Vergleichende Lysimeteruntersuchungen an 4 Aufbauvarianten von Rekultivierungsschichten einer Deponieoberflächenabdichtung unter Einsatz von Sekundärbaustoffen

Dipl.-Ing. Steffen Raabe, Dipl.-Ing. Brigitte Schmidt, MEAB mbH, Potsdam

Zusammenfassung

Aufbau und Zusammensetzung von Rekultivierungsschichten haben wesentlichen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit und Wirksamkeit des darunter liegenden Dichtungssystems. Aufgrund der im Land Brandenburg eingeschränkten Verfügbarkeit geeigneter natürlicher Bodenmaterialien ist die Suche nach Lösungen zur Herstellung einsetzbarer Materialgemische unter Verwendung von Sekundärbaustoffen Aufgabe der MEAB mbH zur kostengünstigen Sicherung der notwendigen Materialmengen zur Sanierung ihrer Großdeponien. Im Rahmen dieses Beitrages werden die bisher vorliegenden Ergebnisse und Erfahrungen aus der 3-jährigen Untersuchung unterschiedlicher Aufbauvarianten von Rekultivierungsschichten auf der Lysimeteranlage der TU Berlin in Dahlem dargestellt und bewertet.

1 Einleitung

Die Märkische Entsorgungsanlagen Betriebsgesellschaft (MEAB) mbH betreibt seit 1974 im Land Brandenburg zwei Siedlungsabfalldeponien, eine Bauschutt- und eine Sonderabfalldeponie sowie diverse Behandlungsanlagen.

Entsprechend der seit dem 01.03.2001 geltenden „Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen“ steht die MEAB mbH wie viele andere Deponiebetreiber in der Pflicht, ihre Deponien bzw. Teilbereiche der Deponien entsprechend dem Stand der Technik anzupassen und/oder den geregelten Abschluss der Deponien mit einer Gesamtoberfläche von mehr als 400 ha zu planen. Mit der Deponieverordnung (DepV) wurden durch den Anhang 5 detaillierte Anforderungen an Rekultivierungsschichten formuliert, sowie „die Schadstoffgehalte und Eluatkonzentrationen des verwendeten Bodenmaterials, der Gemische und ihrer mineralischen Bestandteile“ begrenzt.

In Vorbereitung der Sicherung ihrer Großdeponien durch ein endgültiges Oberflächenabdichtungssystem betreibt die MEAB mbH am Standort der Bauschuttdeponie Deetz seit 2003 Versuchsfelder zur „In-Situ-Untersuchung alternativer Oberflächenabdichtungssysteme“. In Ergänzung zu diesen Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der pedo tec GmbH im Rahmen des Forschungsvorhabens "Lysimeteruntersuchungen und Wasserhaushaltsberechnungen zur Kostenreduzierung bei der Herstellung von Rekultivierungsschichten für die Deponiestandorte der MEAB unter Einbeziehung von Sekundärbaustoffen" von Anfang Dezember 2001 bis Ende Dezember 2004 Wasserhaushaltsmessungen an verschiedenen Rekultivierungsschichtaufbauten an der wägbaren Lysimeteranlage in Berlin-Dahlem. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Ziel, quantitative Aussagen zur Drainagewasserbildung zu ermitteln, die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die Dimensionierung der Dränageschicht und das darunter

aus: Melchior, S. & K. Berger, 2005 (Hrsg.) : Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 56 (ISSN: 0724-6382)

liegende Dichtungssystem bei einer unterschiedlichen Zusammensetzung der Rekultivierungsschicht abzuschätzen sowie die Veränderung der Inhaltsstoffe ausgewählter chemischer Parameter in den erfassten Perkolaten zu analysieren. Die Untersuchungen erfolgten vor dem Hintergrund der regional beschränkten Verfügbarkeit von geeigneten Böden nach DepV. Abschließende bodenkundliche/bodenphysikalische Untersuchungen im Rahmen des Rückbaus der untersuchten Materialien liegen derzeit noch nicht vor.

2 Materialauswahl und Aufbauvarianten

Grundlage der Überlegungen zum Einsatz von Sekundärbaustoffen in der Rekultivierungsschicht ist der erhebliche Bedarf an geeigneten, natürlichen Rohstoffen insbesondere in der materialintensiven Rekultivierungsschicht. Dies stellt für die Standorte der MEAB erhebliche Probleme sowie ein hohes Kostenpotential bei der Beschaffung dar.
In Vorbereitung der Maßnahmen zur Sicherung/Sanierung erfolgt am Standort der Bauschuttdeponie (BSD) Deetz bereits seit Jahren die Zwischenlagerung von Böden mit Bauschuttanteilen entsprechend der LAGA-Klassifizierung als Verwertungsmaterial, das hinsichtlich bau- und bodenphysikalischer Eignung für entsprechende Baumaßnahmen zu bewerten ist. Die Ermittlung der Korngrößenverteilung der Materialien (Siebböden nach Siebung) zeigte folgende Ergebnisse:

- Kornverteilung: 5 - 7 % Schluff (Grobschluff)
  75 - 90 % Sand (überwiegend Fein- und Mittelsand)
  14 - 20 % Kies (überwiegend Fein- und Mittelkies)

Es wurde eingeschätzt, dass das Material in der vorliegenden Form aufgrund seines geringen Wasserspeichervermögens die Anforderungen nach Anhang 5 der DepV nur bedingt erfüllen kann. Die chemische Analyse des Materials ergab eine Unterschreitung sämtlicher Parameter für Z 1.1 (Boden) nach LAGA-Merkblatt (M 20) mit Ausnahme des pH-Wertes. Dieser lag mit 9,2 geringfügig über dem zulässigen Toleranzbereich von 6,5 – 9,0 und ist auf partielle Kalk- und Bauschuttreste zurückzuführen.

Aufgrund der Korngrößenzusammensetzung des Ausgangsmaterials und dem geringen Gehalt an organischer Substanz (TOC im Eluat ca. 13 mg/l) sowie minimalem Nährstoffgehalt (Gesamtstickstoff ca. 2 mg/l) wurde daher eine Strukturierung der Rekultivierungsschicht in Ober- und Unterboden vorgenommen und die Verbesserung der Eigenschaften des Oberbodens durch Zumischung geeigneter organischer Bestandteile geprüft. Als Zumischung wurde Klärschlammkompost einer kommunalen Kläranlage im Land Brandenburg gewählt, der die Grenzwerte nach AbfKlärV zur Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen einhält.

Parameter	**Einheit**	**Klärschlamm-analysewerte**	**Grenzwerte nach AbfKlärV** *)
pH-Wert	[-]	6,2	< 5
Leitfähigkeit	[µS/cm]	2.200	-
TOC	[mg/l]	58,9	-
Chlorid	[mg/l]	22	-
Sulfat	[mg/l]	652	-
Gesamtstickstoff	[mg/l]	135	-
PCB	[mg/kg TM]	< 0,02	0,2
PCDD/PCDF	[ng/kg TM]	11,9	100
AOX	[mg/kg TM]	206	500

Cadmium	[mg/kg TM]	1,05	5 [1)]
Chrom	[mg/kg TM]	25,1	900
Kupfer	[mg/kg TM]	7,52	800
Nickel	[mg/kg TM]	22,9	200
Blei	[mg/kg TM]	43,4	900
Zink	[mg/kg TM]	847	2.000 [1)]
Arsen	[mg/kg TM]	0,47	-
Quecksilber	[mg/kg TM]	1,68	8
Gesamtcyanid	[mg/kg TM]	2,6	-
Phosphor, gesamt	[mg/kg TM]	27.538	-
Gesamtstickstoff	[mg/kg TM]	26.253	-

[*)] Grenzwerte für das einmalige Aufbringen auf landwirtschaftlichen Flächen
[1)] abgeminderte Grenzwerte für leichte Böden

TM = Trockenmasse

Tab. 1 Klärschlammqualität in Bezug auf ausgewählte Parameter

Als Unterbodenvergleichsmaterial wurde ein am Standort befindlicher natürlicher Boden aus landwirtschaftlicher Nutzung verwendet. Im Gegensatz zum Siebboden aus Recyclingmaterialien weist dieser folgende Zusammensetzung auf:

- Kornverteilung: 46 % Schluff
  52 % Sand
  2 % Kies

Aus den vorgenannten Materialien kamen folgende 4 Aufbauvarianten einer 1 m starken Rekultivierungsschicht zum Einsatz:

