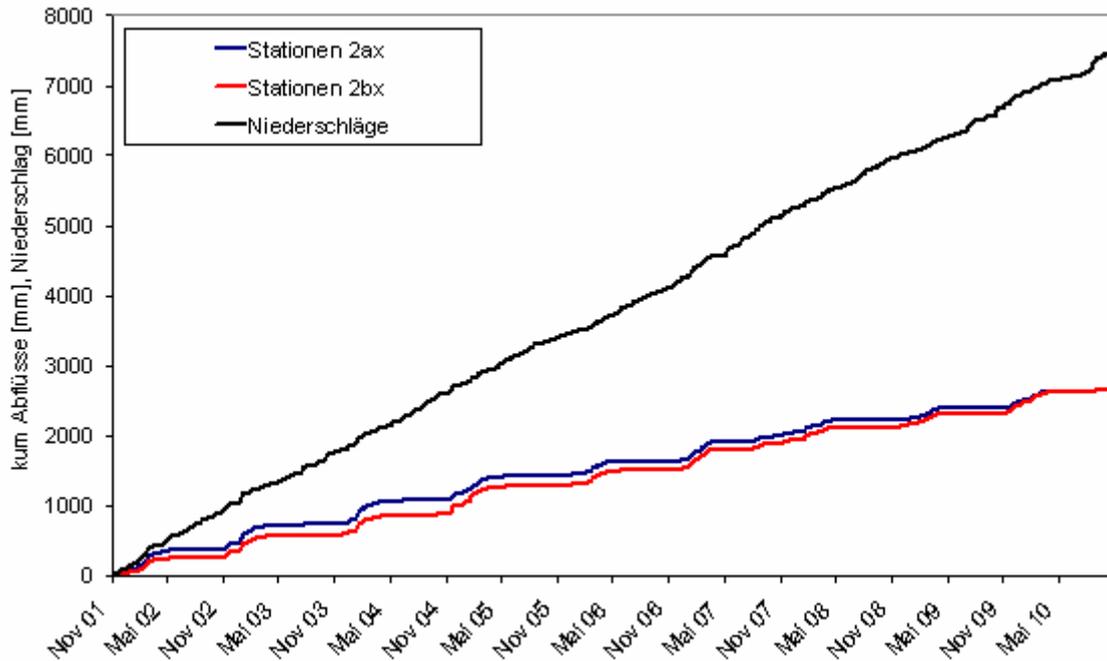


Abbildung 21 kumulierter lateraler Abfluss auf den Stationen 2ax und 2bx und kumulierter Niederschlag im Zeitraum 01.11.2001 – 28.10.2010

In Abbildung 22 ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Dynamik des lateralen Abflusses der Stationen 2ax und 2bx sehr ähnlich ist. Sie entspricht dem Witterungsverlauf; die Abflussspitzen korrespondieren mit den Zeiten maximaler Durchsickerung durch die Reaktivierungsschicht in den hydrologischen Winterhalbjahren.

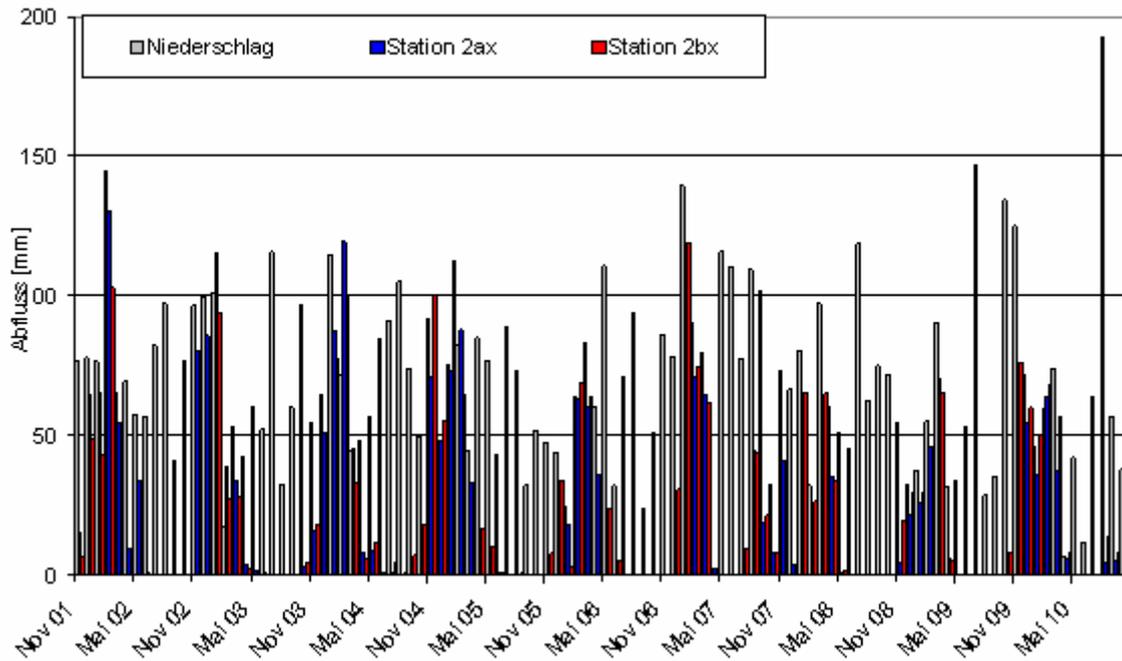


Abbildung 22 Monatliche laterale Abflusssummen auf den Stationen 2ax und 2bx und monatlicher Niederschlag
Zeitraum 01.11.2001 – 28.10.2010

Auf beiden Teilflächen kommen abflusslose Monate in den Sommerhalbjahren vor. Daneben fallen die Monate auf, in denen mehr Abfluss als Niederschlag gefasst worden ist. Der über den Niederschlag hinaus gehende Abfluss ist mit einer teilweisen Entleerung des Bodenwasserspeichers verbunden (zu weiteren Ursachen siehe Kapitel 5).

Etwa ab der Hälfte des Messzeitraums übertrifft der laterale Abfluss auf der Station 2b denjenigen auf der Vergleichsstation (Abbildung 23 und Abbildung 24). Generell setzen auf der Station 2b die Abflüsse mit geringerer Verzögerung auf einen Niederschlagsimpuls ein als auf der Station 2a mit der Granulatschicht. Auch die zugehörigen Spitzenabflüsse auf der Station 2b übertreffen diejenigen der Station 2a. Andererseits nimmt der Abfluss auf Station 2b schneller ab als auf der Vergleichsstation, so dass insgesamt die Summen der lateralen Abflüsse dieselbe Größenordnung annehmen.

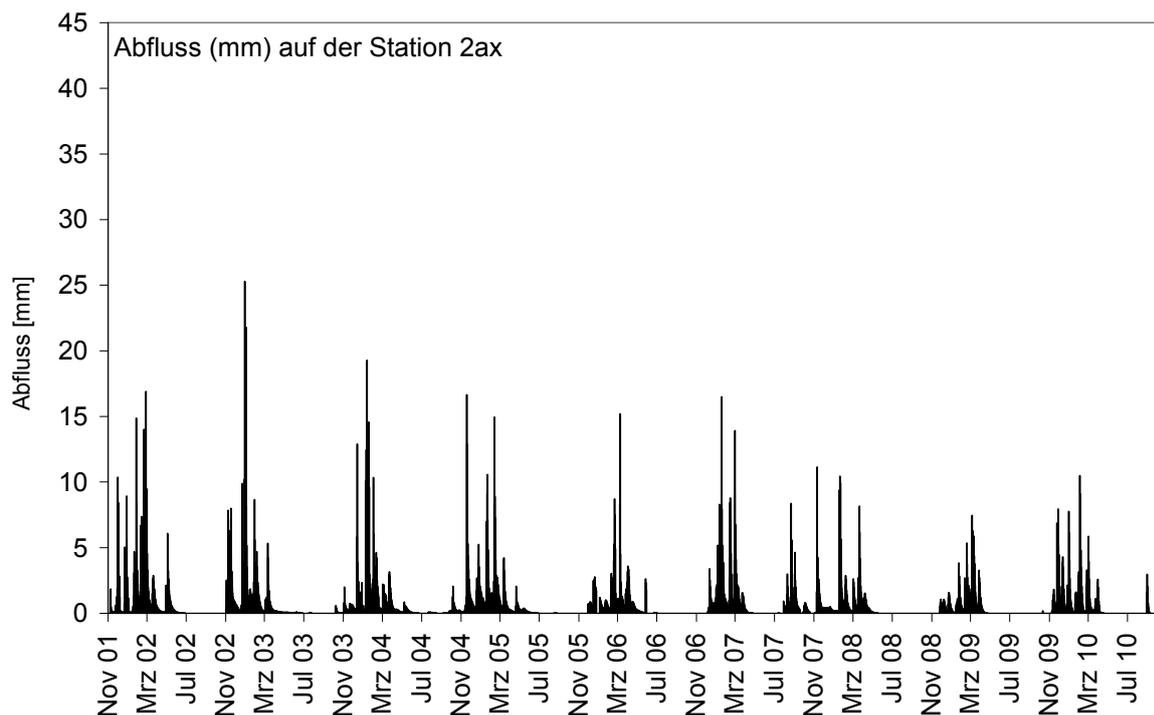


Abbildung 23 Tagesabflusswerte auf der Station 2ax
Zeitraum 01.11.2001 – 28.10.2010

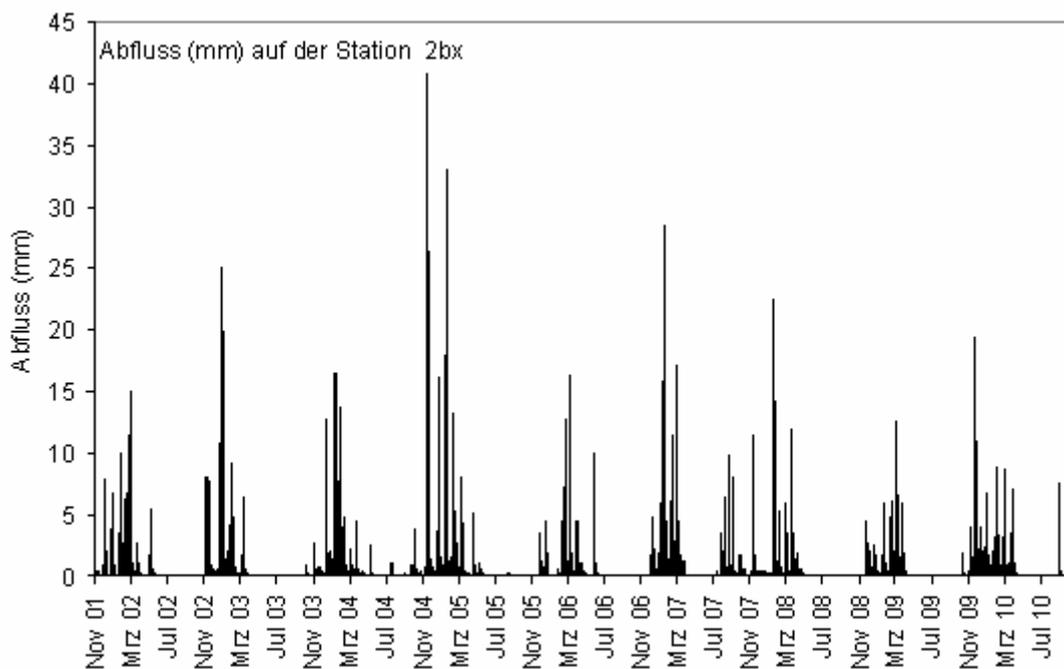


Abbildung 24 Tagesabflusswerte auf der Station 2bx
Zeitraum 01.11.2001 – 28.10.2010

4.2 Tracerversuche

Tracer werden vorzugsweise eingesetzt, um die Verlagerungsgeschwindigkeit des Bodenwassers zu ermitteln und Hinweise auf die tatsächlichen Fließwege des Bodenwassers zu geben.

