

„Langzeitbewertung von Deponieoberflächensicherungsvarianten anhand von Testfeld- und Aufgrabungsuntersuchungen“

Müller, M.¹; Baumert, R.¹; Schoenherr, J. I.¹; Sänger, F.²; Opitz, B.³

¹ Hochschule Zittau/Görlitz, MVSR-Forschungslabor, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

² DBI-EWI Ingenieurgesellschaft für Spezialbau, Wasser und Umwelt GmbH,
Grefestrasse 2a, 38889 Blankenburg

³ Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden

1 Zusammenfassung

Nach einem langjährigen Testfeldbetrieb (6 Versuchsjahre) und den parallel dazu betriebenen Aufgrabungsfeldern sind effektive, langzeitbezogene Betrachtungen an Oberflächensicherungsvarianten durchführbar. Im Rahmen der Anlagenbetreuung durch den regionalen Abfallverband (RAVON) und der wissenschaftlichen Begleitung durch die Hochschule Zittau/Görlitz erfolgen neben Durchflussmessungen auch zeitlich gestaffelte, systematische Materialuntersuchungen. Über den 6-jährigen Versuchszeitraum zeigen Durchflussmessungen signifikante Wirksamkeitsunterschiede zwischen den Dichtvarianten auf, wobei das System nach TASI einen nahezu stabilen Wirksamkeitsverlauf von größer 98 % aufweist. Für konzeptionell variierende Bentonitmattenfelder können Wirksamkeiten von bis zu ca. 90 % nachgewiesen werden, wobei bei allen Bentonitmattendichtungen tendenzielle Wirksamkeitsverschlechterungen über den Versuchszeitraum feststellbar sind. Im Vergleich zum Regelsystem nach TASI sind die Ergebnisse des sog. „Bürgermeistersystems“ (Testfeld 1: mineralische Dichtung, Rekultivierungsschicht) mit kleiner 70 % Dichtwirksamkeit als schlecht einzustufen. Die Ergebnisse der Materialuntersuchungen belegen die tendenziellen Verschlechterungen der Dichtleistungen. Es konnte anhand der k_f -Wert-Erhöhungen (bis zu 2 Zehnerpotenzen) sowie den nahezu abgeschlossenen Ionenaustauschprozessen signifikante Materialveränderungen nachgewiesen werden. Teilweise rückläufige nutzbare Feldkapazitäten der Rekultivierungsböden bedingen eine schlechtere Feuchthaltung der Dichtmaterialien und somit ein erhöhtes Austrocknungsrisiko.

2 Einleitung

Seit den 90er Jahren werden zahlreiche in-situ-Testfelder (oder Großlysimeter) deutschlandweit errichtet und über begrenzte Zeiträume betrieben. Die Ergebnisse werden bei der Sicherung von Altlasten, Deponien und industriellen Absetzanlagen mit herangezogen [1], [2]. Hierbei werden meist mehrere, d. h. unterschiedlichste Dichtelemente (z. B. Bentonitmatten, TRISOPLAST, ...) und Elementkombinationen zur Herstellung einer langzeitsicheren, technisch umsetzbaren Lösung für die Oberflächensicherung u. a. von Altdeponien getestet.

Zum Verbandsgebiet des Regionalen Abfallverbandes Oberlausitz-Niederschlesien (RAVON) gehören acht öffentliche Siedlungsabfalldeponien. Im Rahmen der Stilllegungsmaßnahmen sind insgesamt ca. 45 ha Oberfläche abzudichten. Im Jahre 1997/98 kam es zur Planung und Errichtung einer Testfeldanlage auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz. Die Ergebnisse der Testfeld- und Materialuntersuchungen sollten bei der Konzeption und Errichtung von ökonomisch und ökologisch optimierten, standortangepassten Oberflächenabdichtungen einen Beitrag leisten [3].

3 Konzeptioneller Aufbau der Test- und Aufgrabungsfelder

Seit Versuchsbeginn in den Jahren 1998/99 werden insgesamt 6 Testfelder mit unterschiedlichen Oberflächenabdichtungsmaterialien hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und ggf. der Überführung einer Abdeckung in eine endgültige Abdichtung betrieben. Im Jahre 1999 wurden Umbauleistungen an ausgewählten Feldern durchgeführt und Testfeld 2 vom Messbetrieb abgetrennt [4], [5], [6].

Der Aufbau der Testfelder ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Testfeld 7 charakterisiert den Aufbau in Anlehnung an das Regelsystem nach TASI (ohne KDB). Dieses Feld kann somit als Vergleichsbasis zu allen anderen alternativen Abdichtvarianten (z. B. unterschiedliche Arten von Bentonitmatten) dienen. Damit ist eine Nachweisführung zur Langzeitwirksamkeit und -stabilität im direkten standortspezifischen Vergleich möglich und nicht ausschließlich auf Laboruntersuchungen beschränkt. Die anderen Testfelder (1, 3, 4, 5 und 6) unterscheiden sich in der unterschiedlichen Dimensionierung und Materialauswahl der Reaktivierungsschicht (a), der Entwässerungs- oder Sickerwasserdrainageschicht (b) und der Dichtschicht (c). Bei der folgenden Schichtenbeschreibung soll daraus resultierend nur auf diese Schichten (a, b und c) eingegangen werden [1], [6].