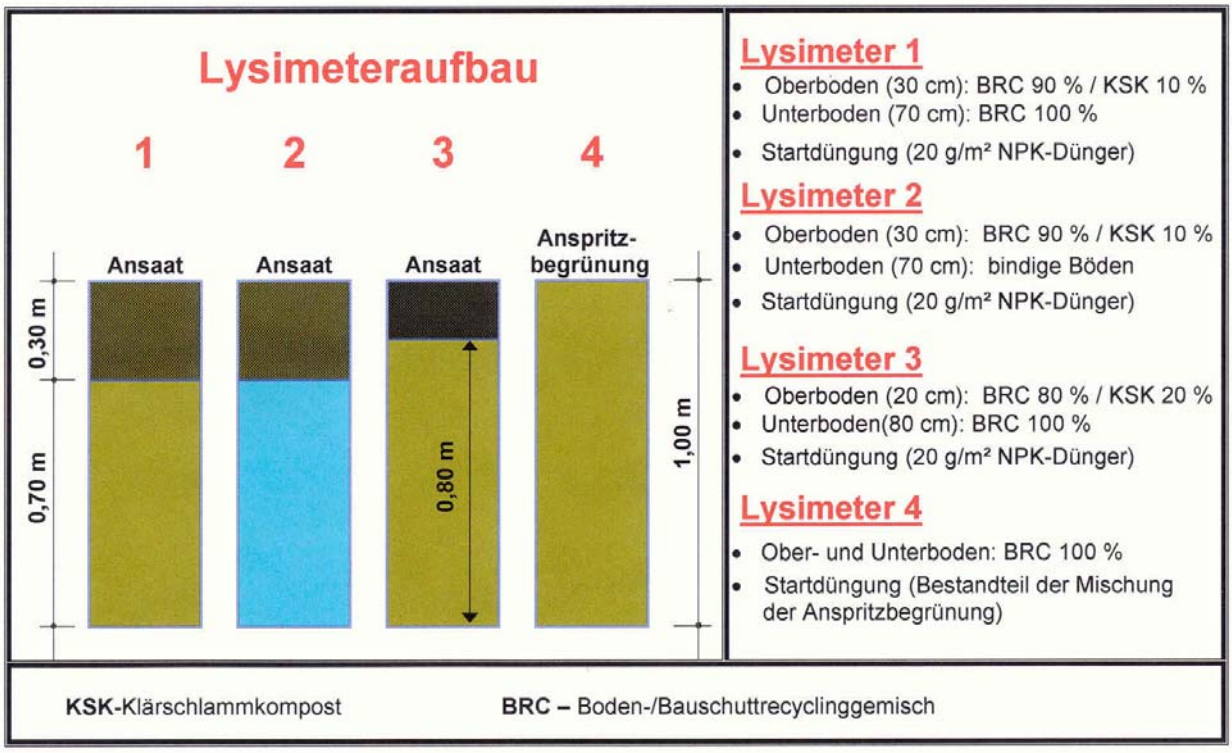

Abb. 1 Aufbauvarianten der Rekultivierungsschichten

Die prozentualen Angaben in Abb. 1 beziehen sich auf die jeweiligen Volumenanteile der Materialien vor der Vermischung. Eine Mengenbegrenzung für Klärschlamm und

Klärschlammkompost nach DepV besteht nur indirekt über die Begrenzung der Schadstoffgehalte der Gemische. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Mischungsverhältnisse im Oberboden der Lysimeter 1 und 3 bei gleichen Unterbodenansätzen gewählt. Dem gegenüber wurde in Lysimeter 2 der Unterboden in Bezug auf das Lysimeter 1 bei gleichem Oberbodenaufbau variiert. Das Lysimeter 4 wurde zu Vergleichzwecken durchgehend mit dem Unterbodenmaterial der Lysimeter 1 und 3 ausgestattet.

Material bzw. Materialgemisch	**nFK in Vol.-%**
Unterboden Lysimeter 1 und 3	10,2 – 12,2
Oberboden Lysimeter 1 und 2	11,4 – 12,2
Oberboden Lysimeter 3	15,6
Unterboden Lysimeter 2	7,1 *)
Siebboden Lysimeter 4	8,5 – 9,3

*) aus bodenkundlicher Sicht zu geringer Wert

Tab. 2 Nutzbare Feldkapazität der eingebauten Materialien

Der für den Unterboden des Lysimeters 2 ermittelte, aus bodenkundlicher Sicht zu geringe Wert für die nutzbare Feldkapazität ist auf die vorhandene Bodenstruktur mit stark verdichteten Konglomeraten zurückzuführen. Dies wird durch die Lagerungsdichte (im eingebauten Zustand) von 1,7 g/cm³ bestätigt. Die Rasenansaat der Lysimeter 1 – 3 bestand aus einer konventionellen Begrünungsmischung. Um ein Auflaufen der Vegetation auf dem Lysimeter 4 zu sichern, kam statt einer Rasenansaat eine Anspritzbegrünung zum Einsatz.

Nach dem 1. Versuchsjahr erfolgte eine Konzeptänderung. Es wurde der Siebboden des Lysimeters 4 ausgebaut und nach Zumischung von 8 kg kleingehäckselter „ROFA-Platten“ wieder eingebaut. Die als Zumischung zum Einsatz kommenden ROFA-Platten des Instituts für Getreideverarbeitung GmbH in Rehbrücke bestehen aus Roggen, Fasern und Kiefernholz. Sie werden derzeit als Vegetationshilfe und Bodenhilfsstoff zur Vermeidung von Bodenerosion im Hochgebirge und Tagebau eingesetzt. Als Folge der Zumischung wurde eine Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität von im Mittel 8,9 Vol.-% auf 17,5 Vol.-% im Labor ermittelt.

Abb. 2 „ROFA-Platte“

Abb. 3 ROFA gehäckselt

Nachfolgend sind die Nähr- und Schadstoffgehalte der in den Aufbauvarianten zum Einsatz gelangten Materialien sowie Materialgemische dargestellt.

Parameter	Einheit	Grenzwerte Reku. n. DepV 7/02	Grenzwerte Boden n. LAGA (Z 1.1)	Lys. 1, 2 Oberboden	Lys. 3 Oberboden	Lys. 1, 3 Unterboden Lys. 4	Lys. 2 Unterboden	Lys. 4 (neu)
pH-Wert	[-]	6,5 - 9,0	6,5 - 9,0	9,3	8,5	9,2	8,8	7,6
Leitfähigkeit	[µS/cm]	500	500	311	622	169	71	260
TOC	[mg/l]			13,7	20,8	13	< 5,0	41,3
Chlorid	[mg/l]	10	10	< 7	< 7	< 7	< 7	< 7
Sulfat	[mg/l]	50	50	75	152	43	25	< 20
Gesamt-P	[mg/l]		3 *)	1,56	1,71	1,4	1,66	0,44
N-gesamt	[mg/l]			8,83	27,2	2,1	2,08	2,6
Nitrat	[mg/l]		40 *)	30,4	87,6	4,21	1,76	< 0,04
Calzium	[mg/l]			47,7	85,6	25,5	42,8	46
Magnesium	[mg/l]			0,893	4,37	0,584	30,3	1,4
Kalium	[mg/l]			7,07	9,88	6,07	29,1	3,44
Cadmium	[mg/l]	0,002	0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chrom	[mg/l]	0,03	0,03	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,124	< 0,005
Kupfer	[mg/l]	0,05	0,05	0,019	0,028	0,009	0,075	0,012
Eisen	[mg/l]			0,116	0,081	0,093	92,1	0,351
Nickel	[mg/l]	0,05	0,05	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,067	< 0,005
Blei	[mg/l]	0,04	0,04	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,016	< 0,01
Zink	[mg/l]	0,1	0,1	< 0,025	< 0,025	< 0,025	0,221	< 0,025
Arsen	[µg/l]	10	10	5,1	3,1	6	18,9	5,9
Quecksilber	[µg/l]	0,2	0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Phenol gesamt	[mg/l]		0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Gesamtcyanid	[mg/l]		0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Glühverlust	[%]			2,3	8,3	1,5	1,6	2,1
EOX	[mg/kg]		3	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
PCB	[mg/kg]	0,1		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Kohlenwasserstoffe	[mg/kg]		300	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Summe PAK (TS)	[mg/kg]	5	5	6,1	2,3	4,3	< 0,5	5
Cadmium	[mg/kg]	1	1	0,122	< 0,1	0,122	0,105	0,135
Chrom	[mg/kg]	120	100	5,33	10	8,9	15,7	7,15
Kupfer	[mg/kg]	80	100	13,1	68	6,21	11,2	12,4
Nickel	[mg/kg]	100	100	3,99	11,3	6,21	11,3	4,56
Blei	[mg/kg]	140	200	46,7	77,1	62,2	8,31	107
Zink	[mg/kg]	300	300	51,6	139	73,9	28,9	77,8
Arsen	[mg/kg]		30	1,61	1,82	1,56	2,02	5,21
Quecksilber	[mg/kg]	1	1	0,097	0,046	0,469	0,225	0,155
Gesamtyanid	[mg/kg]		10	< 0,10	0,37	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Gesamt-N	[mg/kg]			280,9	847,6	267,3	218,6	200
Phosphor	[mg/kg]			561	2.163	182	1.084	200
Calzium	[mg/kg]			9.200	8.500	8.290	9.930	16.300
Magnesium	[mg/kg]			1.310	1.730	945	3.250	1.100
Kalium	[mg/kg]			512	771	467	2.220	453