Auf Teilflächen von jeweils 16 m^2 ($4 \text{ m} \cdot 4 \text{ m}$) Größe an den Stationen 2a und 2b wurde am 7.12.1999 Bromidtracer flüssig ausgebracht (10 g/m^2 Kaliumbromid, gelöst in einer niederschlagsäquivalenten Menge von $0,5 \text{ l/m}^2$). Dieser wurde im Ablauf der Oberflächendrainage und der Betonwannen nachgewiesen. Der über die Betonwannen ausgebrachte Anteil des ausgebrachten Bromids lag unter 1 % (2a: 0,02 %; 2b: 0,01 %). Ein größerer Wassertransport durch die kontrolliert verdichtete Schicht kann wegen der extrem niedrigen Abflüsse ausgeschlossen werden.

In einem Wiederholungsexperiment am 21.1.2003 ist punktuell über den Betonwannen Uranintracer ausgebracht worden. Für die Stationen 2a und 2b wurden jeweils 25 g mit maximal 1 l destilliertem Wasser gelöst und auf einer Fläche von jeweils $20 \text{ cm} \cdot 20 \text{ cm}$ unter die zuvor abgeschälte Grasnarbe aufgegeben. Anschließend wurden die Flächen wieder mit der Grasnarbe abgedeckt, um die mögliche Zerstörung des Uranins durch Licht zu verhindern. Ab dem 23. Januar 2003 wurde bis Ende April wöchentlich Proben aus den Betonwannen der Stationen 2a und 2b, sowie aus den Drainleitungen auf Station 2a gewonnen.

Weder im Wasser der Oberflächendrainage noch im Ablauf der Betonwannen konnte ein Anstieg der Uranin-Konzentration gemessen werden.

Am 23.1.2003 wurden auf den Stationen 2ax und 2bx auf Teilflächen von jeweils ca. 1 m^2 ($1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$) Bromidtracer flüssig ausgebracht (250 g Kaliumbromid, gelöst in einer niederschlagsäquivalenten Menge von 2 l/m^2). Ebenfalls wöchentlich wurden aus den Kippzählern der Station 2ax und 2bx Proben aus dem lateralen Abfluss gewonnen.

Auf Station 2ax wurde der Bromid-Tracer bereits beim ersten Probennahmetermin fünf Tage nach der Applikation im Abfluss wiedergefunden (Abbildung 25). Sieben Tage nach der Applikation wurde der Tracer auch auf Station 2bx im Abfluss gemessen. Eine erste Konzentrationsspitze konnte auf beiden Stationen 14 Tage nach der Applikation ermittelt werden. Mit Abnahme der Niederschläge im Februar wird auch eine Abnahme der Bromid-Konzentrationen in den Proben gemessen. Nach dem Wiedereinsetzen der Niederschläge im März und während der Aufsättigungsphase des Bodens werden die gelösten Stoffe aus den mobilen Bereichen der Bodenmatrix ausgewaschen, was wieder zu einem Konzentrationsanstieg im Abfluss führt. Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2003 ist auf Station 2ax zwischen dem 22. Mai und dem 9. Oktober wegen der Trockenheit keine Probennahme möglich. Im gleichen Zeitraum werden auf Station 2bx 4 Proben genommen. Die Bromid-Konzentrationen der Proben liegen zwischen 0,48 und 0,65 mg/l. Die Bromid-Konzentrationen der Proben vom 09.10.2003 liegen auf beiden Stationen unter der Nachweisgrenze. Im weiteren Verlauf des Oktobers wurde ein Anstieg der Bromid-Konzentration in den Proben gemessen.

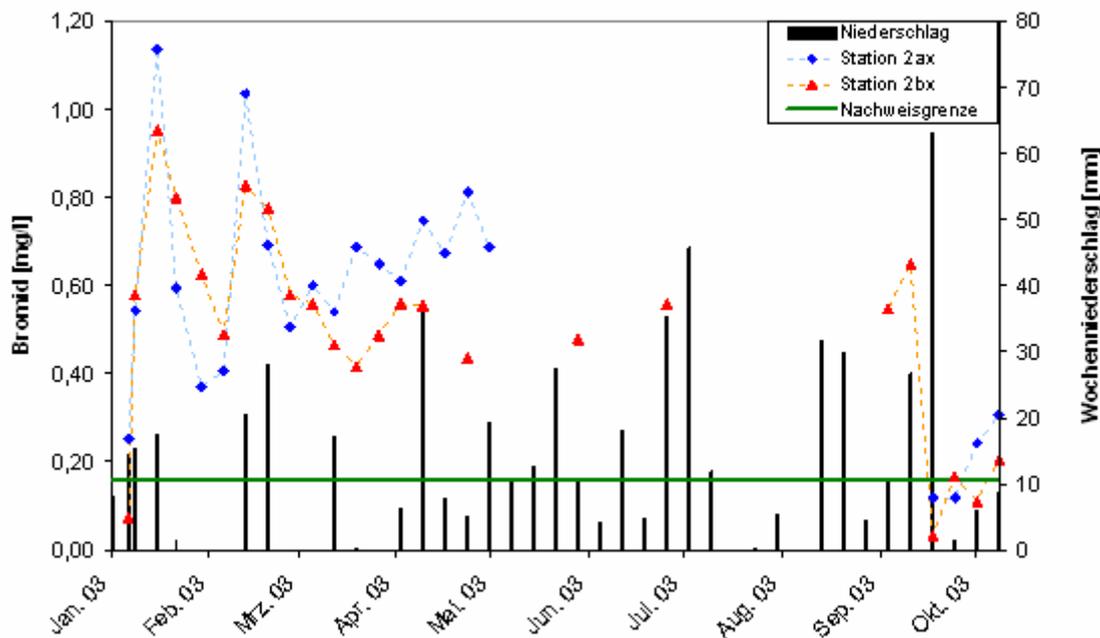


Abbildung 25 Bromidkonzentration auf den Stationen 2ax und 2bx und Wochenniederschlag
Zeitraum 28.01. bis 30.10.2003

Die Gesamtfracht auf Station 2ax bis zum 30.10.2003 beträgt 25,49 g Bromid. Insgesamt wurden bis zu diesem Zeitpunkt auf Station 2ax 15,2 % der applizierten Bromidmenge wieder gefunden. Die Gesamtfracht auf Station 2bx bis zum 30.10.2003 beträgt 38,14 g Bromid (22,7% der applizierten Menge). In Abbildung 25 ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Dynamik des Tracer-Austrags der Stationen 2ax und 2bx sehr ähnlich ist und mit der Sickerwasserbildung gekoppelt ist. Bis zum 25.11.2004 sind auf Station 2ax 38 % und auf Station 2bx 32 % ausgetragen worden. Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil des Tracers noch im Boden zurückgehalten wird.

4.3 Bilanzen

4.3.1 Methodische Vorbemerkung

Grundsätzlich können zur Quantifizierung von Wasserflüssen verschiedene Methoden eingesetzt werden. Im Rahmen der Untersuchung alternativer Lösungen für Deponieabschlussysteme werden direkte Methoden bevorzugt, die es gestatten nach dem Vorbild von **Lysimetern** das unterhalb einer zu prüfenden Systemkomponente durchsickernde Wasser aufzufangen. Das Wannenkonzepkt für Station 2 unterscheidet sich von üblichen Lysimetern dadurch, dass die seitlichen Wände nicht bis zur Bodenoberfläche aufragen. Diese Konstruktion wurde gewählt, um den erwünschten lateralen Abfluss auf der mineralischen Dichtungsschicht nicht zu behindern.

Zur Bestimmung der Wassergehalte aus der Rekultivierungsschicht der Stationen 2a und b wurde ein kombiniertes Klimatische Wasserbilanz-/Wasserscheiden-Verfahren angewendet. Die Wasserscheidenmethode [13] basiert auf der Festlegung der Bewe-

gungsrichtung des Bodenwassers (vertikal nach unten oder nach oben). Während transpirationsaktiver Zeiten stellt sich durch den Wasserentzug der Pflanzen und die Evaporation von der unbewachsenen Bodenoberfläche im Boden eine Ebene (sog. Wasserscheide, zero flux plane) ein, die einen aufsteigenden von einem absteigenden Wasserfluss trennt. Zur Ermittlung der zeitabhängigen Tiefenlage der hydraulischen Wasserscheide ist die Messung der Matrixpotentiale (Tensiometer) in mehreren, übereinander angeordneten Messebenen erforderlich. Mithilfe der Wassergehaltsänderungen in diesen Tiefen kann Wasserverlust im Boden eindeutig der Verdunstung oder der Tiefensickerung zugeordnet werden. Die für die Umrechnung der gemessenen Wasserspannungen in Wassergehalte notwendigen pF-Kurven sind für alle Versuchsstandorte tiefenspezifisch im Freiland und im Labor bestimmt worden.

Im Winterhalbjahr – bei permanent absteigender Bodenwasserbewegung – wird die Tiefensickerung nach der **Wasserbilanzmethode** bestimmt; die tägliche Tiefensickerung ergibt sich als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) aus der Differenz zwischen Niederschlag, berechneter Verdunstung (Näherungsformel nach Haude) und Bodenwassergehaltsänderung. In dieser Untersuchung wird die Haude-Formel mit den Korrekturfaktoren nach Petzold [18] verwendet.

Abbildung 26 zeigt eine Übersicht über die Wasserbilanzgrößen des Abdichtungssystems.

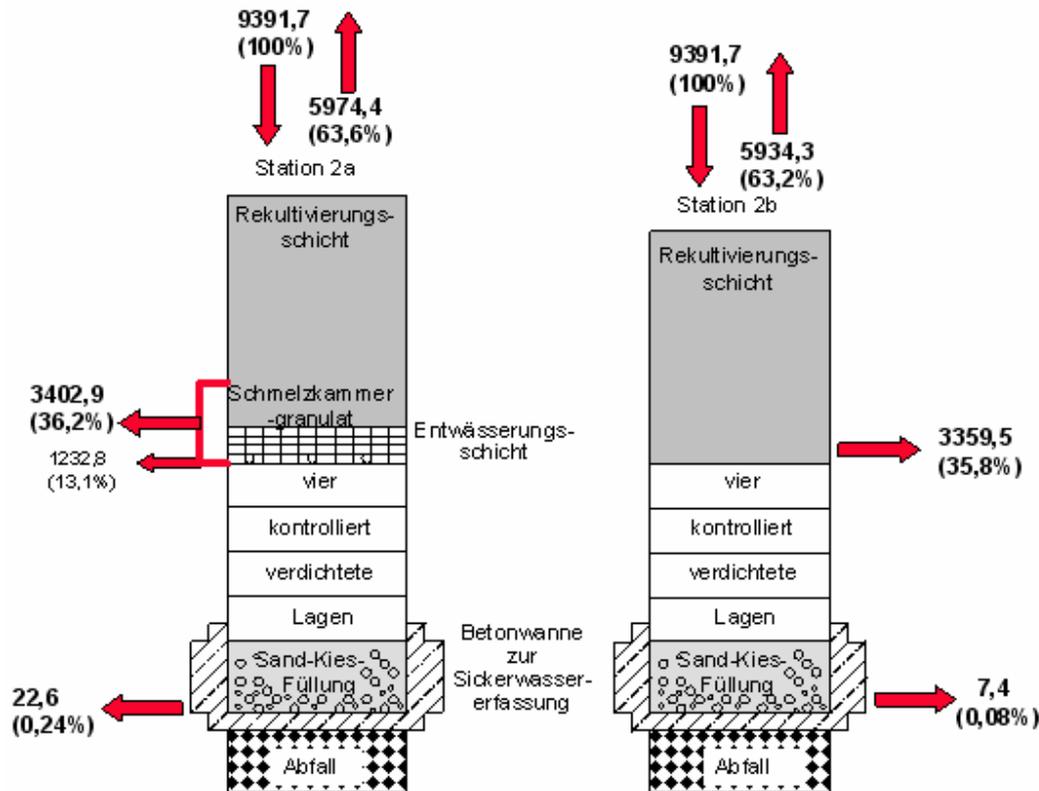


Abbildung 26 Abdichtungssystem und Wasserbilanzgrößen

Zeitraum 04.09.1999 bis 28.10.2010

Angaben in mm und (in Klammern) in Prozent vom Freilandniederschlag
 Von den 3.402,9 mm Abfluss (lateral) aus Rekultivierungsschicht und
 Flächendrainage des Systems mit Granulatschicht sind 1.232,8 mm in
 den Drainrohren gemessen.