Zur Vergleichmäßigung der Bewuchssituation und des Oberflächenabflusses sind auf allen Testfeldern Erosionsschutzmatten aufgebracht. Der Oberflächenabfluss wird ausschließlich an Testfeld 4 erfasst und ist auf alle anderen Felder übertragbar. Die Sickerwasserfassung ist ferner bei allen Feldern mit 15 cm Schichthöhe gleich dimensioniert. Hierüber wird die Erfassung und Quantifizierung des Infiltrationswassers, das die Dichtung durchdrungen hat, ermöglicht. Eine Gasdrainageschicht unter der Dichtschicht, wie nach TASI gefordert, befindet sich nicht in den Testfeldern. Sie ist aufgrund des fehlenden, direkten Kontakts zum Müllkörper nicht notwendig.

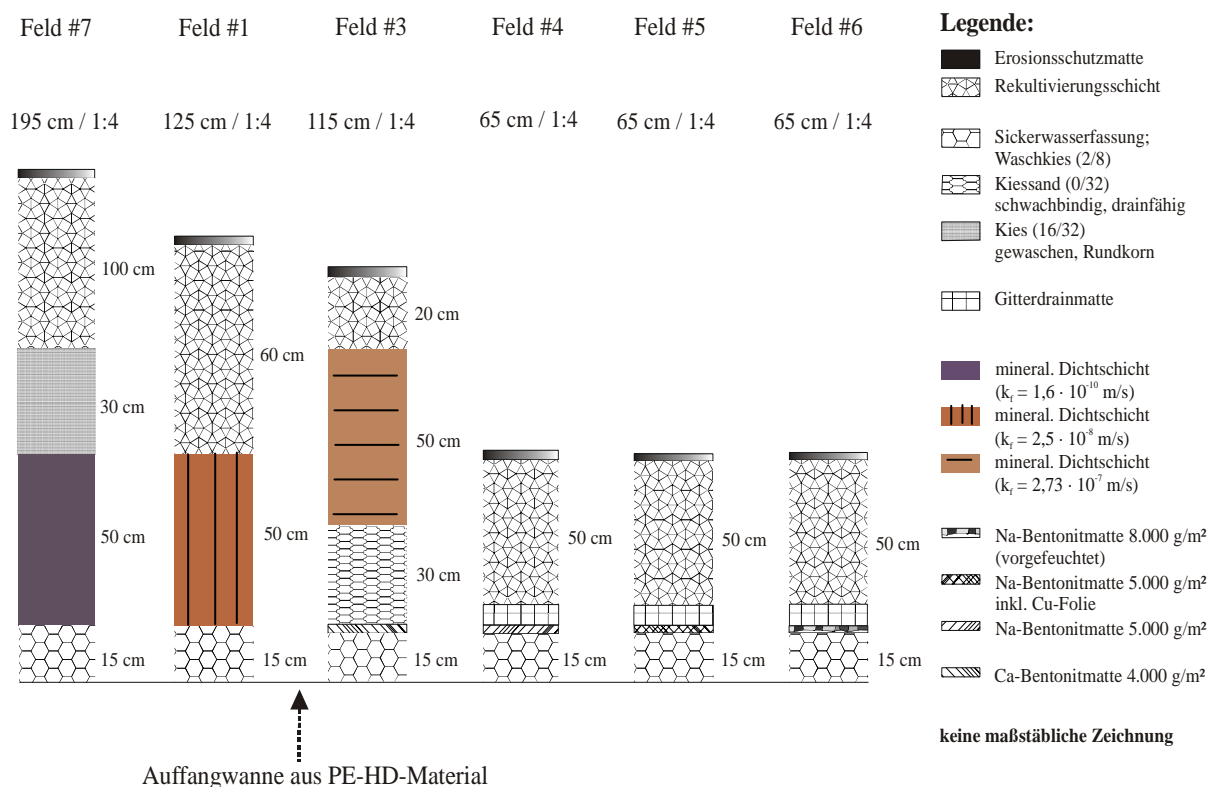


Abb. 1: Konzeptioneller Aufbau der Testfelder [6]

Das **Testfeld 1** hat eine Gesamthöhe von 1,25 m (inkl. 0,15 m Sickerwasserfassung):

- a) Rekultivierungsschicht: $d = 0,60$ m; nutzbare Feldkapazität $nFK = 18,50$ %; k_f -Wert = $7,52 \cdot 10^{-8}$ m/s
- b) keine Entwässerungsschicht
- c) zweilagige, bindige mineralische Dichtschicht (mit 7 % Tonmehl versetzt):
 $d = 0,50$ m; k_f -Wert = $2,50 \cdot 10^{-8}$ m/s