*) ergänzende Grenzwerte des MLUR Brandenburg

k. A. - keine Angaben (Parameter wurde nicht untersucht)

keine Grenzwerte

Überschreitung der Grenzwerte nach DepV

Tab. 3 Nährstoff- und Schadstoffgehalte der eingesetzten Materialien und Gemische

3 Lysimeteranlage Berlin-Dahlem und Messbetrieb

Die Messungen des Wasserhaushalts (Niederschlag, Verdunstung, Änderung der Bodenfeuchte und Versickerung des Niederschlagswassers aus der Rekultivierungsschicht) erfolgten an wägbaren Lysimetern der Lysimeteranlage des Fachgebiets Wasserhaushalt und Kulturtechnik der TU Berlin.

Die Lysimeter sind in der Regel zylindrische Gefäße (standardmäßig 1 m² groß und 1,50 m tief), die mit Boden gefüllt sind. Zur Messung des Bodenwasserhaushalts unter

natürlichen Witterungsbedingungen sind sie im Gelände so eingebaut, dass die Lysimeteroberfläche der umgebenden Geländeoberfläche entspricht.

Abb. 4
Lysimeteranlage Berlin-Dahlem (Lysimeteroberfläche)

Das kontinuierlich registrierende Wägesystem eines Lysimeters besteht aus einer Kombination von einer stationären Brückenwaage und einer Laborwaage. Letztere ist mit einer seriellen Schnittstelle ausgerüstet und an einen Datenlogger angeschlossen, so dass eine kontinuierliche Registrierung auf der Basis von 15-Minuten-Intervallen mit einer Auflösung von 100 g (= 0,1 mm Niederschlag bei Oberfläche des Lysimeters von 1 m²) vorhanden ist.

Es erfolgt eine tägliche Ablesung der Lysimetergewichte für die Ermittlung von Tagessummenwerten der Versickerung, der aktuellen Verdunstung und der Änderung der Bodenfeuchte. Für ausgewählte Ereignisse (z.B. Starkniederschläge und/oder hohe Versickerung) stehen die Ergebnisse auch als 15-Minuten-Werte zur Verfügung.
Unter dem Lysimeter befindet sich eine zweite Waage, die zur kontinuierlichen Messung der Versickerung (Perkolat) des Niederschlagswassers aus dem Lysimeter dient. Durch die gleichzeitige Messung des Niederschlags, des Lysimetergewichts und der Versickerung werden somit alle Wasserhaushaltskomponenten gemessen, die für eine vollständige Bilanzierung notwendig sind.

Die kontinuierliche Erfassung der Klimaparameter erfolgt sowohl manuell (Niederschlagssammler) als auch mit automatisch registrierenden Aufnahmegeräten in derselben zeitlichen Auflösung wie die der Lysimeterdaten. Die Wetterstation befindet sich direkt neben der Lysimeterstation. Die Parameter: Niederschlag am Boden und in 1 m Höhe, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit in 1 und 2 m Höhe werden in 15-Minuten-Intervallen gemessen.

4 Einbau und Versuchsdurchführung

Die Befüllung der Lysimeter erfolgte manuell im Zeitraum Oktober bis November 2001. Oberhalb der Lysimetersohle ist in einer Schichtdicke von 50 cm der Dränkies (Körnung 4/8 mm) eingebaut worden, der von einem Vlies bedeckt ist. Die Gesamtschichtdicke der Rekultivierungsschicht beträgt in den Lysimetern einheitlich 1,0 m. Nach dem Ein-

bau der Unterbodenschichten in Lagen zwischen 25 bis 30 cm und den Probenahmen für die bodenkundlichen und bodenchemischen Untersuchungen erfolgte einlagig der Einbau des per Hand vorgemischten Oberbodens. Die Auffüllung der Rekultivierungsschicht erfolgte bis 3-4 cm unter Lysimeteroberkante (nicht niveaugleich), um einen möglichen Oberflächenabfluss von den Lysimetern bei Starkregen auszuschließen.

Die Begrünung der Lysimeter erfolgte im Frühjahr 2002 durch Grasansaat auf den Lysimetern 1 – 3 und Anspritzbegrünung auf dem Lysimeter 4. Die Ansaatmenge betrug 25 g/m² einer konventionellen Begrünungsmischung. Ergänzend erfolgte eine Startdüngung mit 30 g/m² NPK-Mineraldünger. Auf den Lysimetern 1 – 3 konnte nach ca. 10 – 14 Tagen das Auflaufen des Grasbewuchses festgestellt werden. Im gesamten Versuchszeitraum wurde die Grasvegetation regelmäßig gemäht und die Schnittgutmengen erfasst.

Auf dem Lysimeter 4 konnte sich erst ab 7/2002 allmählich eine Grasvegetation etablieren. Im Gegensatz zu den anderen Lysimetern ist nach 11 Monaten nur ein maximaler Bedeckungsgrad von 70 % erreicht worden. Aufgrund dieser Probleme erfolgte am 29.10.02 ein Umbau des Lysimeters 4. Dazu wurden die oberen 5 cm des Bodens zusammen mit der Grasvegetation abgeschält und nach dem Neueinbau des Lysimeters wieder als Rasensoden an der Oberfläche verlegt. Der im Lysimeter verbliebene Rekultivierungsboden (Siebboden) wurde komplett ausgebaut und zur Erhöhung des Gehaltes an organischen Bestandteilen mit gehäckseltem „ROFA-Material“ vermischt. Danach wurde das so aufbereitete Rekultivierungsmaterial wieder lagenweise eingebaut.
Aufgrund erheblicher Vegetationsschädigungen im Zeitraum April 2003 – Mai 2003 erfolgte auf Lysimeter 4 eine Nachsaat und einmalige Düngung mit 30 g/m² NPK-Mineraldünger, verbunden mit einer künstlichen Bewässerung in Höhe von 9,5 mm/m². Nach 2 Wochen war ein deutlich stärker ausgeprägter Bewuchs vorhanden. Die Lysimeter 1 - 3 wurden am 6.7.03 ebenfalls mit 9,4 – 9,6 mm/m² künstlicher Zusatzbewässerung beaufschlagt.

In zeitlicher Abhängigkeit vom Drainagewasseranfall erfolgten im Untersuchungszeitraum Beprobungen des Perkolats zur Bestimmung der Gehalte ausgewählter chemischer Inhaltsstoffe.

5 Ergebnisse des Versuchszeitraums 12/2001 – 12/2004

Im Folgenden werden wesentliche Ergebnisse des 3 jährigen Versuchsvorhabens dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf den bisher vorliegenden Daten des Gesamtzeitraumes sowie den Zwischenberichten der Versuchsjahre 2002 und 2003.

5.1 Witterung im Versuchszeitraum

Der Standort Berlin sowie wesentliche Teile des Landes Brandenburg sind geprägt durch günstige klimatische Bedingungen und insbesondere geringe jährliche Niederschlagsmengen von < 650 mm/a. Das langjährige Niederschlagsmittel für den Standort der Lysimeteranlage in Berlin-Dahlem beträgt 597,3 mm/a.

Der Versuchszeitraum war geprägt von z.T. sehr extremen Witterungsverhältnissen. Im Vergleich mit den langjährigen Niederschlagsmittel lag das Versuchsjahr 2002 mit Niederschlägen > 800 mm/a ca. 47 % über und das Versuchsjahr 2003 mit Niederschlägen

unter 460 mm/a ca. 23 % unter dem langjährigen Mittel. Das Versuchsjahr 2004 entspricht mit Niederschlägen über 570 mm in etwa dem langjährigen Mittelwert.