4.3.2 Verdunstung und lateraler Abfluß

Bilanzierung für Stationen 2a und 2b

Eine indirekte Bestimmung der nicht (direkt) gemessenen Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und lateraler Abfluss erfolgte für das Oberflächenabdichtungssystem der Stationen 2a und 2b über das kombinierte Klimatische Wasserbilanz-/Wasserscheiden-Verfahren.

In Tabelle 6, Tabelle 7, Abbildung 27 und Abbildung 28 sind die wichtigsten Wasserhaushaltsgrößen für die Stationen 2a und 2b aufgeführt. Niederschlag abzüglich Verdunstung ergibt die Klimatische Wasserbilanz. Diese ist in den Abbildungen ebenso wie die Verdunstung und die lateralen Flüsse kumuliert dargestellt. Zwischen den Stationen wurden nur geringfügige Unterschiede in der Verdunstung und beim lateralen Transport berechnet (Abbildung 27 und Abbildung 28). Diese Unterschiede können auf die höhere Bodenwasserspeicherung auf Station 2b zurückgeführt werden.

Tabelle 6 Wasserbilanzgrößen und Betonwannenabfluss Station 2a
nach der kombinierten Klimatische Wasserbilanz-/Wasserscheiden-Methode
gemessener Betonwannenabfluss
Zeitraum: 04.09.1999–28.10.2010

Zeitraum	Nieder- schlag	Verduns- tung (exp.)	Nieder- schlag abzgl. Ver- dunstung (exp.)	lateraler Fluss (berech- net)	Beton- wannen- abfluss
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
04.09.-31.10.1999	124,1	107,4	16,7	-8,6	-1,3
01.11.1999-30.04.2000	516,0	160,2	355,8	-381,1	-0,5
01.05.-31.10.2000	516,0	421,4	94,6	-87,6	-0,7
01.11.2000-30.04.2001	389,1	125,8	263,3	-263,3	-0,5
01.05.-31.10.2001	358,4	403,4	-45,0	34,6	-0,9
01.11.2001-30.04.2002	516,7	145,3	371,4	-350,5	-0,3
01.05.-31.10.2002	411,8	353,2	58,6	-36,6	-0,8
01.11.2002-30.04.2003	409,5	114,7	294,8	-331,7	-0,2
01.05.-31.10.2003	417,9	368,6	49,4	-29,0	-1,0
01.11.2003-30.04.2004	398,1	151,9	246,2	-257,7	-0,7
01.05.-31.10.2004	460,6	406,5	54,1	-34,9	-2,1
01.11.2004-30.04.2005	426,0	131,2	294,8	-302,3	-1,9
01.05.-31.10.2005	365,4	390,5	-25,1	-13,9	-2,0
01.11.2005-30.04.2006	323,6	110,0	213,6	-165,1	-1,3
01.05.-31.10.2006	381,5	466,2	-84,7	25,7	-1,8
01.11.2006-30.04.2007	473,5	157,9	315,6	-303,2	-1,1
01.05.-31.10.2007	547,4	457,3	90,1	-36,9	-1,1
01.11.2007-30.04.2008	409,3	138,1	271,2	-267,9	-0,9
01.05.-31.10.2008	424,6	424,2	0,4	-0,4	-1,3
01.11.2008-30.04.2009	301,8	143,7	158,1	-207,5	-0,6
01.05.-31.10.2009	432,3	370,8	61,5	-11,6	-0,5
01.11.2009-30.04.2010	382,8	112,3	270,5	-316,8	-0,6
01.05.-28.10.2010	405,3	313,9	91,4	-56,7	-0,6
04.9.1999-28.10.2010	9391,7	5974,4	3417,3	-3402,9	-22,6

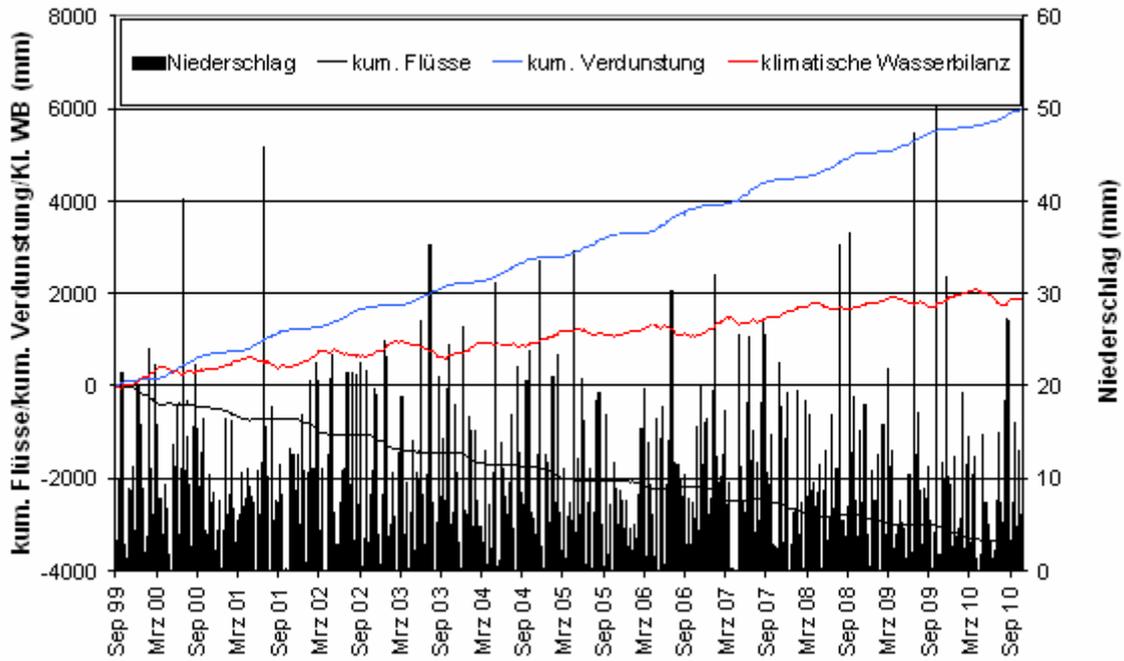


Abbildung 27 Tagesniederschlag, kumulierte laterale Bodenwasser-Flüsse, kumulierte Verdunstung und klimatische Wasserbilanz auf Station 2a

Zeitraum 04.09.1999 – 28.10.2010
alle Angaben in mm

Tabelle 7 Wasserbilanzgrößen und Betonwannenabfluss Station 2b
 nach der kombinierten Klimatische Wasserbilanz-/Wasserscheiden-Methode
 gemessener Betonwannenabfluss
 Zeitraum: 04.09.1999–28.10.2010

Zeitraum	Nieder- schlag	Verdun- sung (exp.)	Nieder- schlag abzgl. Ver- dunstung (exp.)	lateraler Fluss (berech- net)	Beton- wannen- abfluss
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
04.09.-31.10.1999	124,1	100,9	23,2	35,3	-1,1
01.11.1999-30.04.2000	516,0	148,9	367,1	-440,8	-0,3
01.05.-31.10.2000	516,0	444,3	71,7	-42,3	-0,6
01.11.2000-30.04.2001	389,1	125,8	263,3	-255,5	-0,3
01.05.-31.10.2001	358,4	415,7	-57,3	2,0	-0,7
01.11.2001-30.04.2002	516,7	139,7	377,0	-339,4	-0,1
01.05.-31.10.2002	411,8	374,7	37,1	-30,0	-0,9
01.11.2002-30.04.2003	409,5	163,0	246,5	-272,9	-0,4
01.05.-31.10.2003	417,9	384,1	33,8	-1,5	-0,7
01.11.2003-30.04.2004	398,1	178,6	219,5	-234,3	-0,3
01.05.-31.10.2004	460,6	426,6	34,1	-12,4	-1,6
01.11.2004-30.04.2005	426,0	127,5	298,5	-256,8	-0,1
01.05.-31.10.2005	365,4	382,9	-17,5	-54,2	-0,3
01.11.2005-30.04.2006	323,6	110,0	213,6	-179,4	0,0
01.05.-31.10.2006	381,5	433,7	-52,2	-16,8	0,0
01.11.2006-30.04.2007	473,5	134,3	339,3	-324,0	0,0
01.05.-31.10.2007	547,4	408,3	139,1	-16,1	0,0
01.11.2007-30.04.2008	409,3	134,8	274,5	-274,5	0,0
01.05.-31.10.2008	424,6	460,6	-36,0	1,0	0,0
01.11.2008-30.04.2009	301,8	155,8	146,0	-226,8	0,0
01.05.-31.10.2009	432,3	285,4	146,9	-31,0	0,0
01.11.2009-30.04.2010	382,8	133,9	249,0	-366,2	-0,1
01.05.-28.10.2010	405,3	265,1	140,2	-23,0	0,0
04.9.1999-28.10.2010	9391,7	5934,3	3457,4	-3359,5	-7,4

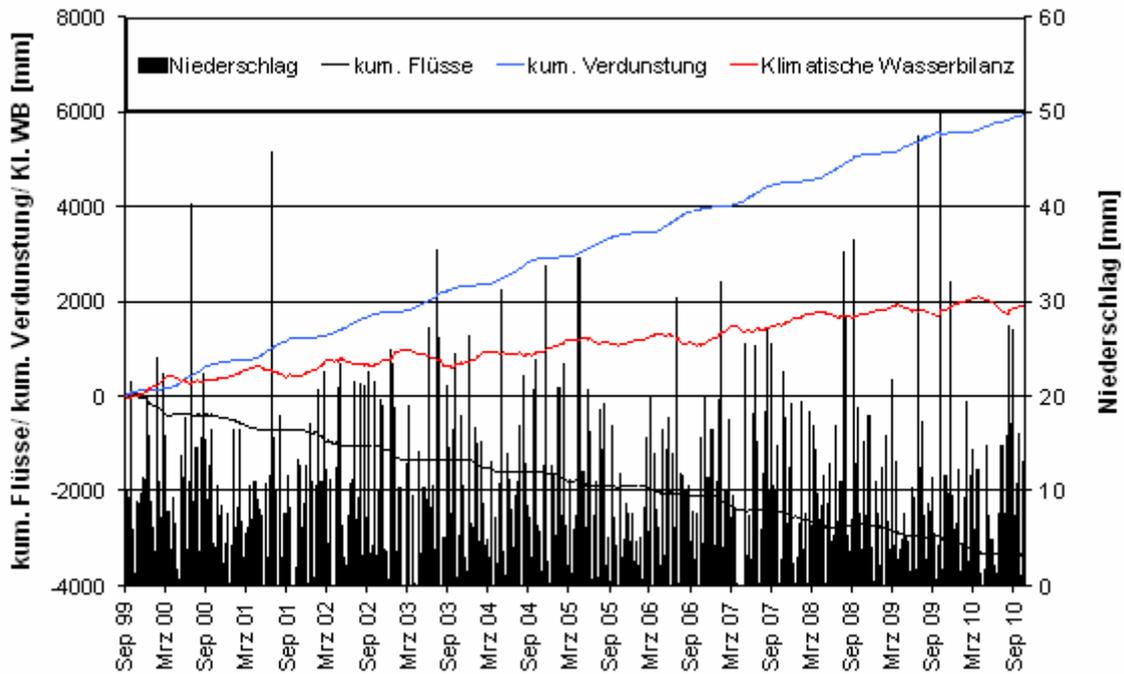


Abbildung 28 Tagesniederschlag, kumulierte Bodenwasser-Flüsse, kumulierte Verdunstung und klimatische Wasserbilanz auf Station 2b

Zeitraum 04.09.1999 – 28.10.2010
alle Angaben in mm

Vergleich zwischen berechneten und gemessenen lateralen Abflüssen

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind wichtige Wasserhaushaltsgrößen für die Stationen 2a/2b den gemessenen lateralen Abflüssen der Station 2ax/2bx gegenübergestellt. Für Station 2a/2ax besteht seit dem Messbeginn im Winterhalbjahr 01/02 bis einschließlich dem hydrologischen Sommerhalbjahr 2003 eine gute Übereinstimmung zwischen dem auf Station 2ax gemessenen und dem für die Station 2a über das Wasserscheiden-/Wasserbilanzverfahren ermittelten lateralen Abfluss. Der Unterschied beträgt 9,71 mm in 24 Monaten. Anschließend öffnet sich eine Schere zugunsten der gemessenen Abflüsse bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes auf 73,6 mm (Abbildung 32).