Das **Testfeld 3** hat eine Gesamthöhe von 1,15 m (inkl. 0,15 m Sickerwasserfassung):

- a) Rekultivierungsschicht: $d = 0,20$ m mit zusätzlicher Auflast auf der Dichtungsschicht durch schwach bindiges Material mit $d = 0,50$ m; $nFK = 12,12$ %; k_f -Wert = $2,13 \cdot 10^{-7}$ m/s
- b) Entwässerungsschicht: schwach bindiger, drainfähiger Kiessand 0/32; $d = 0,30$ m
- c) Dichtschicht: Calcium-Bentonitmatte mit 4000 g/m² Flächengewicht

Das **Testfeld 4** hat eine Gesamthöhe von 0,65 m (inkl. 0,15 m Sickerwasserfassung):

- a) Rekultivierungsschicht: $d = 0,50$ m; $nFK = 18,93$ %; k_f -Wert = $6,41 \cdot 10^{-8}$ m/s
- b) Entwässerungsschicht: Gitterdrainmatte ($d = 0,01 - 0,02$ m)
- c) Dichtschicht: Natrium-Bentonitmatte mit 5000 g/m² Flächengewicht

Das **Testfeld 5** hat eine Gesamthöhe von 0,65 m (inkl. 0,15 m Sickerwasserfassung):

- a) Rekultivierungsschicht: $d = 0,50$ m; $nFK = 19,83$ %; k_f -Wert = $6,41 \cdot 10^{-8}$ m/s
- b) Entwässerungsschicht: Gitterdrainmatte ($d = 0,01 - 0,02$ m)
- c) Dichtschicht: Natrium-Bentonitmatte mit 5000 g/m² Flächengewicht und integriertem Wurzelschutz (Kupferfolie)

Das **Testfeld 6** hat eine Gesamthöhe von 0,65 m (inkl. 0,15 m Sickerwasserfassung):

- a) Rekultivierungsschicht: $d = 0,50$ m; $nFK = 13,06$ %; k_f -Wert = $6,32 \cdot 10^{-7}$ m/s
- b) Entwässerungsschicht: Gitterdrainmatte ($d = 0,01 - 0,02$ m)
- c) Dichtschicht: vorbefeuchtet eingebaute, modifizierte Natrium-Bentonitmatte mit 8000 g/m² Flächengewicht

Das **Testfeld 7** ist entsprechend den Vorgaben der TASI, jedoch ohne KDB aufgebaut. Es hat eine Gesamthöhe von 1,95 m (inkl. 0,15 m Sickerwasserfassung):

- a) Rekultivierungsschicht: $d = 1,00$ m; $nFK = 13,45$ %; k_f -Wert = $5,37 \cdot 10^{-8}$ m/s
- b) Entwässerungsschicht: Drainagekies 16/32 (gewaschenes Rundkorn); $d = 0,30$ m
- c) Dichtschicht: 2-lagige bindige mineralische Dichtschicht; $d = 0,50$ m; k_f -Wert = $1,60 \cdot 10^{-10}$ m/s

Jedes Testfeld nimmt eine Fläche von ca. 60 m² (15 m x 4 m) ein und weist eine standorttypische Böschungsneigung von $1 : 4$ auf [6].

Für versuchsbegleitende Materialuntersuchungen an den verwendeten Erdstoff- und Dichtungsmaterialien können die kongruent aufgebauten Aufgrabungsfelder mit äquivalenter Neigungslage, Materialien und Schichtfolgen (jedoch ohne Abgrenzung zum Deponiekörper) verwendet werden [7], [8].

4 Mess- und Auswertungscharakteristik

Zur Wasserhaushaltsbilanzierung erfolgen zwei grundlegende Arten von Messungen. Zum Einen werden meteorologische Daten automatisch und zum Abgleich teilweise manuell erfasst. Zum Anderen sind die verschiedenen Abflüsse (über bzw. unter der Dichtschicht und an der Oberfläche) an den Testfeldern messbar.

Die Klimadaten, wie Niederschlag, Luftfeuchte, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung, werden mit Hilfe, der am 21.10.1998 direkt oberhalb der Testfelder auf der

Deponie aufgestellten Klimastation (Typ: UNIKLIMA 7, Hersteller: TOSS GmbH, Potsdam), automatisch erfasst und über einen Datenspeicher kontinuierlich gesichert.

Der Niederschlag an der Klimastation UNIKLIMA wird ebenerdig mit einem Kippzähler (Modell: 100.061, Hersteller: TOSS GmbH) und zum Abgleich in 2,0 m Höhe, bei gleichem Messprinzip, erfasst. Zur Plausibilitätsprüfung der Niederschlagsdaten ist zusätzlich ein manueller Regenmesser nach HELLMANN, der am Fuß der Testfelder ebenerdig angeordnet ist, in das Messprogramm integriert. Alle automatisch erfassten Klimadaten werden über die Messstation UNIKLIMA 7 mit verarbeitet und per PC regelmäßig ausgelesen.