Jahr	Lysimeter 1		Lysimeter 2		Lysimeter 3		Lysimeter 4/4N	
	N_{0m} [mm]	ETA_{0m} [mm]	N_{0m} [mm]	ETA_{0m} [mm]	N_{0m} [mm]	ETA_{0m} [mm]	N_{0m} [mm]	ETA_{0m} [mm]
12/2001	70,1	6,9	60,1	8,3	60,1	9,4	60,1	7,9
2002	880,2	547,6	882,1	581,3	883,5	567,9	877,4	456,5
2003	468,0	414,0	467,8	405,6	467,9	431,4	467,9	460,1
2004	571,1	409,9	571,1	430,0	574,1	474,7	574,1	352,1
Gesamt	**1.989,4**	**1.378,4**	**1.981,1**	**1.425,2**	**1.985,6**	**1.483,2**	**1.979,5**	**1.276,6**
Anteil in %		**92,9**		**96,1**		**100**		**86,1**

N_{0m} – Niederschlag auf Bodenhöhe **ETA_{0m}** – Verdunstung von der Vegetationsebene

Tab. 4 jährliche Niederschlags- und Verdunstungssummen im Versuchszeitraum

Die zwischen den Lysimetern geringfügig differierenden Niederschlagsmengen basieren auf partiellen Schneeverwehungen im Winter, unterschiedlichen Gewichtszunahmen der Lysimeter bei Starkniederschlagsereignissen bzw. Differenzen der Aufgabemengen bei der künstlichen Zusatzbewässerung. Die überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen für das Jahr 2002 basieren auf extrem hohen Monatsummen im August (ca. 250 mm) und Oktober (106 mm). Im gesamten Versuchszeitraum wurde nur für den Juli 2004 noch einmal ein Summenwert von > 100 mm ermittelt.
Die Evapotranspiration von der Lysimeteroberfläche wird im Wesentlichen durch die Vegetationsentwicklung beeinflusst. Ausgehend von gleichen Ausgangsbedingungen bei der Ansaat schlagen sich die unterschiedlichen Bodeneigenschaften in Bezug auf das Wasseraufnahme- und -haltevermögen der Rekultivierungsschicht und die Nährstoffversorgung in der jeweiligen monatlichen Transpirationsleistung wieder.

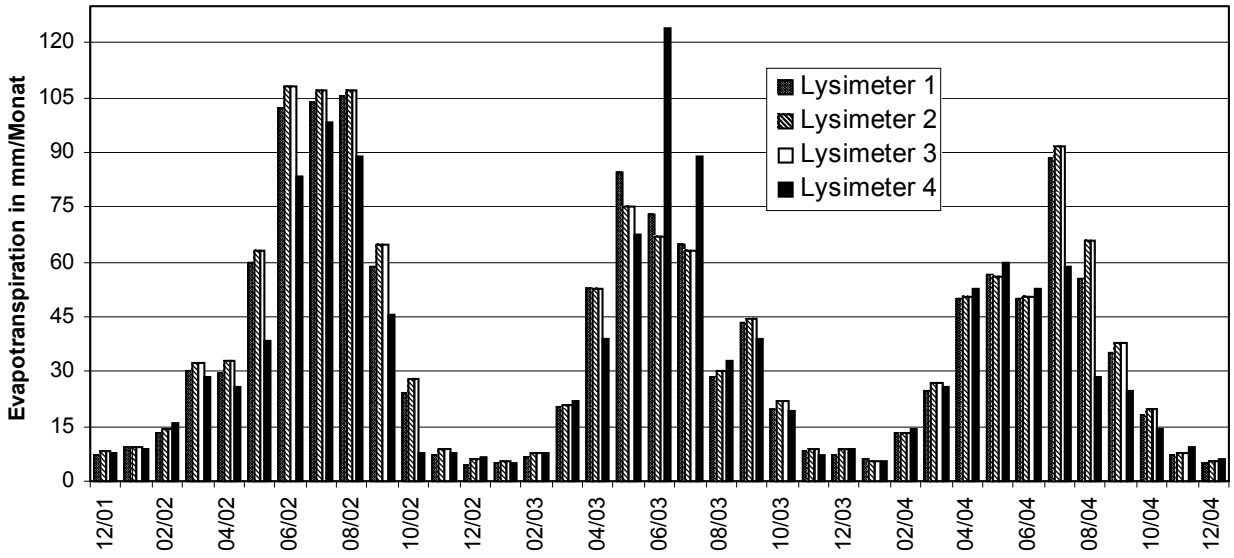

Abb. 5 Monatssummen der Evapotranspiration im Versuchszeitraum

In den Lysimetern 1 – 3 mit Klärschlammkompost im Oberboden sind nur geringfügige Differenzen zwischen den einzelnen Monatssummen der Evapotranspiration während des Versuchszeitraumes zu erkennen. Der Vergleich der Lysimeter untereinander ergibt, dass das Lysimeter 3 mit dem höchsten Klärschlammanteil auch die höchste Evapotranspiration aufweist. Die Werte für das Lysimeter 1 und das Lysimeter 2 liegen nur wenig unter den Werten des Lysimeters 3. Eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Klärschlammanteil und der Evapotranspiration insgesamt bestätigt sich nicht. Wesentliche Voraussetzung für den Bestand und Erhalt der Grasvegetation ist eine ausreichende Verfügbarkeit von Nährstoffen und eines Bodenwasserspeicherpotentials, das auch über längere Trockenperioden die Nutzung durch Pflanzenwurzeln sicherstellt.
Für das Lysimeter 4 ist im 1. Versuchsjahr eine erheblich geringere Evapotranspiration ermittelt worden. Diese basiert nicht nur auf Problemen zu Beginn der Vegetationsentwicklung sondern erreichte nur max. 80 % der Leistung des Lysimeters 3. Nach dem Umbau des Lysimeters 4 sind trotz erheblicher Erhöhung der Feldkapazität in der gesamten Schichtstärke und ausreichender Bodenfeuchte in der Startphase der Vegetationsentwicklung ähnlich geringe Werte für die Evapotranspiration wie im Jahr 2002 registriert worden. Nach der im Mai 2003 erfolgten Nachsaat und Düngung wurde eine starke Vegetationsentwicklung und eine zeitweilig erheblich höhere Transpirationsleistung für die Monate Juni und Juli 2003 mit Rückgang auf vergleichbare Werte der Lysimeter 1 – 3 im August 2003 registriert. Im Monat Juli 2004 wurden auf dem Lysimeter 4 im Gegensatz zu den Lysimetern 1 – 3 erneut deutliche Trockenschäden festgestellt.

5.2 Versickerung aus den Rekultivierungsschichten

Wesentlicher Parameter der Wirksamkeit einer Rekultivierungsschicht oberhalb eines Deponieabdichtungssystems ist die Versickerung in die darunter liegende Entwässerungsschicht. Über den Untersuchungszeitraum von 37 Monaten ergibt sich nachfolgende Differenzierung des Abflussverhaltens der Lysimeteraufbauvarianten. Dabei liegen die Abflüsse des Lysimeters 3 mit insgesamt 578 mm nur geringfügig unter den Werten des Lysimeters 2 (592 mm). Die Lysimeter 1 mit 675 mm und Lysimeter 4 mit 742 mm zeigen demgegenüber deutlich höhere Abflusswerte. Die prozentualen Abflussraten aus der Rekultivierungsschicht betragen zwischen 29,1 % (Lysimeter 3) und 37,5 % (Lysimeter 4) bezogen auf den Gesamtniederschlag im Untersuchungszeitraum in Höhe von 1.980 – 1.989 mm.