Tabelle 8 Wasserbilanzgrößen für die Stationen 2a und 2ax

Zeitraum: 01.11.2001 – 30.04.2005

Zeitraum	Nieder- schlag	Verdun- sung (exp.)	lateraler Fluss (berech- net)	lateraler Fluss (gemes- sen)
	Station 2a			Station 2ax
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
01.11.2001-30.04.2002	516,7	145,3	350,5	339,8
01.05.-31.10.2002	411,8	353,2	36,6	35,1
01.11.2002-30.04.2003	409,5	114,7	331,7	357,3
01.05.-31.10.2003	417,9	368,6	29,0	6,0
01.11.2003-30.04.2004	398,1	151,9	257,7	327,3
01.05.-31.10.2004	460,6	406,5	34,9	25,3
01.11.2004-30.04.2005	426,0	131,2	302,3	325,6
01.05.-31.10.2005	365,4	390,5	13,9	8,3
01.11.2005-30.04.2006	323,6	110,0	165,1	210,5
01.05.-31.10.2006	381,5	466,2	-25,7	12,0
01.11.2006-30.04.2007	473,5	157,9	303,2	272,3
01.05.-31.10.2007	547,4	457,3	36,9	74,7
01.11.2007-30.04.2008	409,3	138,1	267,9	226,1
01.05.-31.10.2008	424,6	424,2	0,4	0,8
01.11.2008-30.04.2009	301,8	143,7	207,5	174,5
01.05.-31.10.2009	432,3	368,5	14,4	0,2
01.11.2009-30.04.2010	382,8	112,3	316,8	247,6
01.05.-28.10.2010	405,3	313,9	56,7	10,2
04.9.1999-28.10.2010	7488,1	4754,0	2699,8	2653,5

Auf Station 2b/2bx treten in den Winterhalbjahren 2001/02 und 2004/05 deutliche Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen auf; sie betragen -95,6 bzw. +119,5 mm. Ersterer kann darauf zurückgeführt werden, dass der laterale Abfluss, der aufgrund eines technischen Defektes vom 07.12.2001 bis 15.01.2002 nicht aufgezeichnet wurde, zu niedrig rekonstruiert worden ist. Simulationen mit dem Bodenwasserhaus-
haltsmodell *Hydrus 2D* für die Station 2b deuten daraufhin, dass auf Station 2b im Winterhalbjahr 01/02 zusätzlicher lateraler Abfluss in Höhe von ca. 40 mm nicht aufgezeichnet oder nicht zutreffend rekonstruiert worden ist [19]. Ab dem Winter 02/03 übertrifft mit Ausnahme des Sommers 2005 bis einschließlich des hydrologischen Sommerhalbjahres 06 der gemessene Abfluss den berechneten Abfluss.

Tabelle 9 Wasserbilanzgrößen für die Stationen 2b und 2bx

Zeitraum: 01.11.2001 – 30.04.2005

Zeitraum	Nieder-schlag	Verdun-sung (exp.)	lateraler Fluss (berechnet)	lateraler Fluss (gemessen)
	Station 2b			Station 2bx
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
01.11.2001-30.04.2002	516,7	139,7	339,4	243,8
01.05.-31.10.2002	411,8	374,7	30,0	26,1
01.11.2002-30.04.2003	409,5	163,0	272,9	297,6
01.05.-31.10.2003	417,9	384,1	1,5	6,2
01.11.2003-30.04.2004	398,1	178,6	234,3	279,3
01.05.-31.10.2004	460,6	426,6	12,4	43,2
01.11.2004-30.04.2005	426,0	127,5	256,8	376,3
01.05.-31.10.2005	365,4	382,9	54,2	12,2
01.11.2005-30.04.2006	323,6	110,0	179,4	206,7
01.05.-31.10.2006	381,5	435,1	16,8	29,3
01.11.2006-30.04.2007	473,5	134,3	324,0	288,3
01.05.-31.10.2007	547,4	408,3	16,1	83,2
01.11.2007-30.04.2008	409,3	134,8	274,5	229,6
01.05.-31.10.2008	424,6	460,6	-1,0	2,0
01.11.2008-30.04.2009	301,8	155,8	226,8	194,4
01.05.-31.10.2009	432,3	283,0	33,4	8,5
01.11.2009-30.04.2010	382,8	133,9	366,2	318,4
01.05.-28.10.2010	405,3	265,1	23,0	29,2
04.9.1999-28.10.2010	7488,1	4698,0	2660,7	2674,1

Im hydrologischen Winterhalbjahr 06/07 und 07/08 wird auf beiden Stationen ein höherer lateraler Abfluss berechnet als gemessen. Dies lässt sich eventuell damit erklären, dass die zu verwendenden Haude-Monatskoeffizienten im Winterhalbjahr besonders niedrig sind, um die mittleren phänologischen Verhältnisse einer Wachstumspause der Grasvegetation widerzuspiegeln. Die Witterung hat aber eventuell eine höhere Transpirationsleistung bewirkt. Da diese wegen der niedrigen Haude-Koeffizienten nicht berechnet wird, muss rechnerisch der laterale Fluss höher ausfallen. Er bildet das Restglied des Berechnungsverfahrens.

Im Sommerhalbjahr 2007 kehrt sich diese Beobachtung um. Auf beiden Stationen wird ein höherer Abfluss gemessen als berechnet. Dies lässt sich eventuell damit erklären, dass aufgrund der verwendeten Haude-Koeffizienten, die im Sommer höher als im Winter sind, eine größere Verdunstung berechnet wird, und der berechnete laterale Abfluss als Restglied zu klein ausfällt.

Auch im hydrologischen Winterhalbjahr 08/09 sowie im hydrologischen Sommerhalbjahr 2009 ist der berechnete laterale Abfluss größer als der gemessene. Auf beiden Stationen beträgt der Unterschied im Winterhalbjahr 30 mm und im Sommerhalbjahr auf Station 2ax 14 mm und auf Station 2bx 25 mm.

Im hydrologischen Winterhalbjahr wird auf beiden Stationen ein höherer lateraler Abfluss berechnet als gemessen, obwohl schon der gemessene laterale Abfluss mit über 60 % des gefallen Niederschlages als sehr hoch anzusehen ist. Im Sommerhalbjahr wird über die Berechnung der laterale Abfluss der Station 2a/2ax stark unterschätzt, so dass sich über das hydrologische Jahr gesehen die gegenläufigen Unterschiede annähernd kompensieren.

Für den gesamten Versuchszeitraum ergibt sich auf Station 2ax eine Differenz zwischen gemessenen und berechneten Abfluss von - 46,3 mm und auf Station 2bx von 13,4 mm. Die Abbildung 29 visualisiert die Größenordnungen der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten lateralen Abflüssen sowie zwischen den Ergebnissen für beide Stationen im Vergleich.

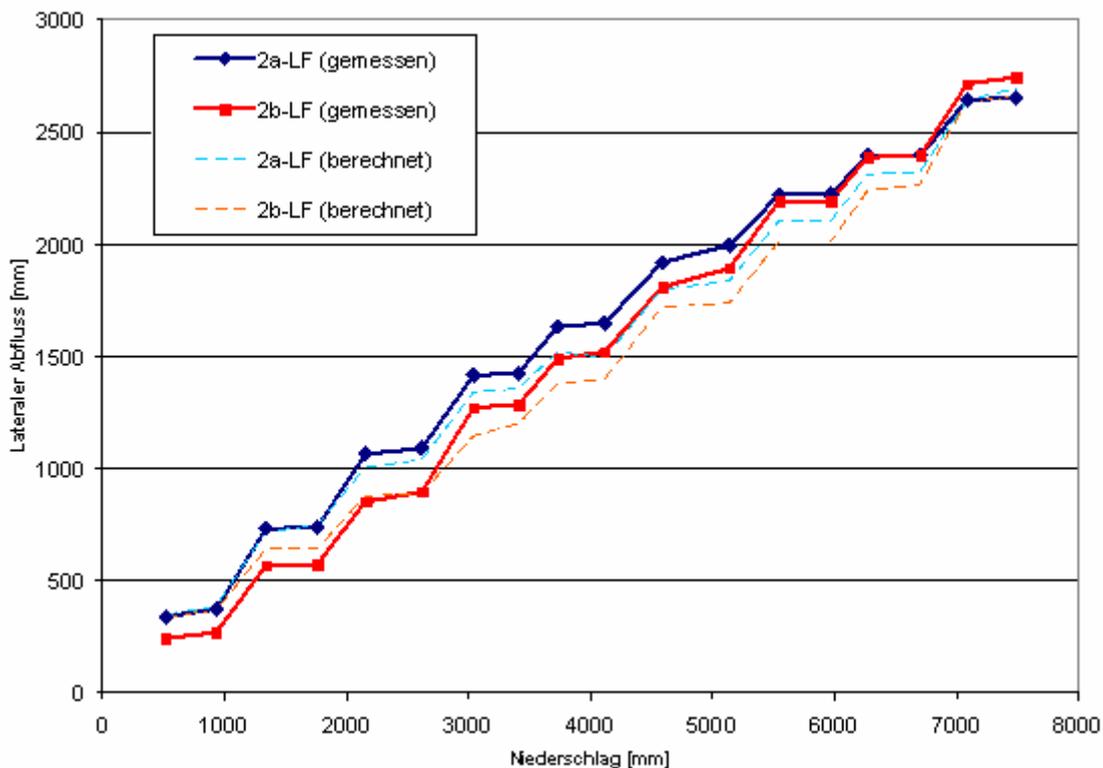


Abbildung 29 Doppelsummenkurven zwischen dem Niederschlag und gemessenen sowie berechneten lateralen Abflüssen, auf der Basis hydrologischer Halbjahre (1.11.2011 – 28.10.2011)
LF: lateraler Abfluss

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Betonwannen-Abflüsse

Die Betonwannenabflüsse sind über den gesamten Zeitraum sehr gering. Um die Funktionsweise des Abdichtungssystems zu verstehen, werden sie diskutiert, obwohl sie weniger als 1% des Niederschlags ausmachen. Trotz der geringen Wassergehalte in den Sommermonaten und der trockengefallenen Drainageleitung kommt es in diesen Zeiträumen zu einer Wasserabgabe aus der kontrolliert verdichteten Schicht. Daher war die Frage zu klären, wie das Wasser in die Betonwannenabläufe gelangt. Stammt es aus dem äußerst langsamen Matrixporenfluss durch die kontrolliert verdichtete Schicht? Existieren räumlich begrenzte Bereiche bevorzugter Wasserdurchlässigkeit und hoher Sickergeschwindigkeit?

Das Auftreten von Spuren des Bromid-Tracer kurze Zeit nach der Inbetriebnahme der Stationen 2a und 2b deutete zunächst auf präferentielle Fließwege, die aber quantitativ allenfalls unbedeutsam sind. Die Wiederholung eines Tracer-Experiments mit Uranin brachte keinen Nachweis schneller Sickerwasserdurchtritte in die Betonwannen unterhalb der kontrolliert verdichteten Schicht.