Neben den eigenen meteorologischen Standortwerten, werden ergänzend und vergleichend auch Wetterdaten über den Deutschen Wetterdienst („DWD-Standort 2033 - Görlitz“) kommerziell abgefragt und in die Auswertung involviert. Damit kann die regionalspezifische Meteorologie als hinreichend gut erfasst gelten.

Der konzeptionelle Aufbau der Abflussmessungen ist aus der Abb. 2 entnehmbar. Von den einzelnen Untersuchungsfeldern werden jeweils der Abfluss unter der Dichtung sowie der Abfluss über der Dichtschicht separat erfasst. Die Abflüsse werden über Vollsickerrohre gewonnen und durch den dazwischen geschalteten Siphon (s. Abb. 2) vom Messbehälter strömungsmechanisch entkoppelt und dadurch saug- sowie staufrei bemessbar. In der Messstation stehen für jedes Testfeld zwei Erfassungsbehälter (Volumen: ca. 600 l) zur Sickerwassersammlung bereit. Mit den an den Messbehältern angebrachten Schaugläsern (Sehrohr) kann der jeweilige Sickerwasserstand [in cm] abgelesen werden. Dieser wird in einem Tagesblatt schriftlich festgehalten und in „mm-Wassersäule“ umgerechnet. Aufgrund gleichen Randbedingungen wird der Oberflächenabfluss lediglich an einem Testfeld erfasst und kann auf alle anderen Felder übertragen werden.

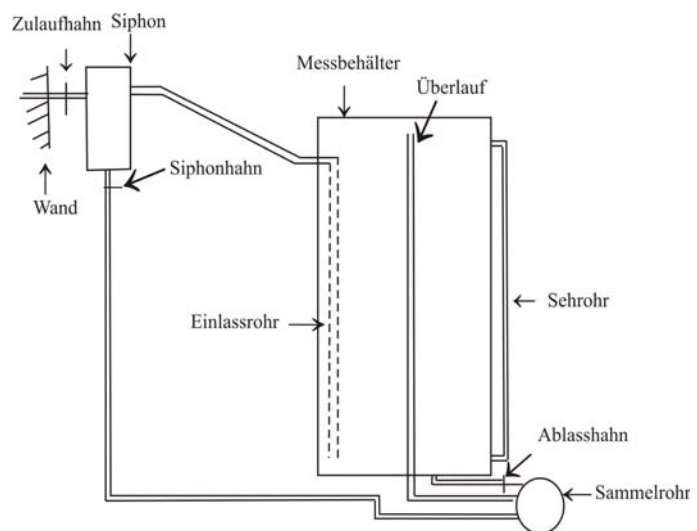


Abb. 2: Konzeption zur Wasserfassung der Testfelder in der Messstation [5]

Die Erfassung der Abflüsse werden i. d. R. dreimal wöchentlich, jeweils montags, dienstags und freitags, realisiert. Bei Starkregenereignissen erfolgen zusätzliche Erfassungen.

Um mit einem ausgeglichenen Bodenwasserhaushalt arbeiten zu können, ist es zwingend, den Bilanzierungszeitraum nicht auf das Kalenderjahr zu beziehen, sondern auf das „Hydrologische Jahr“ festzulegen. Das Hydrologische Jahr (sog. „Abflussjahr“) wird durch den Verlauf der klimatischen Jahreszeiten bestimmt. Eine derartige Verfahrensweise wird in verschiedenen Literaturquellen, z. B. in den GDA-Empfehlungen (Geotechnik für Deponien und Altlasten) für die Anwendung bei der Langzeitauswertung von Testfelddaten auf Deponien (insbesondere beim Vorhandensein einer Klimastation mit exakter Klimabewertung am Standort), ausdrücklich empfohlen [7], [8].

Der Zeitraum des jeweiligen Hydrologischen Jahres beginnt mit dem 01. November des Vorjahres und endet am 31. Oktober. Für eine genaue Bilanzierung ist es zudem vorteilhaft, das Bilanzjahr in ein Hydrologisches Winterhalbjahr von November bis April und ein Hydrologisches Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober zu unterteilen [9].

5 Darstellung und Auswertung der Materialuntersuchungen

Für eine belastbare Langzeitdateninterpretation sind Materialuntersuchungen notwendig. Diese können, ohne die Testfeldmessungen beeinträchtigen zu müssen, an den parallel zu den Testfeldern betriebenen Aufgrabungsfeldern durchgeführt werden. Unter Beachtung der bereits vorliegenden Ergebnisse aus den vorlaufenden Materialeinsatzuntersuchungen und den beiden Aufgrabungskampagnen (1998/99 und 2001) erfolgte im August 2005 eine dritte, den Voruntersuchungen angepasste, Aufgrabung. Zur Bewertung des Materialverhaltens wurden gestörte und ungestörte Zylinderproben aus den Rekultivierungs-, Entwässerungs- und Dichtschichten entnommen und im Labor untersucht.

