

## Untersuchungen zum Wasserhaushalt einer Rekultivierungsschicht

Dr. Detlef Bendler, Rebo Umwelttechnik GmbH

Das Land Sachsen-Anhalt gehört zu den Gebieten in Deutschland mit den geringsten Jahresniederschlägen. Im Raum Halle / Merseburg fallen im langjährigen Mittel etwa 515 mm Niederschlag. Das Winterhalbjahr ist mit durchschnittlich 203 mm relativ trocken, im Sommerhalbjahr werden im langjährigen Mittel 287 mm gemessen. Diese geringen Niederschlag und die günstige Niederschlagsverteilung zwischen Winter- und Sommerhalbjahr sind Voraussetzungen für den Einsatz von Wasserhaushaltsschichten für die Sicherung von Deponien /1/. Die Firma Rebo Umwelttechnik GmbH führt dazu seit vielen Jahren Untersuchungen durch :

1. Untersuchungen an Sickerwassersammlern auf der Hochhalde Leuna seit 1996
2. Untersuchungen an einem Lysimeter an der TU Berlin seit 2001
3. Feuchtemessungen auf der Hochhalde Leuna seit 2003
4. HELP-Berechnungen zu den Untersuchungen in Leuna

Anhand dieser Untersuchungen soll nachgewiesen werden, dass sich Wasserhaushaltsschichten für die Deponiesicherungen unter bestimmten klimatischen Verhältnissen eignen.

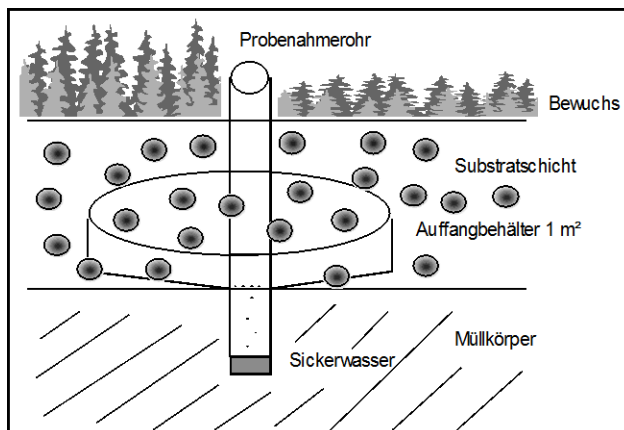
### Untersuchungen an Sickerwassersammlern auf der Hochhalde Leuna

Das eingesetzte Rekultivierungssubstrat zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus :

gesättigte Wasserdurchlässigkeit	kf-Wert $10^{-6}$ m/s
Porenvolumen	0,770 mm/mm
Feldkapazität	0,502 mm/mm
permanenter Welkepunkt	0,271 mm/mm
nutzbare Feldkapazität	23,1 Vol%
Bodenart	stark schluffiger Sand

Die dafür genutzten Sickerwassersammler wurden von Herrn Dr. Kliche von der Universität Halle-Wittenberg entwickelt und patentiert /2/. Der Aufbau wird in Abbildung 1 gezeigt.

**Abbildung 1:** Prinzipaufbau eines Sickerwassersammlers



Die Sammler bestehen aus einem Auffangbehälter mit 1 m² Grundfläche. Der Behälter ist konisch gearbeitet und mit Kies gefüllt. In der Mitte des Sammlers ist ein Sammelstutzen angebracht, in den

das Sickerwasser durch Öffnungen fließen kann. Dieser Sammelstutzen kann beliebig nach oben verlängert werden. Die Probenahme erfolgt durch dieses Rohr. Bei unseren Untersuchungen wurde monatlich der Sammler kontrolliert, beim Auftreten von Sickerwasser, dieses vollständig abgepumpt, die Menge bestimmt und chemisch untersucht. Der Sammler wird direkt auf den Deponieuntergrund (hier Asche) aufgebracht und danach das Rekultivierungssubstrat normal eingebaut. Im Frühjahr 2003, also nach 8 Jahren Betrieb, wurde von uns ein Sammler aufgegraben. Dabei konnte festgestellt werden, dass weder die Einlassöffnungen verstopft, noch der Kies verschlammte war, wodurch ein einwandfreies Funktionieren des Sammlers gewährleistet ist. Nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Messergebnisse für 3 Sammler in unterschiedlichen Tiefen (Sammler 1 in 2,0 m, Sammler 2 in 1,60 m, Sammler 3 in 1,0 m) seit 1996.