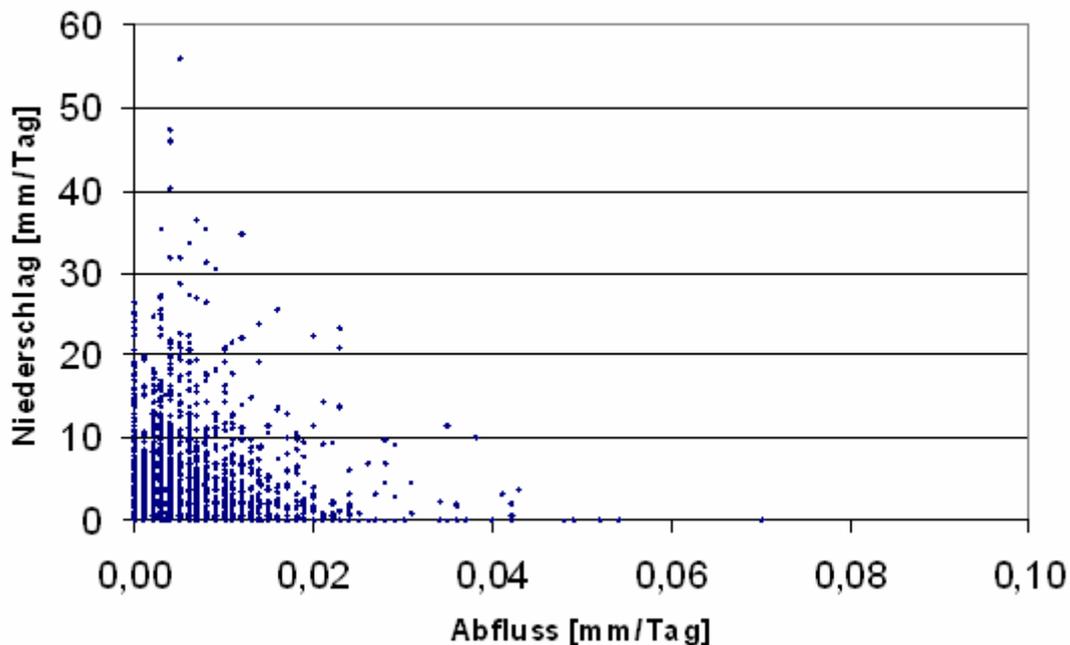


Abbildung 30 Niederschlag und Abfluss aus der Betonwanne auf Station 2a
Tageswerte im Zeitraum 09/1999 – 28.10/2010 (mm = l/m²)

Wirksamer Makroporenfluss müsste sich im Zusammenhang zwischen hohen Niederschlägen und großen Abflüssen bemerkbar machen. Hinweise für eine solche Korrelation fehlen. Auch im hydrologischen Winterhalbjahr 2004/2005 (dritte Phase gemäß der Erläuterung zu Abbildung 19; Phase 2 nach Abbildung 32) ist es zu keiner Veränderung des Zusammenhanges zwischen kurzfristigen Niederschlagsimpulsen und Betonwannenabfluss gekommen. Die Veranschaulichung dieses Sachverhaltes zeigt die Gegen-

überstellung von Niederschlag und Abfluss auf Tagesbasis für den Zeitraum 01.11.2004 bis 28.10.2010 (Abbildung 30 und Abbildung 31). Angesichts der geringen Abflusssummen und der fehlenden kurzfristigen Reaktion des Gesamtabflusses auf Niederschläge können quantitativ bedeutsame Makroporen – im Sinne von Regenwurmgingen oder größeren Rissen – für die kontrolliert verdichtete Schicht ausgeschlossen werden. Es kann keine Abhängigkeit des Abflusses von einzelnen Regenereignissen quantitativ nachgewiesen werden.

Dass dieser Wasserfluss extrem langsam ist, bestätigen auch die isotopengeochemischen Untersuchungen von *Kiewitt* [2], der nachweisen konnte, dass die Sauerstoffisotopen-Werte im Betonwannenablauf keinerlei jahreszeitlichen Gang aufweisen, wie er sich noch bei dem lateralen Abfluss zeigt.

Die hohe Dichtwirkung verursacht einen sehr langsamen Wasserfluss durch die kontrolliert verdichtete Schicht. Nach den bisherigen Ergebnissen muss Matrixfluss quantitativ dominieren, der nach dem Darcy-Gesetz von der Wasserleitfähigkeit und dem hydraulischen Gradienten abhängt.

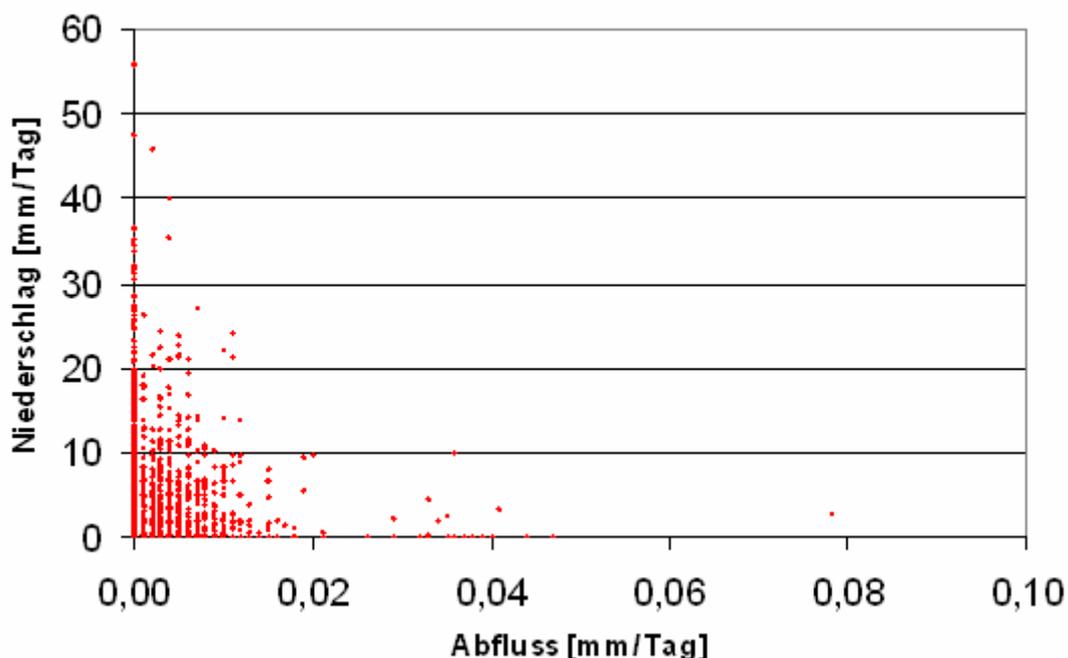


Abbildung 31 Tagesniederschlag und Abfluss aus der Betonwanne auf Station 2b (Tageswerte im Zeitraum 11/04 – 10/10 (mm = l/m²)

Die Betonwannenabläufe werden in ihrer zeitlichen Differenzierung sehr wahrscheinlich durch einen Wassertransport in der Dampfphase beeinflusst. Hierauf deuten die Untersuchungen von *Weiß* [4] hin. Richtung und Stärke des Transports hängen somit nicht nur vom hydraulischen Gradienten und der wassergehaltsabhängigen Wasserleitfähigkeit des Dichtmaterials (Darcy-Fluss) ab, sondern auch von den Temperaturgradienten innerhalb des Dichtungssystems. Der abwärtsgerichtete Wasserdampftransport wäre im

Sommerhalbjahr zu erwarten, Wasserdampf kondensiert dieser Vorstellung zufolge in den tiefen Schichten und wäre zusammen mit dem langsamen Darcy-Fluss messbar. Transporte in der flüssigen und in der Dampfphase können also zeitweise entgegengesetzt sein.

In den Doppelsummenkurven (Abbildung 32) spiegeln sich die drei Phasen der Betonwannenabläufe wider. Dies wird besonders deutlich für Station 2a. Die Betonwannenabflüsse sind in Phase 2 stärker, bleiben aber weiterhin auf sehr niedrigem Niveau und – wie oben erörtert – ohne erkennbaren Zusammenhang zu kurzfristigen Witterungswechseln.

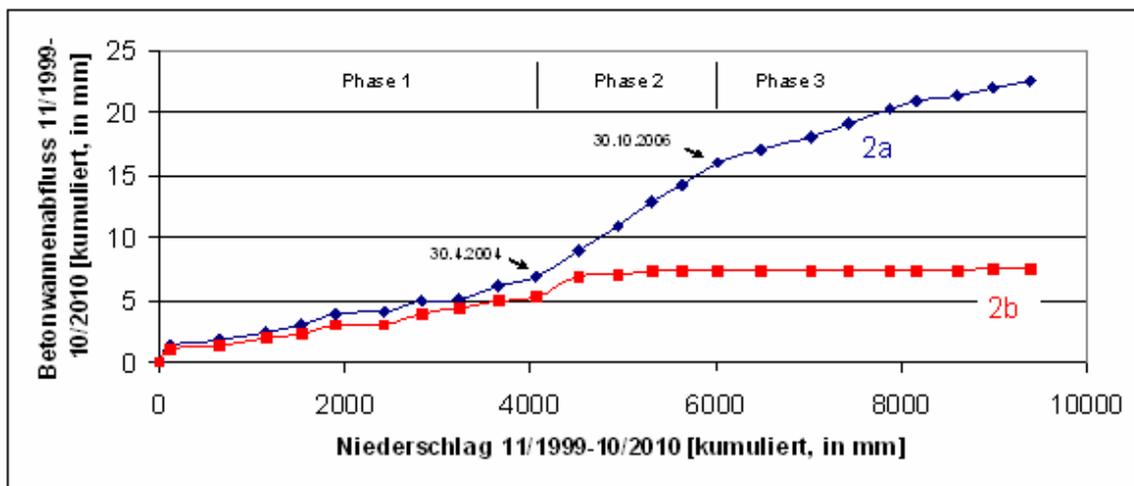


Abbildung 32 Doppelsummenkurven: Betonwannenabflüsse gegen Niederschlag

Im Sommerhalbjahr 2004 wurde auf beiden Stationen und im hydrologischen Winterhalbjahr 04/05 auf Station 2a eine Erhöhung der Abflüsse aus den Betonwannen beobachtet. Doch kann hieraus nicht gefolgert werden, die im Sommer 2001 und 2003 auf Station 2b in der mineralischen Dichtungsschicht gemessenen Wasserspannungen hätten erkennbar zur Bildung von Schrumpfrissen geführt; wenn dies so gewesen wäre, dann wäre insbesondere auf Station 2b eine Erhöhung der Betonwannenabflüsse gemessen worden. Auf Station 2a sind aufs Ganze gesehen keine relevanten Erhöhungen der Wasserspannungen in der kontrolliert verdichteten Schicht aufgetreten.

Laterale Abflüsse

Die berechneten lateralen Abflüsse sind in Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35 getrennt nach hydrologischen Halbjahren in Abhängigkeit vom Niederschlag dargestellt. Deutlich setzt sich für beide Stationen die Punktwolke der jeweiligen hydrologischen Sommerhalbjahre von der der Winterhalbjahre ab. Dies legt die Annahme nahe, dass eine widerspruchsfreie Berechnungsmethode gefunden worden ist.