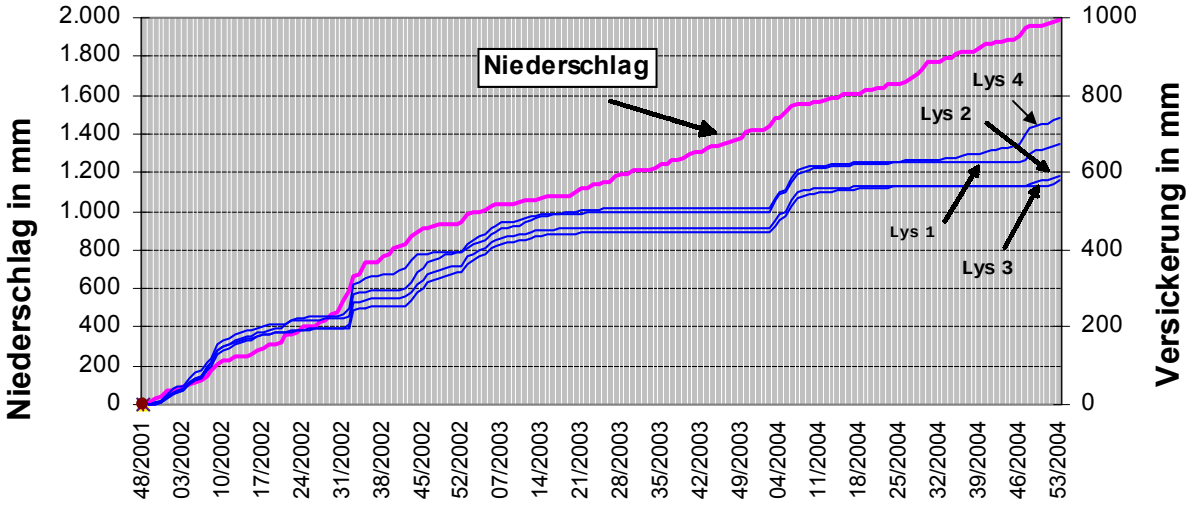

Abb. 6 Versickerung aus der Rekultivierungsschicht (Basis: Wochensummen)

Ein differenziertes Abflussverhalten der Rekultivierungsschichten erhält man im Rahmen von Detailuntersuchungen. Außergewöhnlich hohe Niederschlagsmengen im August 2002 mit ca. 250 mm führten bei allen Lysimetern nach Überschreitung des Wasserspeichervermögens der Böden zu extremen Versickerungsraten von bis zu 22 mm/d am 12.08. bzw. 13.08.02. Dabei zeigten sich beim Zeitpunkt und der Höhe der Maximalwerte kaum Unterschiede zwischen den Lysimetern. Jedoch ist bei den Lysimetern 1, 3 und 4 bereits nach dem Niederschlagsereignis vom 07.08.02 eine Abflussspitze erkennbar, die jedoch in ihrer Höhe sehr unterschiedlich ausfällt. Das Lysimeter 4 ohne Oberbodenverbesserung weist mit 10 mm im Vergleich mit den Lysimetern 1 (2,8 mm) und 3 (3,8 mm) einen wesentlich höheren Abfluss auf. Ein ähnliches Verhalten ist erneut Ende August 2002 zu erkennen. Dem gegenüber zeigt das Lysimeter 2 auf das Niederschlagsereignis vom 07.08.02 keine Reaktion. Dieses abweichende Verhalten des Lysimeters 2 gegenüber den Lysimetern 1 und 3 wurde jedoch nur in diesem einen Fall registriert.

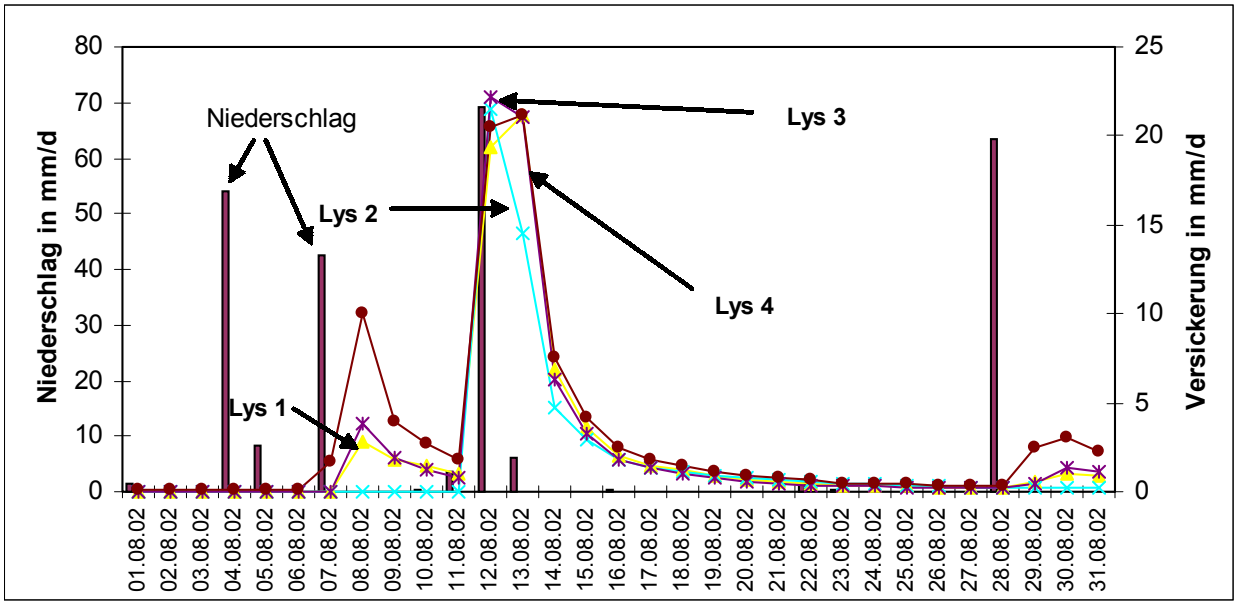

Abb. 7 Detailvergleich der Versickerung Lysimeter 1 – 4 (August 2002)

Nach Abschluss der Vegetationsperiode 2004 kann für den Monat November 2004 das zeitlich differenzierte Einsetzen der Versickerung auf den einzelnen Lysimetern (nach Auffüllen des Bodenwasserspeichers) beobachtet werden.

Während das Lysimeter 4 Anfang November bereits Abflüsse von < 1 mm/d aufweist und diese nach weiteren Niederschlagsereignissen stetig ansteigen, treten bis zum 18.11.04 in den anderen Lysimetern keine Abflüsse auf. Erst danach werden beginnend ab 19.11.04 zuerst Abflüsse aus Lysimeter 1 und ab 25.11.04 aus Lysimeter 2 registriert. Die Höhe der Abflüsse ist gegenüber den Niederschlagsereignissen gedämpft und die „Spitzen“ sind zeitlich um 2 – 3 Tage versetzt. Die Abflüsse aus Lysimeter 3 setzen erst ab 20.12.2004 ein.

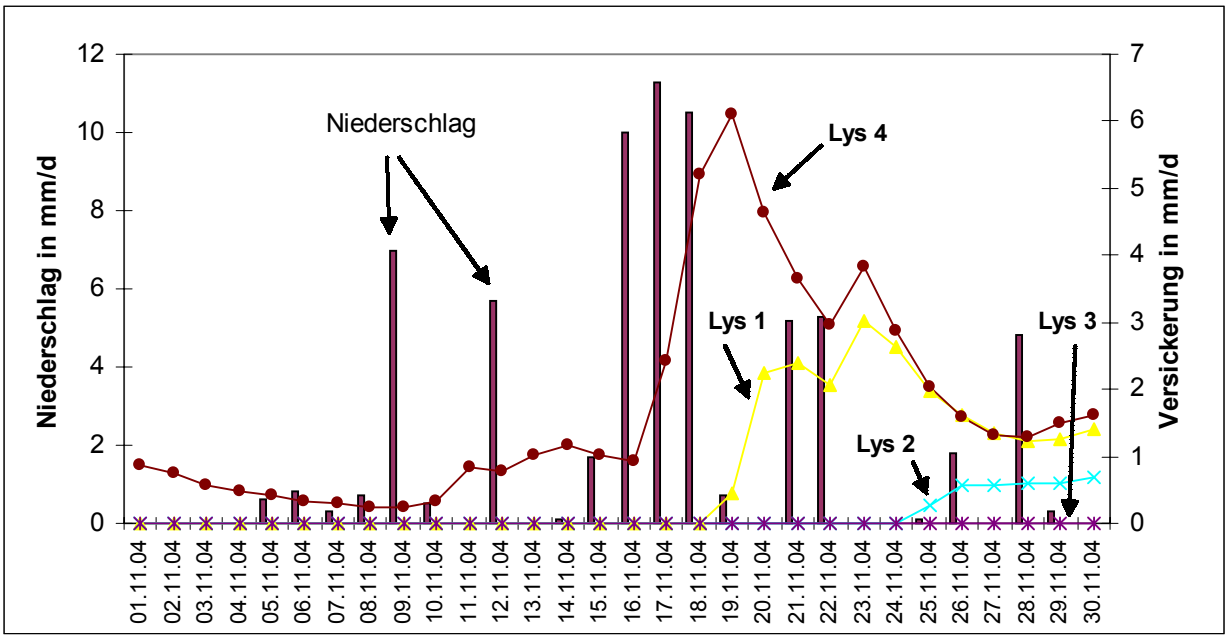

Abb. 8 Detailvergleich der Versickerung Lysimeter 1 – 4 (November 2004)

Die Ergebnisse des Lysimeters 3 zeigen, dass ein aus Sekundärbaustoffen und geeigneten organischen Komponenten aufgebaute Rekultivierungsschicht in Bezug auf die Minimierung der Versickerung gleiche bzw. sogar bessere Ergebnisse im Vergleich mit natürlichen Böden erzielen kann. Dies betrifft sowohl die Gesamtversickerung als auch die Höhe der Spitzenabflüsse. Wesentlicher Aspekt der Aufbereitung von Sekundärbaustoffen besteht dabei nicht so sehr in der kurzfristigen Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität, sondern in der Einstellung einer ausgewogenen Balance aus Speichervermögen und Nährstoffangebot.