**Tabelle 1: Sickerwassermengen und Niederschlag seit 1996**

Jahr	Sammler 1		Sammler 2		Sammler 3		Niederschlag
	mm	%	mm	%	mm	%	mm
1996	2,4	0,51%	6,05	1,30%	8,1	1,73%	467
1997	18,9	3,36%	9,9	1,76%	18,9	3,36%	563
1998	6,4	1,13%	2,5	0,44%	13	2,29%	568
1999	1,45	0,33%	3,7	0,85%	4,9	1,12%	437
2000	0,95	0,23%	1,6	0,38%	6,5	1,56%	416
2001	2,3	0,44%	5,3	1,01%	9,75	1,86%	523
2002	3,6	0,46%	10,4	1,32%	5,8	0,74%	789
2003	1,9	0,57%	2,1	0,63%	3,8	1,14%	334
Durchschnitt	<b>4,74</b>	<b>0,93%</b>	<b>5,19</b>	<b>1,01%</b>	<b>8,84</b>	<b>1,73%</b>	<b>512</b>

Der durchschnittliche Niederschlag in den 8 Jahren entspricht mit 512 mm genau dem langjährigen Mittel für diese Region. Im Messzeitraum ist ein extrem niederschlagreiches (2002) und ein sehr trockenes Jahr (2003) enthalten, so dass die Untersuchungen als repräsentativ gewertet werden können. Im Durchschnitt wurden 4 bis 10 Liter Sickerwasser pro Jahr gemessen, was etwa 1 bis 2 % des Jahresniederschlags entspricht. Ebenso ist über die Jahre hinweg keine signifikante Veränderung des Wasserspeichervermögens festzustellen.

### Untersuchungen an einem Lysimeter an der TU Berlin

Um unsere Ergebnisse mit den selbstgebaute Sickerwassersammlern auf der Hochhalde Leuna zu verifizieren, haben wir uns um entsprechende Lysimeteruntersuchungen bemüht. Im Herbst 2001 haben wir gemeinsam mit der TU Berlin und dem Ingenieurbüro pedotec auf der Lysimeteranlage in Berlin Dahlem die Untersuchungen begonnen. Die Anlage in Dahlem verfügt über eine eigene Wetterstation, auf der sämtliche Parameter wie Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, potentielle Verdunstung usw. erfasst werden. Das Lysimeter hat eine Grundfläche von 1 m<sup>2</sup> und wurde mit 1,40 m Rekultivierungssubstrat aus Leuna befüllt. Das Lysimeter steht auf einer Waage, so dass Gewichtsveränderungen, gemessen werden können. Damit ist man in der Lage Gewichtszunahmen durch Niederschlag und Gewichtsabnahmen durch Verdunstung, Transpiration und austretendes Sickerwasser (wird ebenfalls gewogen) festzustellen. Begleitet wurden die experimentellen Untersuchungen durch Berechnungen mit dem HELP-Modell. Diese Berechnungen wurden von Herrn Dr. Markwardt (pedotec GmbH) durchgeführt /3,4/.

Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Ergebnisse der Lysimetermessungen im Vergleich zu den Berechnungen mit dem HELP-Modell für die Jahre 2002 und 2003.

**Tabelle 2 : Vergleich Lysimetermessungen und HELP-Berechnungen 2002**

	Niederschlag		Versickerung				aktuelle Verdunstung			
	(N <sub>0m</sub> )		gemessen		gerechnet		gemessen		gerechnet	
2002	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Monat		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert
Jan	41	41	15,5	15,5	19,2	19,2	9	9	7,4	7,4
Feb	92,6	133,6	58,6	74,1	60,4	79,6	17,6	26,6	15,8	23,2
Mrz	46,7	180,3	35	109	50,6	130	35,7	62,3	31,4	54,6
Apr	47,2	227,5	13,4	123	3,7	134	32,9	95,2	33	87,6
Mai	65,3	292,8	10,2	133	0,5	134	87,2	182	86,8	174
Jun	45,7	338,5	4,3	137	0	134	119,9	302	124	298
Jul	71,7	410,2	1,4	138	0	134	112,5	415	98,7	397
Aug	255,8	666	46,6	185	16,6	151	112,7	528	114	511
Sep	41,1	707,1	4,3	189	0	151	74,6	602	77,3	588
Okt	106	813,1	10	199	26,6	178	29,6	632	29,3	618
Nov	54,1	867,2	38	237	46,9	225	10,3	642	8	626
Dez	17,2	<b>884,4</b>	16,2	<b>254</b>	14,2	<b>239</b>	7,9	<b>650</b>	2,6	<b>628</b>