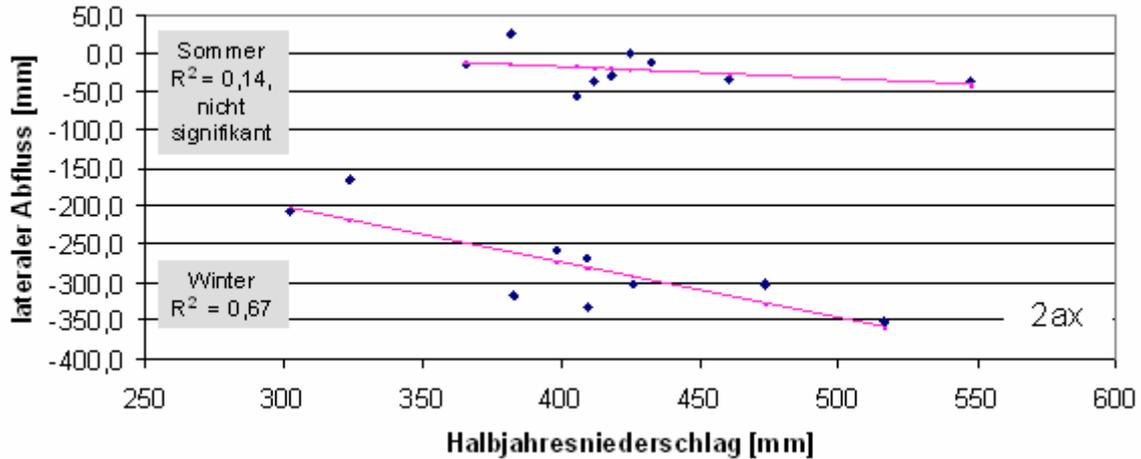


Abbildung 33 Berechneter lateraler Abfluss (Station 2a) als Funktion des Niederschlages nach hydrologischen Halbjahren

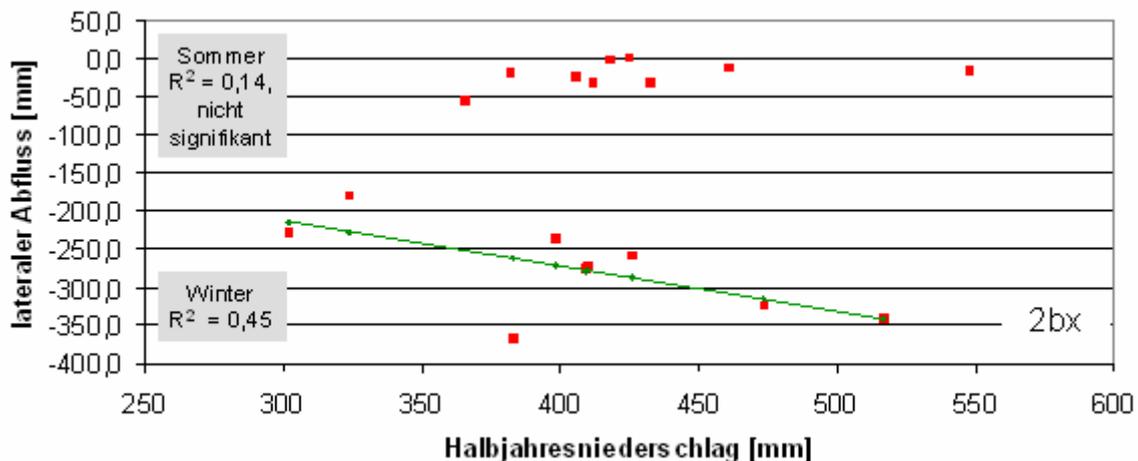


Abbildung 34 Berechneter lateraler Abfluss (Station 2b) als Funktion des Niederschlages nach hydrologischen Halbjahren

Die Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen lateralen Abflüssen (Tabelle 6, Tabelle 7 und Abbildung 29) deuten auf Grenzen der messtechnischen Erfassung der Niederschläge und der lateralen Abflüsse hin. Die mit üblichen meteorologischen Geräten in 1 m Höhe vorschriftsmäßig gemessenen Niederschläge sind – unabhängig vom Messgerät – generell mit Fehlern behaftet und müssten nach ATV (2002) im Sommer um 6 bis 12 %, im Winter bei Schnee um bis zu 30 % und mehr nach oben korrigiert werden, um den wasserhaushaltlich wirksamen Niederschlag zu erhalten. Vor diesem Hintergrund ist es nachvollziehbar, dass die gemessenen Abflüsse höher sind als die berechneten, denn in die Berechnung floss der (geringere) gemessene Niederschlag ein. Durch mehrmonatige Messkampagnen ist geprüft worden, dass expositionsabhängige (Luv-/Lee-Effekte, Gipfellege) Einflüsse die Diskrepanzen zwischen gemessenen Niederschlägen im Winter und gemessenen Abflüssen nicht erklären können.

Auch andere Fehlerquellen sind zu berücksichtigen. Die Berechnung der Verdunstung während der Zeiten ohne hydraulische Wasserscheide im Boden mit Hilfe der Haude-Formel ist ein Behelf. Mit geringfügigen Unterschieden in der Transpirationsleistung der Grasbestände ist zu rechnen, weil die Wasserspannung und damit die Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln auch durch die Stauwirkung der Granulatschicht variiert wird.

Zudem besitzt die Kalkulation der Wassergehaltsänderungen mithilfe der Wasserspannungs-Wassergehalts-Funktionen Unschärfen, die sich auf die Wasserbilanzen für den Halbjahreszeitraum auswirken können.

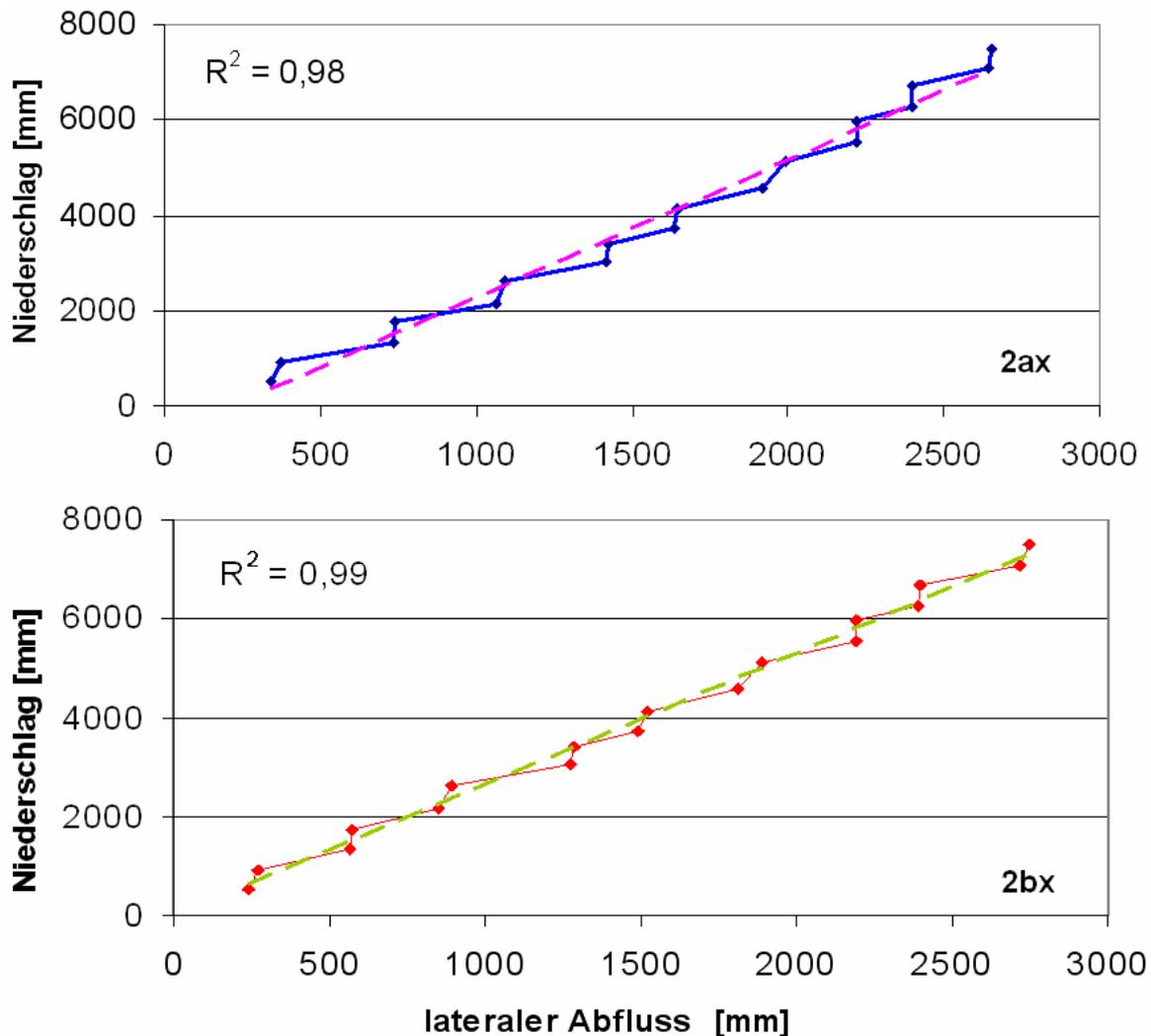


Abbildung 35 Doppelsummenkurven der auf den Stationen 2ax und 2bx gemessenen lateralen Abflüsse mit dem Niederschlag
Zeitraum 1.11.2001 bis 28.10.2010 auf Basis hydrologischer Halbjahre

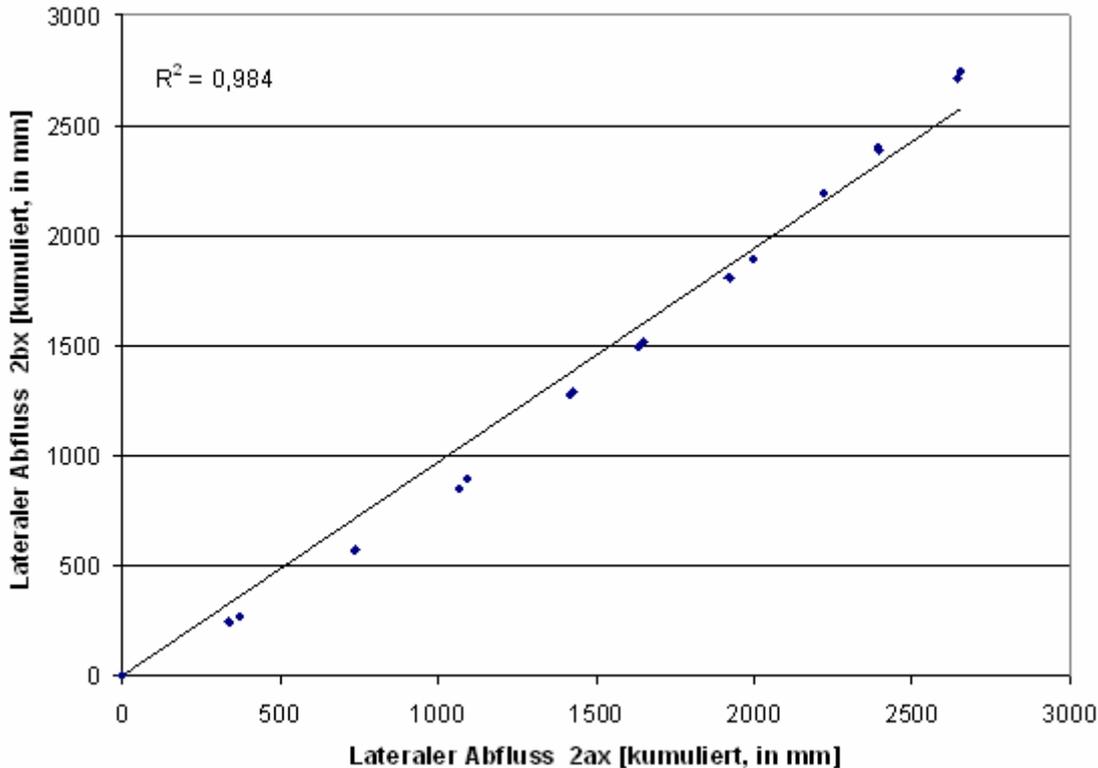


Abbildung 36 Doppelsummenkurve der lateralen Abflüsse

Die Betrachtung der lateralen Tagesabflüsse (Abbildung 24) zeigt jedoch auch, dass eventuell in den vorangegangenen hydrologischen Winterhalbjahren aufgrund der zuerst installierten, zu klein dimensionierten Kippzähler und kurzzeitigen Defekte in der Loggeraufzeichnung Spitzenabflüsse auf Station 2bx nicht erfasst worden sind. Der Austausch der Kippzähler fand im Frühjahr 2003 statt.