5.3 Drainagewasserinhaltsstoffe (Perkolatuntersuchungen)

Ziel der regelmäßigen chemischen Analyse des Drainagewassers (Perkolatuntersuchungen) war, die aus dem Einsatz unterschiedlicher Reststoffe resultierende Schadstoffbelastung sowie Entwicklung der Nährstoffauswaschung zu dokumentieren und Aussagen hinsichtlich der Einleitbedingungen in den Vorfluter (Direkteinleitung) zu erhalten. Der Untersuchungsumfang und die Probenahme erfolgt in Abhängigkeit vom Perkolatanfall und den bereits vorliegenden Ergebnissen. Als Vergleichswerte wurden die Grenzwerte des Anhangs 51 der AbwVV herangezogen. Des Weiteren erfolgte ein Vergleich der Eluatwerte des eingesetzten Materials bzw. der Materialgemische.

5.3.1 Allgemeines

Im Vergleich mit den Eluatwerten des Recyclingmaterials (Siebboden), die einen sehr hohen pH-Wert mit 9,2 aufwiesen, sind in allen Perkolatuntersuchungen unabhängig vom Aufbau der Rekultivierungsschichten unkritische pH-Werte > 7,0 und < 8,3 ermittelt worden.
Unterhalb der Nachweisgrenze bzw. geringfügig darüber liegt die Belastung mit Schwermetallen und die Konzentration in Bezug auf die Parameter: Gesamtcyanid, PAK, Sulfid, AOX und MKW. In Bezug auf den Parameter CSB wurden in den Lysimetern 1, 3 und 4 relativ konstante Werte zwischen 90 und 140 mg/l ermittelt. Für das Lysimeter 2 liegen die Konzentrationen bei < 15 – 30 mg/l. Der Grenzwert nach Anhang 51 AbwVV liegt bei 300 mg/l.

Als kritisch in Bezug auf die zum Einsatz gelangten Materialien sind die Parameter: Chlorid, Sulfat, Leitfähigkeit und Gesamtstickstoff zu bewerten. Dabei spielen sowohl die hohen Gesamtgehalte der Ausgangsstoffe als auch die Löslichkeit der Stoffe eine Rolle. Insbesondere für die Parameter Chlorid und Sulfat sei auf die erheblich abweichenden Analyseergebnisse der Eluat- und der laufenden Perkolatuntersuchungen hingewiesen.

Parameter	**Eluatuntersuchungen**		**Perkolatuntersuchungen**			
	Oberboden	Unterboden	Lys. 1	Lys. 2	Lys. 3	Lys. 4
Chlorid	**< 7**	**< 7**	**< 7 - 120**	**< 7 - 69**	**< 7 - 139**	**< 7 - 129**
Sulfat	**75 - 152**	**< 20 - 43**	**858 - 2.285**	**27 - 1674**	**1188 - 2415**	**489 - 2630**

Angaben in mg/l

Tab. 5 Untersuchungsergebnisse ausgewählter Parameter

Die in der Tabelle 5 dokumentierten Schwankungsbreiten der Sulfatkonzentrationen der Perkolate über den Untersuchungszeitraum zeigen eine anhaltend hohe Konzentration in allen Lysimetern. Dabei wurden die Maximalwerte zwischen August und Oktober 2002 gemessen. Zum Ende des Untersuchungszeitraumes stabilisierten sich die Werte auf hohem Niveau (L 1: 1.200 mg/l, L 2: 500 mg/l, L 3: 1.800 mg/l und L 4: 1.100 mg/l). Für die Parameter Sulfat und Chlorid gibt es keine Grenzwerte im Anhang 51 der AbwVV. Sie werden auch nicht indirekt über den Parameter Leitfähigkeit begrenzt.

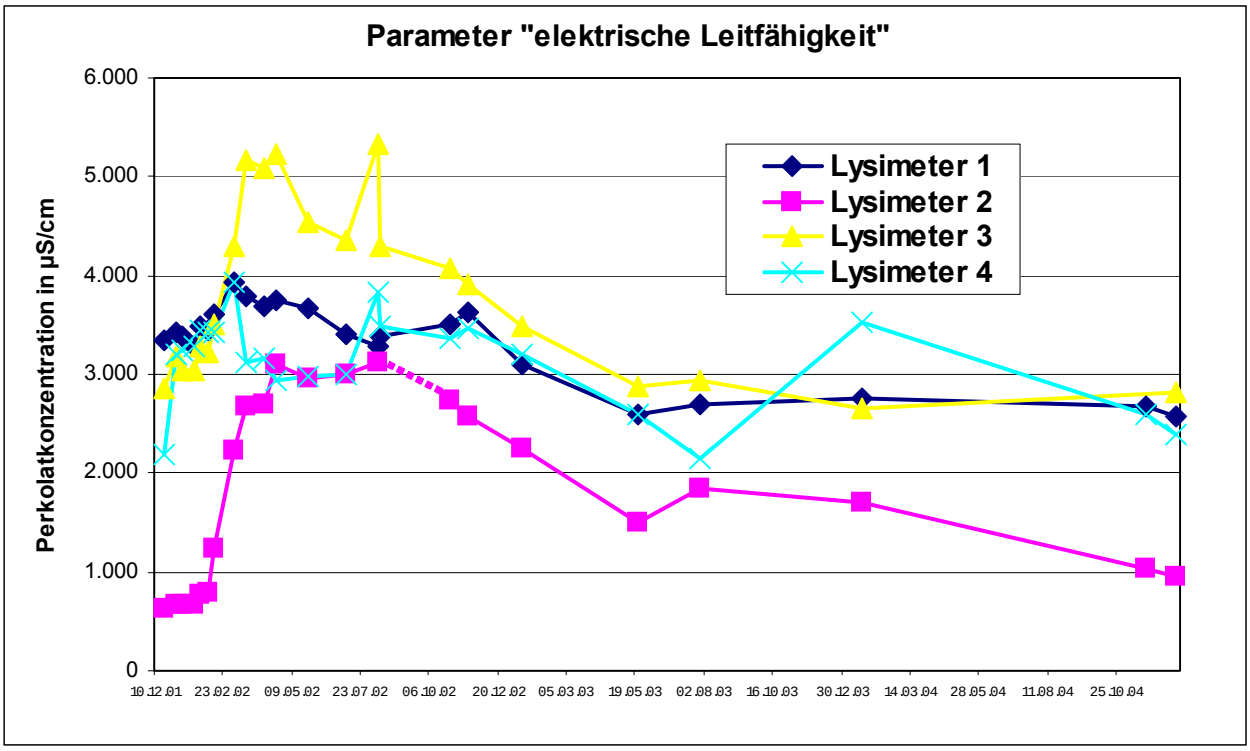

Abb. 9 zeitliche Entwicklung des Parameters elektrische Leitfähigkeit

In Bezug auf die zeitliche Entwicklung der Leitfähigkeitswerte aus den Perkolatuntersuchungen sind ab Mitte 2003 stabil Werte von ca. 2.500 – 2.700 µS/cm für die Lysimeter 1, 3 und 4 zu erkennen. Die Werte des Lysimeters 4 zeigen jedoch nach der Düngung

noch mal eine kurzzeitige Zunahme auf. Das Lysimeter 2 zeigt eine fallende Tendenz seit Mitte 2003 von 1.800 µS/cm auf ca. 1.000 µS/cm. Insgesamt sei bei diesen zum Untersuchungsende sehr hohen Werten noch einmal auf den Grenzwert der Tabelle des Anhangs 5 der DepV (500 µS/cm) verwiesen.