**Tabelle 3: Vergleich Lysimetermessungen und HELP-Berechnungen 2003**

	Niederschlag		Versickerung				aktuelle Verdunstung			
	(N <sub>0m</sub> )		gemessen		gerechnet		gemessen		gerechnet	
2003	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Monat		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert
Jan	74,1	74,1	51	51	64,1	64,1	5,8	5,8	5,6	5,6
Feb	8,1	82,2	23	74	17,6	81,7	8	13,8	10,2	15,8
Mrz	26,2	108,4	17,6	91,6	15	96,7	16,7	30,5	20,2	36
Apr	22,3	130,7	7,9	99,5	0	96,7	45,6	76,1	27,4	63,4
Mai	33,5	164,2	3,7	103	0	96,7	112,6	189	97,6	161
Jun	69,6	233,8	0,6	104	0	96,7	81,5	270	117	278
Jul	46,3	280,1	0,2	104	0	96,7	94,5	365	105	383
Aug	30,4	310,5	0,4	104	0	96,7	73,3	438	78,4	462
Sep	35,7	346,2	0,3	105	0	96,7	51,2	489	45,4	507
Okt	56,9	403,1	0,1	105	0	96,7	26,6	516	26,6	534
Nov	38,9	442	0	105	0	96,7	11,2	527	9,7	543
Dez	45,4	<b>487,4</b>	0	<b>105</b>	0	<b>96,7</b>	11,2	<b>538</b>	4,6	<b>548</b>

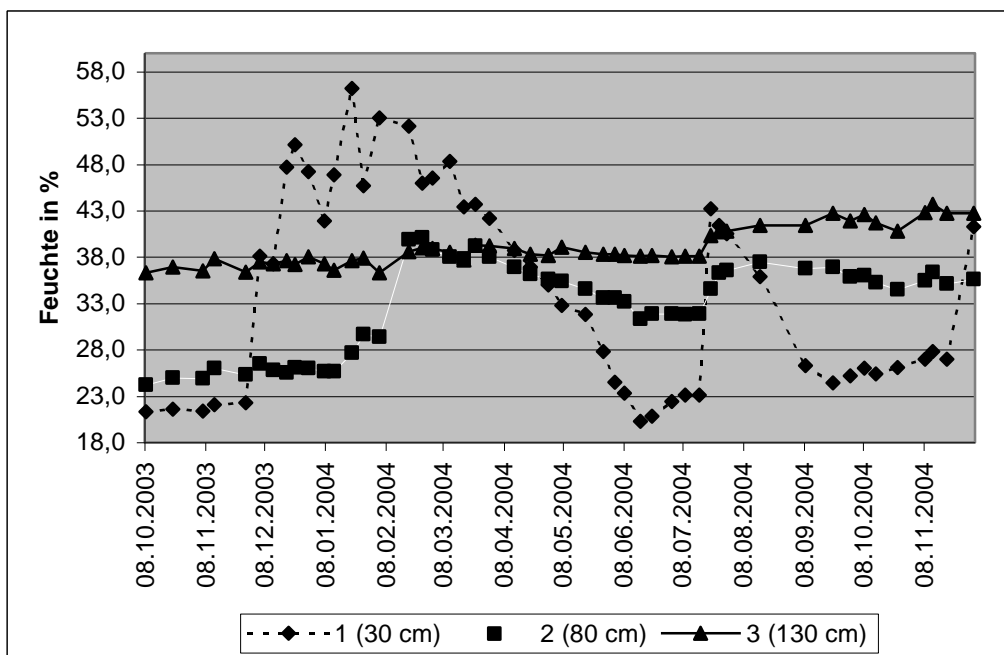
Mit 884 mm Jahresniederschlag war das Jahr 2002 auch in Berlin ein extrem feuchtes Jahr. Die gefundenen und berechneten Sickerwassermengen stimmen sehr gut überein. Das Gleiche gilt für die aktuelle Verdunstung. Gleichzeitig erkennt man hier die Grenzen für die Anwendung einer Wasserhaushaltsschicht in Regionen, wo derart hohe Jahresniederschläge zu verzeichnen sind. Mit dem Jahr 2003 folgte ein für Berliner Verhältnisse relativ trockenes Jahr. Auch hier findet man eine sehr gute Übereinstimmung der gefundenen und berechneten Sickerwassermengen. Bei etwa 500 mm Jahresniederschlag wurden 100 mm Sickerwasser gemessen. Dieses Sickerwasser resultiert jedoch im wesentlichen aus den hohen Niederschlagsmengen im Jahr 2002. Anhand der Lysimeteruntersuchungen ist man in der Lage die HELP-Berechnungen für das verwendete Substrat