In Tabelle 1 sind ausgewählte Untersuchungen an den Materialproben aufgezeigt. Die Laboruntersuchungen zur Bodenmechanik erfolgten in Verantwortung der DBI-EWI GmbH Blankenburg mit personeller Unterstützung durch die Hochschule Zittau/Görlitz. Die Notwendigkeit hierzu wurde in der Datenkontinuität und Vergleichbarkeit zu den vorlaufenden Untersuchungen gesehen.

Tab. 1: Darstellung grundlegender Materialuntersuchungen

Bewertungsparameter	Methode bzw. DIN
Bestimmung des Wassergehalts	18 121 T 1
Bestimmung der Korngrößenverteilung	18 123
Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	18 130
Bestimmung der Wasseraufnahme	Methode nach ENSLIN
Proctordichte	18 127
Bestimmung der Dichte des Bodens	18 125 T 2
Bestimmung des Tonmineralgehaltes	Röntgendiffraktometrie DIN EN 13 925-1
Bestimmung der Feldkapazität	DIN 19 682-5

Als Vergleichsbasis für die Bewertung der zeitlichen Veränderungen der Materialkennwerte dienen schwerpunktmäßig die Untersuchungsergebnisse aus den Aufgrabungen 2001, da die vorlaufenden Beprobungen auf die Charakterisierung des Einbauzustandes ausgerichtet waren und auf einem anderen Beprobungs- und Untersuchungsumfang basierten.

Ein entscheidendes Beurteilungskriterium für die zeitliche Veränderung und das Langzeitverhalten der Dichtsysteme stellt die Entwicklung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte über der Zeit dar. Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen an den ungestörten Materialproben sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Die minderwertige mineral. Dichtschicht in Testfeld 1 (sog. „Bürgermeistervariante“) weist als einziges Testfeld eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit auf. Im Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Jahre 2001 ist eine Reduzierung des k_f -Wertes um ca. eine halbe 10er-Potenz nachweisbar (vgl. Tabelle 2). Dies resultiert vermutlich aus Konsolidierungsvorgängen im Dichtmaterial und ggf. aus Kornumlagerungen aus der Rekultivierungsschicht [12].

Teilweise können auch deutliche Erhöhungen der Wasserdurchlässigkeiten bzw. ein deutliches Unterschreiten der Soll-Werte (Einbauwerte/Herstellerangaben) an den Bentonitmatten in den Feldern 4 und 5 festgestellt werden. Es ist jedoch hierbei zu berücksichtigen, dass im Feld 5 der k_f -Wert maßgeblich durch einen mechanischen Sperreffekt der „durchnadelten“ Kupferfolie (Wurzelschutz) erreicht wird. Ursachen für die tendenziellen Erhöhungen der Wasserdurchlässigkeiten aller untersuchten Bentonitmatten sind, z. B. in der fehlenden Auflast (Felder 3, 4, 5, 6 mit 50 cm Überdeckung) sowie in Austrocknungs-, Rissbildungs-, Wurzel-, Frost-, Ionenaustauschprozess- und Bioturbationseinflüssen zu sehen.

Einen fast gleichbleibend konstanten k_f -Wert zeigt die mineral. Dichtung im Testfeld 7 (TASi-Referenzfeld) auf [12]. Es wird ferner deutlich, dass der als Dichtmaterial verwendete „Gut-tauer Ton“ nur äußerst geringfügige Schädigungen erfahren hat. Dabei ist die positive Wirkung der 1 m mächtigen Rekultivierungsschicht, z. B. als Schutzschicht gegen Austrocknung, zu berücksichtigen. Das Dichtmaterial (k_f -Wert: $1,03 \cdot 10^{-10}$ m/s erfüllt die Anforderungen nach TASi/DepV (k_f -Wert: $5 \cdot 10^{-9}$ m/s) vollends.

Tab. 2: Vergleichende Betrachtung der k_f -Werte aus 2001 und 2005

Feld	Schichten	mittlerer k_f -Wert 2001 [m/s]	mittlerer k_f -Wert 2005 [m/s]
1	Rekultivierung	$4,20 \cdot 10^{-8}$	$4,57 \cdot 10^{-8}$
	mineral. Dichtung	$5,70 \cdot 10^{-8}$	$1,71 \cdot 10^{-9}$
3	Rekultivierung	$1,63 \cdot 10^{-7}$	$7,09 \cdot 10^{-7}$
	Ca-Bentonitmatte	ca. 10^{-8}	$8,99 \cdot 10^{-6}$
4	Rekultivierung	$5,40 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-6}$
	Na-Bentonitmatte	ca. 10^{-8}	$1,54 \cdot 10^{-7}$
5	Rekultivierung	$1,03 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$
	Na-Bentonitmatte inkl. Cu-Folie	ca. 10^{-11}	$2,15 \cdot 10^{-9}$
6	Rekultivierung	$8,71 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-6}$
	RAWMAT	ca. 10^{-10}	keine Bestimmung
7	Rekultivierung	$6,90 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-6}$
	mineral. Dichtung	$1,63 \cdot 10^{-10}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$

Die Erhöhungen der Wasserdurchlässigkeiten in den Rekultivierungsschichten der Testfelder 4, 5 und 7 resultieren vermutlich u. a. aus biologischen Einflüssen (Tiere, Pflanzen) und ggf. aus Frosthebungseignissen.