Für die Gesamtstickstoffgehalte im Perkolat wurde eine Korrelation der Konzentration mit den aufgebrachten Anteilen organischer Substanz im Oberboden unter Berücksichtigung der Startdüngung erwartet. Die zeitliche Entwicklung der Gesamtstickstoffgehalte zeigt ein sehr differenziertes Bild:

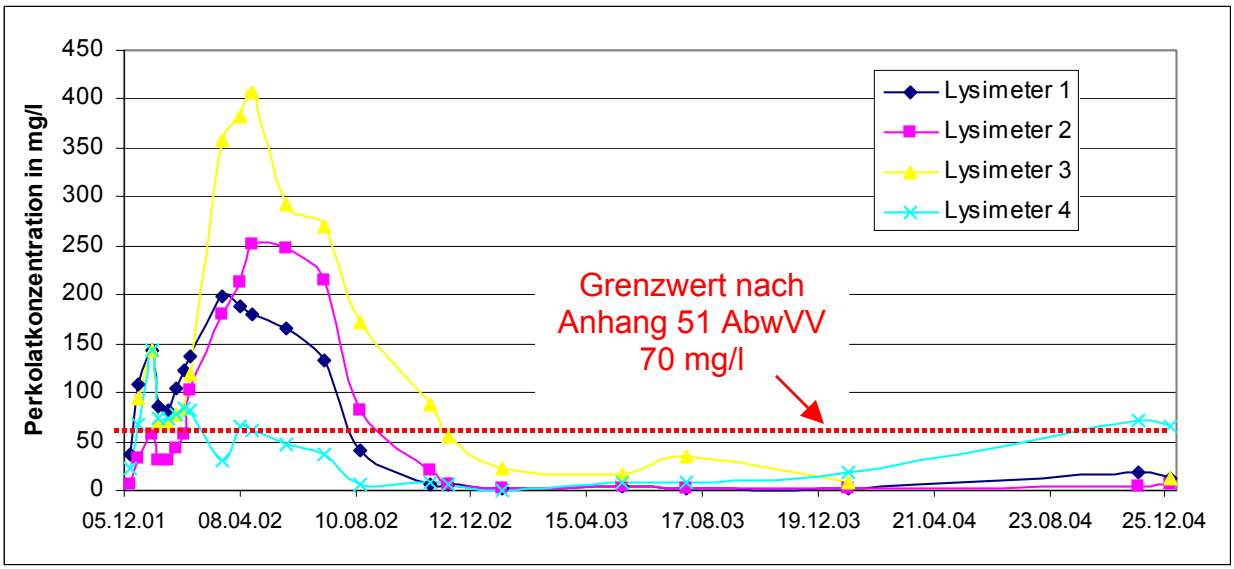

Abb. 10 zeitliche Entwicklung des Parameters Gesamtstickstoff

Insbesondere die Maxima der Gesamtstickstoffgehalte der Lysimeter 1 - 3 widerspiegeln die Auftragsmengen an Klärschlammkompost auf den jeweiligen Lysimetern unabhängig von der Zusammensetzung des Unterbodens. Die Maxima fallen in eine Zeit zurückgehender Abflussmengen und noch nicht ausgeprägter Vegetation. Sie liegen deutlich über dem Grenzwert für die Direkteinleitung in den Vorfluter. Mit Ausprägung einer flächendeckenden Vegetation gehen die hohen Spitzenkonzentrationen zurück und fallen bei den Lysimetern 1 und 2 nach einem Dreivierteljahr und bei Lysimeter 3 nach ca. 1 Jahr unter den Grenzwert von 70 mg/l. Im weiteren Verlauf bleiben die Werte für alle 3 Lysimeter dauerhaft unterhalb des Grenzwertes.
Wie in den Werten für Lysimeter 4 zu erkennen ist, basieren die Gesamtstickstoffgehalte nicht ausschließlich auf der Klärschlammzumischung. Die Startdüngung mit NPK-Mineraldünger führt auch im Lysimeter 4 in der Startphase zu Werten bis 144 mg/l und damit zu einer Überschreitung des Grenzwertes. Ein langfristiger Anstieg des Gesamtstickstoffgehaltes ist erneut im Ergebnis der Zwischendüngung Mai 2003 zu erkennen. Zum Ende des Untersuchungszeitraumes wurde für das Lysimeter 4 erneut eine geringfügige Überschreitung des Grenzwertes festgestellt.

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass der Einsatz der von der MEAB mbH gewählten Recyclingbaustoffe (Siebböden) und des Klärschlammkompostes als Bestandteil des Rekultivierungsschichtmaterials keine Erhöhung einer Schadstoffperkolation in das Drainagewasser gegenüber natürlichen Böden aufweist. Demgegenüber ist die Sulfatbelastung langfristig stark erhöht. Der Einsatz von Klärschlammkompost im Oberbo-

den führt nur in der Anfangsphase vor der Ausbildung einer vollflächigen Vegetation zu einer erhöhten Gesamtstickstoffbelastung des Drainagewassers, der unabhängig von der Art des Unterbodens direkt mit der aufgebrachten Klärschlammmenge korreliert. Dem gegenüber führt die regelmäßige Zuführung von stickstoffhaltigem Mineraldünger zur Sicherstellung einer ausreichenden Nährstoffversorgung der Vegetation zu zeitweilig erhöhten Gesamtstickstoffkonzentrationen im Drainagewasser.

5.4 Übertragbarkeit der Lysimeterergebnisse auf Felduntersuchungen

Parallel zu den Lysimeteruntersuchungen werden durch die MEAB mbH am Standort der Bauschuttdeponie Deetz Felduntersuchungen für alternative Oberflächenabdichtungssysteme durchgeführt. Oberhalb der dort installierten technischen Dichtungen der Felder 3 – 8 wurde eine Rekultivierungsschicht entsprechend der Aufbauvariante des Lysimeters 1 aufgebaut. Die Felder haben eine Größe von jeweils ca. 250 m² und wurden auf der Ostböschung der Deponie (Hangneigung 1 : 6,7) errichtet. Im Rahmen der Felduntersuchungen werden seit 1.1.2003 neben den meteorologischen Daten und Abflüssen in der Auffangdrainage unterhalb der Dichtungen auch die Abflüsse aus den Entwässerungsschichten erfasst.

Für die weiteren Betrachtungen werden die Ergebnisse der Felder 3 – 6 (4 Felder) herangezogen, da auf den Feldern 7 und 8 Kapillarsperrensysteme eingebaut wurden, die in den Abflüssen der Kapillarschicht ein gegenüber den Entwässerungsschichten der Felder 3 – 6 abweichendes Abflussverhalten zeigen.

5.4.1 Niederschlagsdaten

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	**Jahr**
Lys 2003	74,1	8,1	26,2	22,3	33,5	40,6	55,9	30,4	35,7	56,9	38,9	45,4	**468**
VF 2003	59,2	10,6	24,0	28,4	39,6	47,6	37,2	27,7	37,4	46,3	34,3	50,6	**443**
Lys 2004	77,4	60,8	26,7	27,0	29,6	27,0	106,7	53,4	35,4	25,9	67,4	33,8	**571**
VF 2004	80,8	50,1	24,9	28,4	35,5	40,2	102,2	57,5	26,0	26,4	67,0	25,0	**564**

Tab. 6 Niederschlagssummen am Boden (Vergleich Lysimeter und Versuchsfelder)

Die langjährigen Jahresniederschlagssummenwerte betragen für Berlin-Dahlem 597 mm und den Standort Deetz 554 mm. Die erfassten Niederschlagsdaten aus 2003 und 2004 der Lysimeteranlage in Berlin-Dahlem liegen geringfügig unter den Werten des Standortes Deetz. Die Werte für 2003 entsprechen einem trockenen Jahr (ca. 20 - 22 % geringere Niederschlagsmengen als im langjährigen Durchschnitt). Das Jahr 2004 kann mit Werten um das langjährige Mittel als Referenzjahr betrachtet werden.

5.4.2 Ergebnisse der Perkolatuntersuchungen

Entsprechend einer Beauflagung zur Genehmigung der Versuchsfelder ist in regelmäßigen zeitlichen Abständen eine Beprobung der Abflüsse aus den Versuchsfeldern durchzuführen. Die Erfassung und Abführung der Abflüsse erfolgt auf den Versuchsfeldern in einer zentralen Ablaufleitung. Daher ist eine direkte Zuordnung der ermittelten Wasseranalysedaten zu den Abflüssen der Drainageschichten nur eingeschränkt möglich. Die direkt zuordenbaren Analysedaten bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse für das Lysimeter 1.