so zu eichen, dass man davon ausgehen kann, dass die HELP-Rechnungen auch für andere Standorte das Bild des Wasserhaushalts korrekt widerspiegeln.

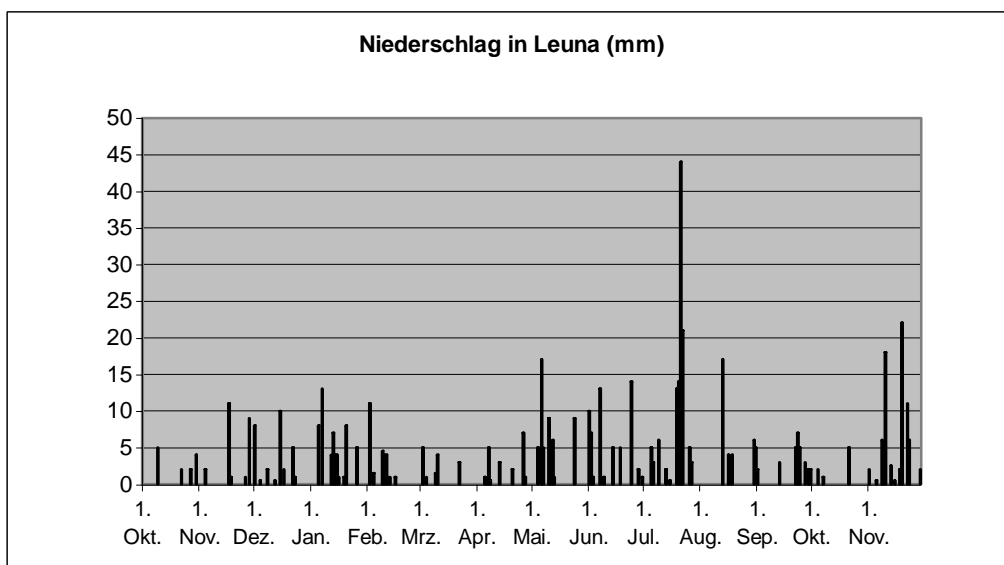
**Feuchtemessungen auf der Hochhalde Leuna**

Seit Herbst 2003 führen wir auf der Hochhalde Leuna Feuchtemessungen des Rekultivierungssubstrates durch. Dazu haben wir Messsonden in unterschiedlichen Tiefen (30 cm, 80 cm, 130 cm) eingebaut. Die Messungen basieren auf unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen von Wasser und Boden. Die Genauigkeit beträgt 2 Vol%. Da wir nur Feuchtigkeitsunterschiede bestimmen wollen, reicht diese Genauigkeit völlig aus. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Ergebnisse.