Aufgrund der starken „Aggregatbildung“ der Bentonitmattenprobe aus Testfeld 6 war 2005 keine k_f -Wert-Bestimmung für diese Dichtschicht realisierbar, da die Matte bereits bei geringer mechanischer Beanspruchung (hier Probenahme) brüchig wurde [12].

Eine ausreichende FK bzw. nFK lässt Rückschlüsse auf die Wasserspeicherkapazität des Rekultivierungsbodens zu. Ein „Ausschöpfen“ bzw. Auffüllen der Wasserreserven in der Rekultivierungsschicht nimmt mit steigender nFK einen größeren Zeitraum in Anspruch.

Der Vergleich der Analysenergebnisse (vgl. Tabelle 3) zum Wasserrückhaltevermögen zeigt, dass sämtliche prozentualen Wassergehalte bei einer Saugspannung von $pF > 4,2$ (permanenter Welkepunkt) im Jahre 2005 angestiegen sind. Dies wird u. a. durch geringfügige Erhöhungen der Feinkornfraktion (Ton, Schluff, Feinsand) erklärbar. Des Weiteren bewirkt eine zeitlich ansteigende Lagerungsdichte eine tendenzielle Erhöhung der Wassergehalte des pWP [12].

Dem gegenüber sind alle Wassergehalte bei Saugspannungen von $pF 1,8 - 4,2$ (nutzbare Feldkapazität) gefallen. Die signifikantesten Verringerungen der nFK-Werte sind für die Rekultivierungsböden der Felder 4 und 5 ausweisbar.

Lediglich der Rekultivierungsboden in den Testfeldern 1 und 3 kann eine Zunahme im Bereich der Feldkapazität (FK) aufweisen.

Aufgrund der tendenziell fallenden nFK-Werte aus den Untersuchungen von 2005 ist mit einem größeren Risiko für Austrocknungserscheinungen bzw. Schrumpfrissbildungen zu rechnen.

Tab. 3: Vergleichende Betrachtungen zum Wasserrückhaltevermögen der Rekultivierungsböden

Feld	2001 Wasserrückhaltevermögen [%]			2005 Wasserrückhaltevermögen [%]		
	FK	nFK	pWP	FK	nFK	pWP
1	27,7	18,5	9,2	31,5	13,7	17,8
3	19,5	12,1	7,4	24,7	10,2	14,5
4	29,0	18,9	10,1	23,7	11,3	12,4
5	31,8	19,8	12,0	25,7	11,6	14,1
6	24,6	13,0	11,5	23,0	9,9	13,1
7	23,5	13,5	10,0	23,0	11,4	11,6

Ausschließlich die Bentonitmatten wurden einer Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens unterzogen. Die dazugehörigen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Es werden die Ergebnisse der Wasseraufnahme nach 15 min, 6 h und 24 h angegeben. In der Regel ist die Wasseraufnahme von Bentonit nach 24 h abgeschlossen. Somit können diese Werte für die gesicherte Bewertung und Interpretation verwendet werden [16].

Tab. 4: Darstellung de Wasseraufnahmevermögens aus 2001 und 2005

Feld	2001 Wasseraufnahme [%]			2005 Wasseraufnahme [%]		
	15 min	6 h	24 h	15 min	6 h	24 h
3	137,5	160	195	121,5	135	166,5
4	133,5	205	251,5	97,5	116,5	178,5
5	118,5	323,5	423,5	113	130	177,5
6	157	185	235	146	167,5	215

Markant sind die starken Rückgänge des Wasseraufnahmevermögens der Na-Bentonitmatten aus den Testfeldern 4 und 5. Dies resultiert vermutlich aus dem Ionenaustausch, welcher u. a. durch das geochemische Milieu der Entwässerungs- und Rekultivierungsschicht zurückzuführen ist. Schon bei geringen Ca^{2+} -Ionen-Konzentrationen in der Bodenlösung sind Ionenaustauschprozesse von Na^+ - zu Ca^{2+} -Ionen realistisch. Durch den Austausch des Kations Na^+ durch Ca^{2+} kommt es zu einer geringeren Wasseraufnahmefähigkeit des Tonminerals Montmorillonit im Bentonit und somit zu einem geringeren Quellvermögen. Natrium-Bentonite besitzen i. d. R. ein Quellvermögen von ca. 600 – 800 %. Das Quellvermögen der Ca-Bentonite liegt hingegen bei ca. 200 – 300 % [11].

Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Testfelduntersuchungen im Jahre 2001 und 2005 lassen sich grundsätzliche Aussagen zum materialspezifischen Verhalten der einzelnen Systemkomponenten ausführen. Mittels Durchflussmessungen an den Testfeldern sind die Auswirkungen der zeit-, konzeptions- und standortspezifischen Materialveränderungen anhand von Wirksamkeitsbetrachtungen zudem belegbar.

6 Darstellung und Auswertung der Durchflussmessungen

Tabelle 5 gibt einen Überblick über das kumulative Abflussverhalten der Testfelder im Verhältnis zum Niederschlag. Hierbei wird über den Versuchszeitraum von 6 hydrologischen Jahren ein standortspezifischer Gesamtniederschlag von fast 4.250 mm ausgewiesen. Dies stellt den Wasseranteil dar, welcher als Input in die Wasserhaushaltsbetrachtung einfließt. Um die Wirksamkeit einzelner Systemkomponenten sowie der gesamten Systeme bewerten zu können, werden feldspezifisch die einzelnen Abflüsse (Dränabfluss sowie Abfluss unter

der Dichtung) separat erfasst. Der kumulative Oberflächenabfluss von 3 % wird ausschließlich an Testfeld 4 messtechnisch ermittelt und aufgrund derselben Standortvoraussetzungen (z. B. Neigung, Exposition, Bewuchs, ...) auf alle weiteren Testfelder übertragen. Die Evapotranspiration wird rechnerisch aus der Differenz zwischen Niederschlag und allen Abflüssen ermittelt. Im Mittel kann die Evapotranspirationsrate mit 65 % postuliert werden und liegt in Bereichen, welche an ähnlich gelagerten Standorten gleichfalls ermittelt wurden [15].

Tab. 5: Überblick über die Testfeldergebnisse im Untersuchungszeitraum

Zeitraum		01.11.1999 - 31.10.2005					
Testfeld		1	3	4	5	6	7
Niederschlag (N)	mm	4243					
Oberflächenabfluss ($Q_{\text{Obl.}}$)	mm	141					
	% v. N	3					
Evapotranspiration (berechnet) (ET_a)	mm	2696	2847	2923	2723	2688	2660
	% v. N	64	67	69	64	63	63
Drainabfluss (Q_{Drain})	mm	109	207	322	1209	1099	1393
	% v. N	3	5	8	28	26	33
Abfluss unter der Dichtung (Q_{Dichtung})	mm	1297	1047	856	170	314	49
	% v. N	31	27	36	4	7	1
Wirkungsgrad des Gesamtsystems (η)	%	69	73	64	96	93	99

Den Vergleichsmaßstab zur Beurteilung der alternativen Dichtungssysteme bildet bekanntermaßen das, konform zum Regelsystem der TASI aufgebaute, Feld 7 (TASI-Referenzfeld). Mit einer Wirksamkeit von 99 % über den gesamten Versuchszeitraum von 6 Jahren stellt das TASI-Regelsystem das effektivste Dichtsystem innerhalb der getesteten Varianten dar. Die Wirksamkeit des Systems (Wirkungsgrad η des Dichtsystems) wird dabei in der Differenz des Niederschlags (100 %) zum prozentualen Durchlass unter der Dichtung vereinfacht angegeben.

Signifikant schlechtere Dichtwirkungen zeigen die Felder 1, 3 und 4 auf. Die Wirkungsgrade schwanken zwischen 64 % und 73 %. Die Ursache hierfür ist primär im konzeptionellen Aufbau der Felder zu sehen. Dabei kommen die vorteilhaft wirkenden Eigenschaften einer qualifizierten Rekultivierungsschicht (insbesondere deren Wasserhaushaltsfunktion), aufgrund der geringen Schichtstärke in den Testfeldern 1, 3, 4, 5, 6 nur unzureichend zum Tragen. Des Weiteren tragen Austrocknungs-, Umwandlungs- und Bioturbationseinflüsse sowie Frosteinwirkungen mit Sicherheit zu den erheblichen Wirksamkeitsverlusten bzw. Durchlässigkeitserhöhungen bei.

Die geringeren Wasserdurchtritte in den Feldern 5 und 6 sind in den verwendeten Dichtschichtelementen (Feld 5: Bentonitmatte mit Cu-Folie als Wurzelschutz; Feld 6: modifizierte, feucht eingebaute Bentonitmatte RAWMAT mit 8.000 g/m²) begründet. Es sind Wirksamkeiten von 96 % für Testfeld 5 und 93 % für Testfeld 6 ermittelbar (siehe Tabelle 5). Die Wirksamkeitsunterschiede resultieren u. a. aus den, sich zeitlich komplex überlagernden Einflüssen unterschiedlicher „Stressfaktoren“. Unzureichende Auflastdrücke (z. B. Überdeckung 0,5 m Rekultivierungsboden in den Testfeldern 3, 4, 5, 6) bedingen eine Funktionseinschränkung, da die durch Eigenquellung und ausschließlich seitliche Dehnung bedingte „Selbstheilung“ des Bentonits nur mangelhaft wirksam werden kann [13].