Diese Unbestimmtheiten müssen bei der Betrachtung der Doppelsummenkurve (Abbildung 36) bedacht werden, ehe eine grundsätzliche Änderung des unterschiedlichen Verhaltens zwischen der Rekultivierungsschicht der Stationen 2a und 2b vermutet wird. Es fällt auf, dass die Abweichung von einer gedachten Ausgleichsgeraden nicht nach dem Austausch der Kippzähler, sondern erst ein Jahr später auftritt.

Die trotz Unsicherheiten im Einzelnen hohen berechneten lateralen Abflüsse und die noch höheren gemessenen lateralen Abflüsse sind ein Beleg dafür, dass der weitaus größte Teil des Verdunstungsüberschusses in der Rekultivierungsschicht und in der Drainschicht lateral abfließt. Diese Schlussfolgerung stützt den Befund der sehr niedrigen Betonwannenabflüsse.

Wirkungsweise des Aufbaus

Auf Station 2a dient die zwischen Rekultivierungsboden und der Dichtschicht eingebaute Entwässerungsschicht als Barriere für den aufwärtsgerichteten Wasserfluss aus der Dichtschicht. So wird diese vor Austrocknung mit der Folge einer unerwünschten Trockenrissbildung (vgl. [19]) erschwert. Eine Wassersättigung der Drainschicht über ihre gesamte Mächtigkeit von 20 cm wurde nie gemessen. Aus der Wassersättigung der

überlagernden Rekultivierungsschicht darf gefolgert werden, dass die Drainschicht als Kapillarblock wirkt und große Teile des lateralen Abflusses in der Rekultivierungsschicht abgeführt werden, so wie es auch in der Systemvariante ohne Entwässerungsschicht geschieht.

Die Entwässerungsschicht wirkt somit im System einerseits der Austrocknung der Dichtschicht wirksam entgegen, und andererseits verhindert sie eine hydraulische Belastung der Dichtschicht, denn der während der Sättigung in der Rekultivierungsschicht aufgebaute Wasserdruck wirkt nie über längere Zeit auf die Dichtschicht ein. Eine halbjährlich immer wiederkehrende Befeuchtung der Dichtschicht beider Systemvarianten ist im Übrigen zur Aufrechterhaltung der Dichtwirkung durchaus erwünscht. Hohe Jahresniederschlagssummen, empirisch belegt bis 1.000 mm, und auch darüber hinaus, stellen keine Gefährdung der Dichtigkeit dar.

Für das BND-System (Boden-Natur-Dichtung) ist vom LANUV eine auf Nordrhein-Westfalen beschränkte Eignungsbeurteilung für die Systemvariante mit Entwässerungsschicht (2a) verabschiedet worden [16], weil die Möglichkeit einer Belastung der Dichtschicht durch Austrocknung aus theoretisch nachzuvollziehenden und empirisch belegten Gründen hier geringer ist. Die Sicherheit dieses BND-Systems ist als größer einzustufen als die der Variante ohne Entwässerungsschicht, welche allerdings die geringere Permeation aufweist.

Die Frage, ob das BND-System für Klimaregionen mit dauerhaft deutlich niedrigeren Niederschlägen (unter 650 mm) ebenso zuverlässig ist, konnte empirisch im Rahmen unserer Untersuchungen nicht geprüft werden.

Im Vergleich mit anderen Untersuchungen zur Systemdichtigkeit von Deponieoberflächenabdichtungssystemen [15] nehmen diese Ergebnisse eine Sonderstellung ein. Die Permeationsraten liegen dauerhaft am unteren Ende der Werte für Systeme mit mineralischer Dichtschicht. Dies ist auf folgende, der Dichtigkeit und Beständigkeit förderlichen Aspekte zurückzuführen:

- die mit 1,0 m relative große Mächtigkeit der Dichtungsschicht,
- das nicht zur Quellung und Schrumpfung neigende Material mit relativ niedrigen Ton- und hohen Schluffgehalten,
- den sorgfältigen, 4-lagigen Einbau mit Verdichtung auf dem nassen Ast der Proctor-Kurve,
- die lagenweise Verdichtungskontrolle (kf-Wert) unmittelbar nach dem Einbau und
- die anschließende Konsolidation mit der Konsequenz der Zunahme der Trockenrohdichte und somit des Verdichtungsgrades
- die der Austrocknung und dem Druck durch aufgestautes Wasser entgegenwirkende Entwässerungsschicht sowie
- eine Gras-Kraut-Vegetation, deren Verdunstungsansprüche aus der Rekultivierungsschicht mit einer nutzbaren Feldkapazität über 200 mm bedient werden.

6 Sensitivitätsanalysen zum Einfluss unterschiedlicher Hangneigungen und Vegetationsbestände

Im Vordergrund des hydrologischen Monitorings der letzten Untersuchungsjahre stand die Fragestellung, ob auch langfristig keine Austrocknungsgefährdung besteht, denn Austrocknungserscheinungen können mitunter erst nach einigen Jahren auftreten. Nach den zuvor dargestellten Ergebnissen ist ein Systemversagen nicht zu erwarten. Parallel zur letzten Phase des hydrologischen Monitorings sollten weiterführende Sensitivitätsanalysen die Wirksamkeit des Oberflächenabdichtungssystems bei verschiedenen Hangneigungen, Vegetationsbeständen und Witterungen abschätzen.

Sensitivitätsanalysen mithilfe numerischer Modellsimulationen sind hilfreich für die Beurteilung des Einflusses einzelner Variablen auf den Wasserhaushalt, denn aus zeitlichen und finanziellen Gründen bestehen nur begrenzte Möglichkeiten, verschiedene Systemvarianten im Feldversuch zu testen. Folgenden Fragen ging die Analyse nach:

- Wie wirken sich unterschiedliche Hangneigungen auf den Bodenwasserhaushalt des alternativen Deponieoberflächenabdichtungssystems aus?
- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Vegetationsbestände (Gras, Strauch, Buche, Fichte) auf die zu erwartende Infiltration des Bestandsniederschlags in die Rekultivierungsschicht und weiterhin auf den Wasserhaushalt des Abdichtungssystems?
- Wie wirken sich veränderte Niederschlagseinträge auf den Wasserhaushalt des Abdichtungssystems einschließlich der Rekultivierungsschicht aus?
- Bei welcher Kombination der Systemkomponenten besteht eine relativ große Austrocknungsgefahr des Deponieoberflächenabdichtungssystems. Besonderes Augenmerk bei den Simulationen lag neben dem Abfluss auf dem minimalen Wassergehalt an der Untergrenze der Rekultivierungsschicht.

Die Simulationen wurden mit dem Programm *HYDRUS-2D* [19] vorgenommen, welches sich zur Analyse der Bewegung von Wasser, Wärme und gelösten Stoffen in variabel gesättigten Böden eignet. Die Kalibrierung des Modells erfolgte anhand von Messdaten zur Wasserspannung in sieben Messtiefen und dem Abfluss.

Die Sensitivitätsanalysen [14] haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Hangneigung nur geringe Veränderungen bei den Teilgliedern der Wasserhaushaltsbilanz bewirkt. Die erheblichsten Reaktionen treten dabei bei einem Neigungswechsel von 2,29° zu 5° auf. Ein Wandel der Vegetation dagegen bringt - bedingt durch die unterschiedlichen Verdunstungssummen und Durchwurzelungstiefen - größere Auswirkungen mit sich. Die minimalen Wassergehalte in 30 cm, 60 cm und 90 cm Tiefe liegen insbesondere beim Strauch- und Fichtenbestand sowie teilweise auch beim Buchenbestand relativ nahe am permanenten Welkepunkt von 18,8 Vol.-%. Die mittleren Wassergehalte jedoch sind mit minimal 25 Vol.-% deutlich davon entfernt. In einem ungünstigen, von großer Trockenheit geprägten Zeitraum könnte es passieren, dass diese Vegetationsarten zumindest für

kurze Zeit unter Wassermangel zu leiden haben. In einem normalen Witterungsjahr dagegen verschwinden gerade im Hinblick auf die mittleren Wassergehalte zum Einen die Differenzen zwischen den einzelnen Vegetationsarten und Hangneigungen, und zum Anderen besteht hier auf Grund der hohen Wassergehalte die geringste Wahrscheinlichkeit für Trockenstress des Bewuchses. Über die Dichtungsschicht kann in Folge der schlechten Anpassung zwischen gemessenen und simulierten Daten kaum eine Aussage getroffen werden. Es lässt sich aber immerhin behaupten, dass bei den dortigen Wassergehalten keine nennenswerten Veränderungen auftreten. Sie befinden sich stets nahe am Sättigungswassergehalt. Diese Schicht unterliegt damit keiner Austrocknungsgefährdung, und der Deponiekörper dürfte demzufolge gut geschützt sein, zumal auch die Wasserinfiltration in den Deponiekörper mit etwa 1-2 mm pro Jahr sehr gering ist. Sowohl beim lateralen Abfluss als auch beim Betonwannenabfluss lassen sich keine vegetationsbedingten Unterschiede im jahreszeitlichen Verlauf feststellen, lediglich von der Summe her unterscheiden sie sich. Des Weiteren konnte durch die Auswertung der Szenarien herausgearbeitet werden, dass jedes Witterungsjahr anders auf die verschiedenen Hangneigungen und Vegetationsbestände reagiert. Bezüglich der Wasserbilanzen lässt sich die allgemeine Äußerung treffen, dass die Speicheränderung umso positiver ist, je mehr Niederschlag fällt. Tendenziell ist bei trockener Witterung ein Grasbestand für die Wasserbilanz günstiger und bei nasser Witterung ein Buchenbestand, wobei auch hier ein Grasbestand nur geringfügig schlechter abschneidet. Bei einem Buchenbestand stellt sich allerdings die Frage, wie verhindert werden soll, dass dessen Wurzeln nicht in die Dichtungsschicht wachsen. Gerade in trockeneren Jahren, wo in der Rekultivierungsschicht eventuell nicht genügend pflanzenverfügbares Wasser zur Verfügung steht, besteht die Gefahr, dass die Wurzeln auf der Suche nach Wasser in die Dichtungsschicht eindringen. Die Rekultivierungsschicht müsste auf jeden Fall mächtiger ausfallen, wenn bedacht wird, dass die Wurzeln einer Buche mittleren Alters bis in 2 m Tiefe reichen.

Alles in allem scheint die Deponie-Oberflächenabdichtung nach dem Boden-Natur-Dichtungssystem am besten bei einem Grasbestand ein wirksames Abdichtungssystem zu sein, denn bei diesem fehlen Extrema in den Wassergehalten, oder sie fallen zumindest geringer aus als bei den anderen drei Beständen. Im Hinblick auf die Wassergehalte wäre zudem ein schwach geneigter Hang wünschenswert. In unseren Szenarien konnte nicht die durch unterschiedliche Expositionen hervorgerufenen Modifikationen der Verdunstung berücksichtigt werden.

Zusammenfassung

Auf der Deponie Castrop-Rauxel waren zwischen September 1999 und Oktober 2010 Messstationen (Station 2a und 2b) auf zwei großtechnisch realisierten, alternativen Oberflächenabdichtungssystemen in Betrieb. Die Durchsickerung durch die Dichtungsschichten sowie im gesamten System in sieben Tiefen die Bodenwasserspannungen wurden in stündlicher Auflösung gemessen. Laterale Abflüsse oberhalb der Dichtungsschicht konnten ab dem hydrologischen Winterhalbjahr 01/02 auf ergänzenden Versuchsstationen (Station 2ax und 2bx) ebenfalls in stündlicher Auflösung gemessen werden. Der vorliegende Bericht umfasst für die Stationen 2a und 2b den gesamten Messzeitraum September 1999 - Oktober 2010, für die Stationen 2x den Zeitraum November 2001 bis Oktober 2010.