**Abbildung 4:** Feuchtemessungen Oktober 2003 bis November 2004



**Abbildung 5:** Niederschlag Oktober 2003 bis November 2004



Im Diagramm ist sehr gut die Beeinflussung der oberen Bodenschicht zu erkennen. Zu Beginn der Messungen im Oktober 2003 war aufgrund des sehr trockenen Sommers der permanente Welkepunkt annähernd erreicht. Danach steigt der Wassergehalt allmählich wieder an, bis dann in 30 cm das Wasseraufnahmevermögen erreicht ist. In den unteren Schichten ist keine Veränderung festzustellen. Etwa 2 Monate nachdem bei 30 cm die maximale Feuchte erreicht war, steigt der Wassergehalt auch bei 80 cm stark an. Zu diesem Zeitpunkt traten auch die Sickerwasserereignisse in den Sickerwassersammlern auf (siehe Tabelle 1). Die Feuchte der Schicht bei 130 cm ändert sich wenig. Mit Beginn des Frühjahrs und der Vegetationsperiode trocknen die beiden oberen Schichten allmählich wieder aus. Ende Juli hatten wir in Leuna ein extremes Niederschlagsereignis. Innerhalb von 4 Tagen fielen knapp 100 mm Niederschlag. Das führte zu einer schlagartigen Erhöhung des Wassergehaltes in allen Schichten. Offenbar kann bei so hohen Niederschlägen in kürzester Zeit das Wasser nicht gespeichert werden, sondern „läuft durch“. Zu diesem Zeitpunkt wurde ebenfalls Sickerwasser gemessen. Man sieht jedoch auch, dass die oberen Schichten relativ schnell wieder austrocknen. Wie im vergangenen Jahr steigt der Feuchtegehalt der oberen Schicht Anfang Dezember wieder stark an. Anhand dieser Messungen lässt sich das Funktionsprinzip einer Wasserhaushaltsschicht gut darstellen und damit lassen sich sichere Voraussagen über die Anwendungsmöglichkeit einer solchen Schicht treffen.

#### HELP-Berechnungen zu den Untersuchungen in Leuna

Durch die Lysimeterversuche an der TU Berlin konnte das HELP-Modell für das verwendete Rekultivierungssubstrat geeicht werden. Die Tabellen 4 und 5 zeigen die gefundenen und berechneten Werte für das Sickerwasser und die berechneten Werte für die aktuelle Verdunstung. Für das außergewöhnlich feuchte Jahr 2002 mit 774 mm Niederschlag wurden experimentell 10,4 mm Sickerwasser gefunden, das HELP-Modell zeigt jedoch noch kein Sickerwasser an (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4:** experimentelle und berechnete Werte für die Versickerung in Leuna 2002

	Niederschlag		Versickerung				aktuelle Verdunstung			
	(N <sub>0m</sub> )		gemessen		gerechnet		gemessen		gerechnet	
2002 Monat	(mm)	(mm) kumu- liert	(mm)	(mm) kumu- liert	(mm)	(mm) kumu- liert	(mm)	(mm) kumu- liert	(mm)	(mm) kumu- liert
Jan	13	13	1,6	1,6	0	0	-	-	9	9
Feb	28,1	41,1	1,1	2,7	0	0	-	-	18,9	27,9
Mrz	30,6	71,7	0,1	2,8	0	0	-	-	37,9	65,8
Apr	43,8	115,5	0,3	3,1	0	0	-	-	39	105
Mai	52,3	167,8	0	3,1	0	0	-	-	107	211
Jun	58,1	225,9	0	3,1	0	0	-	-	121	333
Jul	100,7	326,6	0,9	4	0	0	-	-	108	441
Aug	88,5	415,1	5,6	9,6	0	0	-	-	125	566
Sep	57,1	472,2	0,3	9,9	0	0	-	-	76,2	642
Okt	49,9	522,1	0	9,9	0	0	-	-	39,9	682
Nov	136,7	658,8	0	9,9	0	0	-	-	11,3	693
Dez	115,3	<b>774,1</b>	0,5	<b>10,4</b>	0	<b>0</b>	-	-	3,2	<b>696</b>

Die Tabelle 5 für das Jahr 2003 weist aber aus, dass mittels des HELP-Modells für Januar und Februar 2003 Sickerwasser berechnet wurde. Betrachtet man beide Jahre (Tabelle 4 und Tabelle 5)