5.4.3 Abflussdaten

Beim Vergleich der Abflussdaten aus 2003 ist für die Versuchsfelder zu berücksichtigen, dass erst im Frühjahr 2003 die Vegetationsentwicklung begann.

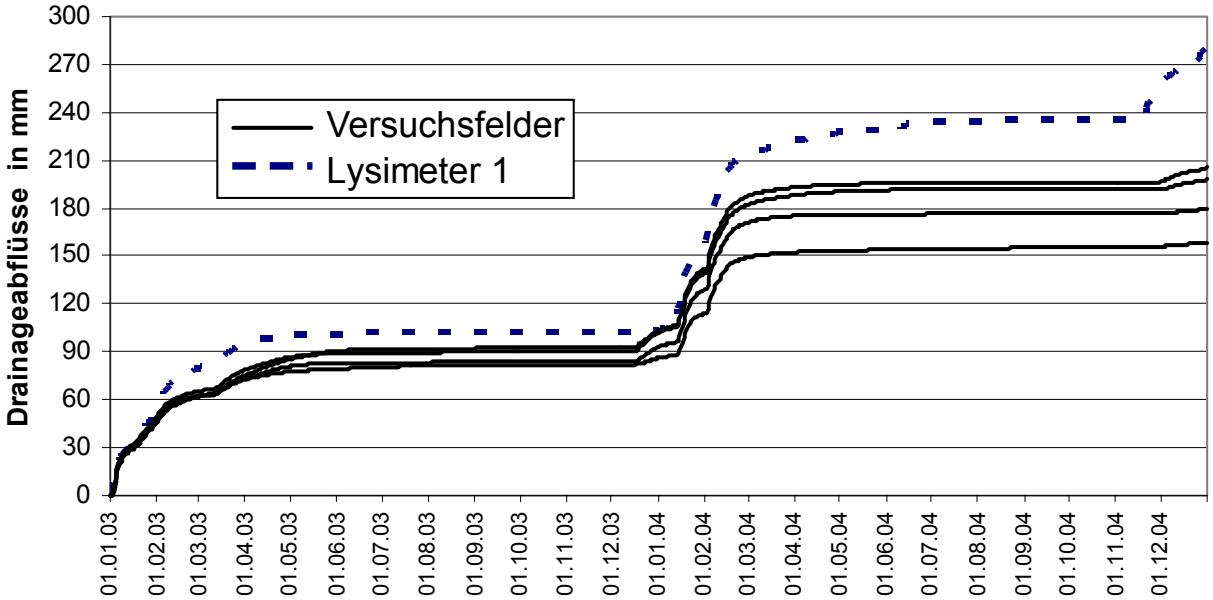

Abb. 11 Summenkurve der Abflüsse aus den Rekultivierungsschichten (2003 – 2004)

Die Abflussdaten für 2003 zeigen für die Versuchsfelder und das Lysimeter 1 vergleichbare zeitliche Verläufe der Abflussganglinie. Die als Jahressumme für das “trockene“ Jahr 2003 ermittelte Abflussmenge für das Lysimeter 1 mit 103 mm liegt bei ca. 22 % des Gesamtniederschlages in Höhe von 468 mm. Für die Versuchsfelder wurden Werte zwischen 86 mm und 102 mm ermittelt. Diese entsprechen 19 – 23 % des Gesamtniederschlages in Höhe von 443 mm.
Für das „Standardjahr“ 2004 unterscheiden sich die Ergebnisse der Versuchsfelder erheblich von denen der Lysimeteruntersuchungen. Die Ganglinie des Lysimeters 1 zeigt im Frühjahr 2004 einen längeren Abflusszeitraum sowie ab Mitte November einen erneuten deutlichen Anstieg der Abflüsse. Auf den Versuchsfeldern setzen die Abflüsse erst Anfang Dezember ein und fallen erheblich geringer aus. Die Gesamtabflüsse des Lysimeters 1 betragen für das Jahr 2004 ca. 178 mm. Das entspricht einem Anteil von 31 % des Gesamtniederschlags. Auf den Versuchsfeldern lagen die Jahresabflüsse 2004 zwischen 72 und 104 mm (13 – 18 % des Niederschlags in Höhe von 564 mm).
Es ist erkennbar, dass die im großtechnischen Einsatz ermittelten Abflussmengen aufgrund verschiedener Einflussfaktoren z.T. erheblich schwanken können. Dabei können folgende Faktoren in unterschiedlichem Maße eine Rolle spielen:

- Streubreite der Eigenschaften des Rekultivierungsschichtmaterials
- Differierende Neigungsverhältnisse
- Unterschiede in der Vegetationsentwicklung
- Einflüsse des darunter liegenden Dichtungssystems

In Bezug auf Abflussspitzen sind Unterschiede zwischen den Tageswerten im Untersuchungszeitraum nicht erkennbar. Die maximalen Abflüsse wurden Anfang Januar 2003 mit Werten von 7,9 mm/d (Lysimeter 1) und 5,6 – 7,1 mm/d (Versuchsfelder) registriert.

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass die Ergebnisse von Lysimeteruntersuchungen bei der Abschätzung der Abflüsse aus Rekultivierungsschichten und zur Bemessung der Entwässerungsschichten eine wichtige Rolle spielen können; insbesondere bei vergleichenden Untersuchungen verschiedener Materialien und Materialzusammensetzung. Die Übertragbarkeit auf Böschungsflächen von Deponien ist nur eingeschränkt und unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortbedingungen gegeben. Aus den Lysimeteruntersuchungen lässt sich ableiten, dass eine weitere Minimierung der Abflüsse bei Umsetzung der Aufbauvariante des Lysimeters 3 zu erwarten wäre, wenn keine anderen Randbedingungen dem entgegenstehen.

6 Fazit

Aufgrund der im Land Brandenburg eingeschränkten Verfügbarkeit geeigneter natürlicher Bodenmaterialien ist der Einsatz von Materialgemischen unter Verwendung von Sekundärbaustoffen in der Rekultivierungsschicht von Deponien notwendig. Im Ergebnis der durchgeführten Lysimeteruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die unter Berücksichtigung verschiedener Anforderungen aus Sekundärbaustoffen hergestellten Rekultivierungsschichten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit mit natürlichen Bodenmaterialien vergleichbar sein können. Der Nachweis der Umweltverträglichkeit der Verwertung stellt dabei eine jeweils individuell für den entsprechenden Einsatzbereich und Standort zu beantwortende Fragestellung dar. Insbesondere in Bezug auf die Schad- und Nährstoffmobilisation sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Literatur

BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG, 1994: AG Bodenkunde, 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

BRÜCKLMEIER, W., MARKWARDT, N., RAABE, S., 2004: Versickerungsmessungen des Niederschlags aus Rekultivierungsschichten In: Die sichere Deponie, Tagungsband zur SKZ-Tagung in Würzburg

BRÜCKLMEIER, W., MELCHIOR, ST., STEINERT, B.,2003: Versuchsfelder zur Untersuchung der Wirksamkeit alternativer Oberflächenabdichtungen auf der Deponie Deetz, Bauhaus - Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10 Band 1 , ISBN 3-86068-199-0

BRÜCKLMEIER, W., RAABE, S., 2002: Alternative Oberflächenabdichtungen für Deponien, Witzenhausen-Institut, Schriftenreihe Neues aus Forschung und Praxis – Bio- und Restabfallbehandlung VI, ISBN 3-928673-38-6

DGGT- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK,1997: GDA-Empfehlungen- Geotechnik der Deponien und Altlasten. 3. Auflage 1997 Verlag Ernst & Sohn

GDA-EMPFEHLUNG E 2-31, 2000: Rekultivierungsschichten Hamburger Bodenkundliche Arbeiten Band 47, ISSN : 0724-6382

MELCHIOR, ST., STEINERT, B., 2004: Abschlussbericht der Fremdprüfung mineralische Baustoffe für die Versuchsfelder Deetz, unveröffentlicht

MELCHIOR, ST., STEINERT, B., 2005: Jahresbericht 2003 der wissenschaftlichen Betreuung der Versuchsfelder Deetz, unveröffentlicht

PEDO TEC GMBH, 2003/2004: Lysimeteruntersuchungen und Wasserhaushaltsberechnungen zur Kostenreduzierung bei der Herstellung von Rekultivierungsschichten für die Deponiestandorte der MEAB unter Einbeziehung von Sekundärbaustoffen, unveröffentlichte Zwischenberichte