Die auf der Station 2a aus den 4-teiligen Betonwannen registrierten Abflüsse waren sehr gering. Die Betonwannenabflüsse lassen keinen Zusammenhang mit kurzfristigen Witterungswechseln erkennen. 22,6 mm oder 0,24 % der Niederschlagssumme wurden im Beobachtungszeitraum (04.09.1999 – 28.10.2010) durch die kontrolliert verdichtete Schicht abgeführt, auf der Station 2b waren es 7,4 mm oder 0,1 % des Freilandniederschlages.

Der Abfluss aus den Betonwannen der Station 2 erfolgt unabhängig von der momentanen Wassersättigung des Rekultivierungsbodens. Angesichts der geringen Abflusssummen und der fehlenden kurzfristigen Reaktion auf Niederschläge können quantitativ bedeutsame Makroporen in der kontrolliert verdichteten Schicht ausgeschlossen werden.

Die an beiden Stationen unterhalb der mineralischen Dichtung gemessenen Abflüsse im Sommer können auf temperaturinduzierte Wasserdampftransporte und auf Matrixfluss, der nach dem Darcy-Gesetz von der Wasserleitfähigkeit und dem hydraulischen Gradienten abhängt, erklärt werden.

Mit Hilfe eines Wasserbilanz-/Wasserscheiden-Verfahren wurden für die Stationen 2a und 2b laterale Abflüsse berechnet und diese den gemessenen gegenübergestellt. Insgesamt übertreffen die gemessenen lateralen Abflüsse die berechneten. Diese Diskrepanzen sind primär auf bekannte Fehlerquellen bei meteorologischen und bodenphysikalischen Messmethoden zurückzuführen.

Die Tensiometermessungen zeigen, dass im Sommer in Folge kapillaren Wassertransports sich eine Zunahme der Wasserspannungen in einem mehrschichtigen Oberflächenabdichtungssystem bis in Tiefen von 210 cm auswirken kann, wenn zwischen Rekultivierungsschicht und mineralischer Dichtungsschicht keine Entwässerungsschicht vorhanden ist. Die Flächendrainage dient neben ihrer eigentlichen Funktion als Entwässerungsschicht auch als kapillarbrechende Schicht für den aufwärts gerichteten Wassertransport. Unter dem Gesichtspunkt der Bildung von Schrumpfrissen und somit Wasserwegsamkeiten (präferenzierter Fließwege) während extremer Trockenphasen ist dieser Unterschied bedeutsam. Bei der Variante mit Entwässerungsschicht ist die Austrocknungsgefahr deutlich geringer.

Literatur

Veröffentlichungen über das Projekt

- [1] HOEPFNER, U., WEIß, K. & ZEPP, H. (2003): Zur Vorhersage der $\Theta(\psi)$ -Beziehung von künstlichen Rohböden mittels Pedotransferfunktionen. – Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 102, 83-84
- [2] KIEWITT, S. (2010): Gefügebildung und Langzeitbeständigkeit alternativer mineralischer Oberflächenabdichtungen von Abfalldeponien. – Mat. z. Raumordnung 74, Geographisches Inst. der Ruhr-Universität Bochum (Hg.), 172-273
- [3] WEIß, K. & ZEPP, H. (2004): Wirksamkeit eines alternativen Deponie-Oberflächenabschlusssystem mit mineralischer Dichtschicht. – Müll und Abfall 3/2004 (16. Jg.), 131-135
- [4] WEIß, K. (2010): Wasserhaushalt alternativer Deponieoberflächenabschlusssysteme – Feldversuche und Modellierungen. – Mat. z. Raumordnung 74, Geographisches Inst. der Ruhr-Universität Bochum (Hg.), 1-168
- [5] ZEPP, H. & HENNIG, A. (2002): Auflastbedingte Konsolidation einer mineralischen Dichtschicht. – Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften 3, 157-166
- [6] ZEPP, H. & LOHMANN, A. (2002): Neue Lösungen für Oberflächenabdichtungen von Deponien. – Abfall – Recycling – Altlasten 27, 63/1-14
- [7] ZEPP, H. & WEIß, K. (2003): Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabschlusssystemen mit mineralischer Dichtschicht. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 102, 715-716
- [8] ZEPP, H. (2003): Welchen Beitrag kann die Vegetation zur Minderung der Sickerwasserbildung auf Deponieböschungen leisten?. Wasserhaushaltsuntersuchungen und Modellrechnungen. – Bochumer Geographische Arbeiten, Sonderheft 14, 57-72
- [9] ZEPP, H. (HRSG.) (2010a): Oberflächenabdichtung nach dem Boden-Natur-Dichtungssystem (BND-System) auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel. – Mat. z. Raumordnung 74, herausgegeben vom Geographisches Inst. der Ruhr-Universität Bochum, 285 S.
- [10] ZEPP, H. (2010b): Das Boden-Natur-Dichtungs-System, ein alternatives Oberflächenabdichtungssystem für Deponien. Neue Erkenntnisse zu Materialanforderungen und Leistungsfähigkeit. – Mat. z. Raumordnung 74, Geographisches Inst. der Ruhr-Universität Bochum (Hg.), 275-285

- [11] ZEPP, H., WEIß, K. HEIMANN, F. & KADELKA, A. (2010): Oberflächenabdichtung nach dem Boden-Natur-Dichtungssystem (BND-System) – 10 Jahre hydrologisches Monitoring auf der Zentraldeponie Castrop Rauxel. – Abschluss und Rekulktivierung von Deponien und Altlasten 2010. Die Umsetzung der neuen Deponieverordnung – praktische Erfahrungen im Vollzug und erste Änderungsverordnung zur neuen DepV. – Beiträge zum Seminar 13. und 14. Oktober 2010, hrsg. von Egloffstein/Burkhardt, Band 19, Karlsruhe, S. 149-159

Weiterführende Literatur

- [12] DepV (16.07.2009): Deponieverordnung – Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV) vom 16.07.2009
- [13] EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushaltes als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Stuttgart.
- [14] GEOGRAPHISCHES INSTITUT DER RUHR-UNIVERSITÄT (2010): Sensitivitätsanalysen zum Einfluss unterschiedlicher Hangneigungen und Vegetationsbestände auf den Wasserhaushalt einer Deponieoberflächenabdichtung nach dem Boden-Natur-Dichtungssystem. Bericht im Auftrag des LANUV, bearbeitet von Julia Mihajlovic und Harald Zepp, 275 S.
- [15] HENKEN-MELLIES, U. & SCHWEIZER, A. (2007): Langzeituntersuchung mineralischer Oberflächenabdichtungen. – Müll und Abfall 10/2007, S. 476 - 482
- [16] LANUV (2009): Eignungsbeurteilung der Oberflächenabdichtung nach dem Boden-Natur-Dichtungssystem (BND-System), 14.5.2009
- [17] LANUV (2010): Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme. Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung. – LANUV-Arbeitsblatt 13, Düsseldorf
- [18] PETZOLD, E. (1982): Einsatzmöglichkeiten EDV-gestützter räumlicher Informationssysteme für hydrologische Planzwecke, Bilanzierung des Wasserdargebots auf kleinräumiger Basis. Münstersche Geographische Arbeiten 14.
- [19] RAMKE et. al (Hrsg.) (2002): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 03, Höxter
- [20] SIMUNEK, J., SEJNA, M. & VAN GENUCHTEN, M. TH. (1996): HYDRUS-2D, Simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. U.S.Salinity Lab., USDA/ARS, Riverside, California
- [21] ZEPP, H.; HENNIG, A. (2002): Auflastbedingte Konsolidation einer Oberflächenabdichtung. In: Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften der Fachhochschule Lippe und Höxter 03, S. 157-166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Aufbau des Abdichtungssystems auf Station 2a und b	7
Abbildung 2	Betonwanne mit Kies-Sandfüllung	8
Abbildung 3	Profil des Oberflächenabdichtungssystems	9
Abbildung 4	Detailansicht der Granulatschicht	9
Abbildung 5	Lage der Versuchsfelder 2a und 2b	10
Abbildung 6	Lage der Versuchsflächen	11
Abbildung 7	Versuchsaufbau der Stationen 2ax und 2bx	12
Abbildung 8	Instrumentierung der Station 2a	13
Abbildung 9	Körnungsdiagramme der „Kontrolliert verdichteten Schicht“ der Station 2a	16
Abbildung 10	Körnungsdiagramme der „Kontrolliert verdichteten Schicht“ der Station 2b	16
Abbildung 11	Körnungsdiagramm der „Rekultivierungsschicht“ der Station 2a	17
Abbildung 12	Körnungsdiagramm der „Rekultivierungsschicht“ der Station 2b	17
Abbildung 13	Wasserspannung über die Tiefe und Tagesniederschlag auf Station 2a	22
Abbildung 14	Wasserspannung über die Tiefe und Tagesniederschlag auf Station 2b	23
Abbildung 15	Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2a	25
Abbildung 16	Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2b	26
Abbildung 17	Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2ax	27
Abbildung 18	Wassergehalt über die Tiefe und Wochenniederschlag auf Station 2bx	27
Abbildung 19	Monatliche Abflusssummen aus den Betonwannen der Stationen 2a und 2b	28
Abbildung 20	kumulierter Niederschlag und Abfluss aus der Oberflächendrainage der Station 2a	33
Abbildung 21	kumulierter lateraler Abfluss auf den Stationen 2ax und 2bx und kumulierter Niederschlag	34
Abbildung 22	Monatliche laterale Abflusssummen auf den Stationen 2ax und 2bx und monatlicher Niederschlag	35
Abbildung 23	Tagesabflusswerte auf der Station 2ax	36
Abbildung 24	Tagesabflusswerte auf der Station 2bx	36
Abbildung 25	Bromidkonzentration auf den Stationen 2ax und 2bx und Wochenniederschlag	38
Abbildung 26	Abdichtungssystem und Wasserbilanzgrößen	40
Abbildung 27	Tagesniederschlag, kumulierte laterale Bodenwasser-Flüsse, kumulierte Verdunstung und klimatische Wasserbilanz auf Station 2a	42
Abbildung 28	Tagesniederschlag, kumulierte Bodenwasser-Flüsse, kumulierte Verdunstung und klimatische Wasserbilanz auf Station 2b	44

Abbildung 29	Doppelsummenkurven zwischen dem Niederschlag und gemessenen sowie berechneten lateralen Abflüssen,	47
Abbildung 30	Niederschlag und Abfluss aus der Betonwanne auf Station 2a	48
Abbildung 31	Tagesniederschlag und Abfluss aus der Betonwanne auf Station 2b (49
Abbildung 32	Doppelsummenkurven: Betonwannenabflüsse gegen Niederschlag	50
Abbildung 33	Berechneter lateraler Abfluss (Station 2a) als Funktion des Niederschlages	51
Abbildung 34	Berechneter lateraler Abfluss (Station 2b) als Funktion des Niederschlages	51
Abbildung 35	Doppelsummenkurven der auf den Stationen 2ax und 2bx gemessenen lateralen Abflüsse mit dem Niederschlag	52
Abbildung 36	Doppelsummenkurve der lateralen Abflüsse	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Geotechnisch-bodenphysikalische Eigenschaften der Stationen 2a und 2b	15
Tabelle 2	Geotechnisch-bodenphysikalische Eigenschaftender verdichteten Lagen an den Stationen 2a und 2b	18
Tabelle 3	Niederschlag in Castrop-Rauxel und Bochum	19
Tabelle 4	Lufttemperatur in Castrop-Rauxel und Bochum	20
Tabelle 5	Abfluss an den Stationen 2a und 2b	29
Tabelle 6	Wasserbilanzgrößen und Betonwannenabfluss Station 2a	41
Tabelle 7	Wasserbilanzgrößen und Betonwannenabfluss Station 2b	43
Tabelle 8	Wasserbilanzgrößen für die Stationen 2a und 2ax	45
Tabelle 9	Wasserbilanzgrößen für die Stationen 2b und 2bx	46

Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