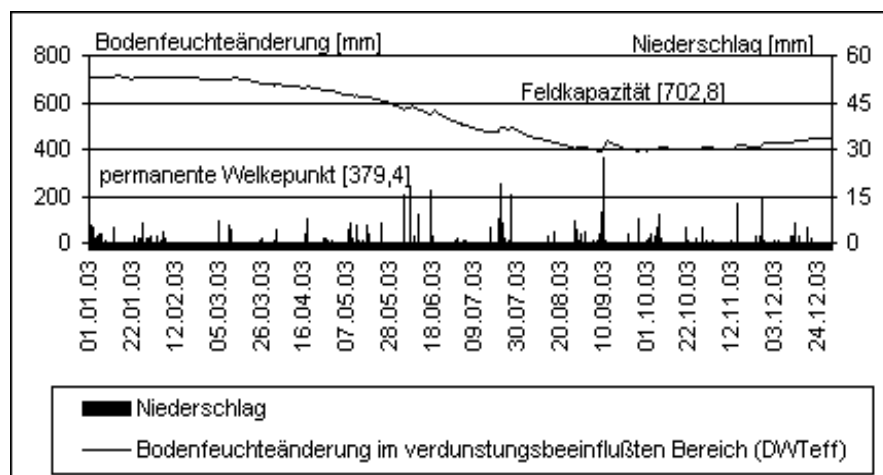
so zeigt sich mit experimentell gefundenen 12,5 mm und berechneten 20,3 mm Sickerwasser eine sehr gute Übereinstimmung.

**Tabelle 5:** experimentelle und berechnete Werte für die Versickerung in Leuna 2003

	Niederschlag		Versickerung				aktuelle Verdunstung			
	(N <sub>0m</sub> )		gemessen		gerechnet		gemessen		gerechnet	
2003	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Monat		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert		kumu- liert
Jan	44,6	44,6	2,1	2,1	11,4	11,4	-	-	9,1	9,1
Feb	8	52,6	0	2,1	8,9	20,3	-	-	14,5	23,6
Mrz	19,7	72,3	0	2,1	0	20,3	-	-	39,4	63
Apr	20,5	92,8	0	2,1	0	20,3	-	-	48,2	111
Mai	33,1	125,9	0	2,1	0	20,3	-	-	95,2	206
Jun	64	189,9	0	2,1	0	20,3	-	-	137	344
Jul	57,3	247,2	0	2,1	0	20,3	-	-	95,8	440
Aug	22,5	269,7	0	2,1	0	20,3	-	-	88,6	528
Sep	57	326,7	0	2,1	0	20,3	-	-	69,7	598
Okt	35,5	362,2	0	2,1	0	20,3	-	-	26,8	625
Nov	33,8	396	0	2,1	0	20,3	-	-	11,3	636
Dez	20,8	<b>416,8</b>	0	<b>2,1</b>	0	<b>20,3</b>	-	-	6,5	<b>642</b>

Nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Veränderung der Bodenfeuchte im Laufe des Jahres 2003. Im Januar war die Feldkapazität des verwendeten Substrates erreicht und es kam zu Versickerungen. Danach nahm die Bodenfeuchte kontinuierlich ab und gegen Ende des Jahres wieder zu. Dieser Verlauf konnte auch durch die Feuchtebestimmungen bestätigt werden.

**Abbildung 6:** berechnete Bodenfeuchteänderung für das Rekultivierungssubstrat in Leuna 2003



Anhand der vorgestellten Ergebnisse wird deutlich, dass sich die HELP-Berechnungen sehr gut eignen, um Voraussagen zu treffen, ob sich ein bestimmtes Rekultivierungssubstrat für einen ausgewählten Standort eignet. Diese Aussage soll anhand der Tabellen 6 und 7 verdeutlicht werden. Tabelle 6 zeigt den mittleren Jahresniederschlag für einen Zeitraum von 10 Jahren für Merseburg und die daraus berechneten Werte für Oberflächenabfluss, Versickerung und Bodenfeuchteänderung. Man erkennt, dass bei einem mittleren Niederschlag von 515 mm für 2 von 10 Jahren eine Versickerung

berechnet wurde. Es wurde festgestellt, dass ca. 2% des Niederschlags versickert. Dagegen zeigt Tabelle 7, dass für den Standort Meiningen mit einem mittleren Jahresniederschlag von 683 mm für jedes Jahr eine Versickerung berechnet wurde. Es wurden durchschnittlich 19 % Sickerwasser ermittelt.

**Tabelle 6:** Mittlerer Jahresniederschlag und berechnete Versickerung für den Standort Leuna

Jahr	91	92	93	94	95	96	97	98	99	0	Mittel
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	91-00 (mm)/(%)
Niederschlag	303	513	587	613	562	462	548	562	492	512	<b>515/100</b>
Oberflächenabfluss	0	3	2	7	3	2	2	2	1	1	<b>2/0</b>
aktuelle Verdunstung	426	486	541	588	537	431	607	488	544	545	<b>519/101</b>
Versickerung	18	0	0	63	0	0	0	0	0	0	<b>8/2</b>
Bodenfeuchteänderung	-141	25	44	-46	23	26	-58	72	-54	-35	<b>(-141)</b>

**Tabelle 7:** Mittlerer Jahresniederschlag und berechnete Versickerung für den Standort Meiningen

Jahr	92	93	94	95	96	97	98	99	0	1	Mittel
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	92-01 (mm)/(%)
Niederschlag	677	669	653	713	619	541	804	644	688	818	<b>683</b>
Oberflächenabfluss	4	5	1	5	3	1	3	2	3	3	<b>3 / 0</b>
aktuelle Verdunstung	593	532	543	558	489	507	546	595	545	574	<b>548 / 80</b>
Versickerung	80	114	188	102	111	92	196	91	90	227	<b>129 / 19</b>
Bodenfeuchteänderung	0	18	-80	46	14	-57	60	-45	42	7	<b>-5</b>

## Zusammenfassung

Anhand dieses Beispiels ist zu erkennen, dass sich Wasserhaushaltsschichten als alleiniges Dichtungssystem nur für bestimmte Standorte eignen. Das Land Sachsen-Anhalt ist aufgrund der klimatischen Verhältnisse ein bevorzugter Standort für den Einsatz von Wasserhaushaltsschichten. Die relativ geringe Niederschlagsmenge und die trockenen Winter sind eine ideale Voraussetzung für derartige Wasserhaushaltsschichten zur Abdeckung von Deponieoberflächen. Der Vortrag sollte zeigen, dass durch einfache Feldversuche in Verbindung mit HELP-Berechnungen die Wirksamkeit einer Wasserhaushaltsschicht nachgewiesen werden kann. Damit die Wirksamkeit von Wasserhaushaltsschichten auch garantiert werden kann, sollten bei der Auswahl des Materials und beim Aufbau bestimmte Grundsätze beachtet werden. Die derzeitige Praxis von verschiedenen Baustellen Erdaushub zusammenzutragen und einzuplanieren halte ich zumindest für überprüfenswert. Wichtig ist ein möglichst homogenes Material schichtenweise mit schonender Erdbautechnik aufzubringen. Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass das Wasserspeichervermögen des Substrates über lange Zeit erhalten bleibt. Das bedeutet, dass nur ausgereifte Substratgemische eingesetzt werden können. Weiterhin soll auf eine gründliche Vorbereitung mit entsprechenden Feldversuchen und eine fachgerechte Überwachung bei der Auswahl und dem Einbau des Materials geachtet werden. Unter Beachtung all dieser Voraussetzungen sind Wasserhaushaltsschichten eine kostengünstige Alternative für ausgewählte Deponiesicherungsmaßnahmen.

**Literatur**

- /1/ Poster, DEPOTECH 2002, Bendler, D., Kliche, H., Markwardt, N.,  
Wasserhaushaltsuntersuchungen an einer Deponieabdeckschicht
- /2/ Fluid-Sammelvorrichtungen, geprüftes Patent DE 4408811 C 2
- /3/ Lysimeteruntersuchungen und Wasserhaushaltsberechnungen für das temporäre Ein-  
Schicht-Abschirmsystem tESDA der Rebo Umwelttechnik GmbH - 1. Kurzbericht -  
Norbert Markwardt, pedo tec GmbH, Juni 2003
- /4/ Lysimeteruntersuchungen und Wasserhaushaltsberechnungen für das temporäre Ein-  
Schicht-Abschirmsystem tESDA der Rebo Umwelttechnik GmbH - 2. Kurzbericht -  
Norbert Markwardt, pedo tec GmbH, März 2004