Die Abbildung 3 unterstreicht diese Erkenntnisse (Wirksamkeitsverluste) durch die Darstellung des zeitlichen Verhaltens der unterschiedlichen Abdichtsysteme über dem Untersuchungszeitraum. Für die Felder 1, 3 und 4 ist ein drastisches Absinken der Wirksamkeit auf ein niederes Wirksamkeitsniveau des Abdichtsystems ($< 75\%$) bei steigender Standzeit zu erkennen. Verantwortlich für die Wirksamkeitsverluste sind neben den konkreten Systemaufbauten auch die Verwendung unzureichend aufeinander abgestimmter Komponenten.

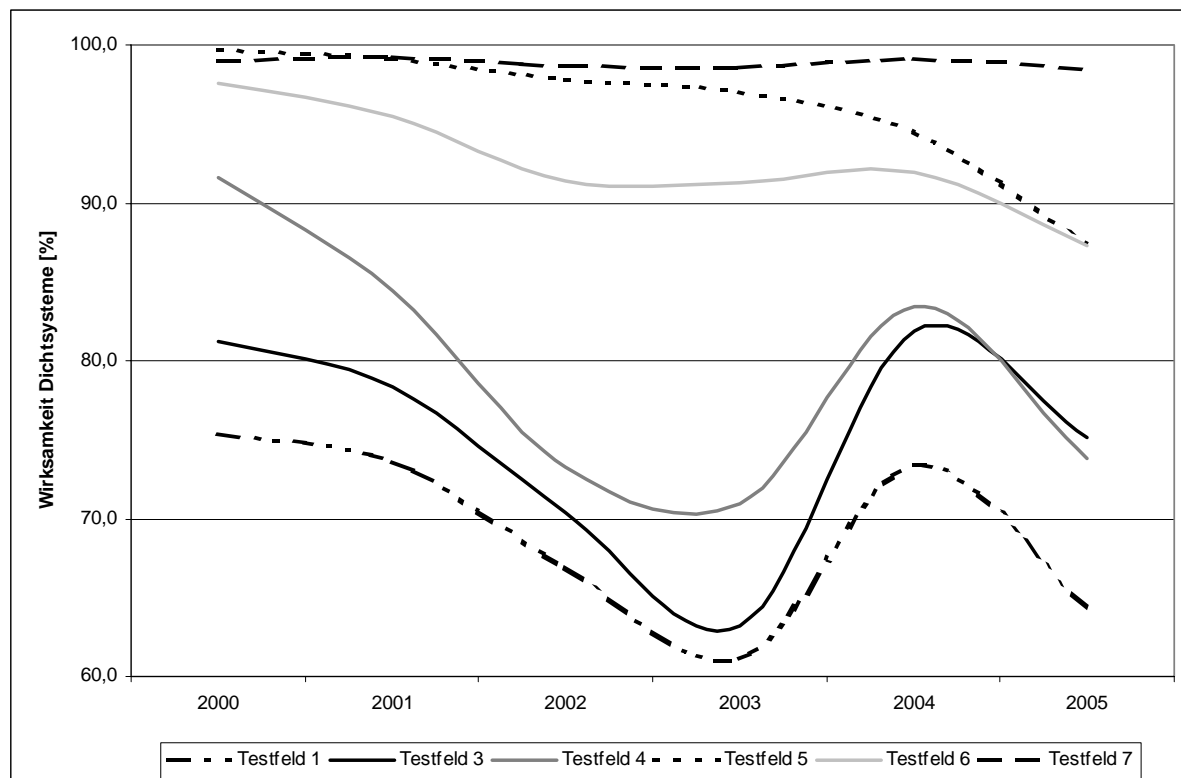


Abb. 3: Wirksamkeit der Dichtsysteme in den Testfeldern

Bei der Betrachtung der einzelnen Testfelder kann aufgezeigt werden, dass das Feld 1 (sog. „Bürgermeistervariante“) einer Abdeckung, aber keiner Abdichtung entspricht. Es wurden 2005 Systemwirksamkeiten von lediglich 65 % erreicht. Das einzelne Dichtelement (minderwertige mineralische Dichtung ohne aufliegende Drainage) weist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur eine Dichtwirkung von ca. 5 % auf (siehe Abb. 3). Die kontinuierliche Verschlechterung der Dichtleistung seit 2000 (siehe Abb. 3) auf fast nur noch 60 % im Jahre 2003 ist u. a. auf Rissbildungen infolge von Austrocknungen sowie biolog. Einflüsse zurückzuführen. Die erheblichen Niederschlagsmengen in dem Jahr 2002 (ca. 860 mm) und die geringmächtige Rekultivierungsschicht (60 cm) mit teilweise unbefriedigendem Bewuchs bedingen dieses starke Nachlassen der Dichtleistung des Gesamtsystems [12]. Das Wasserspeichervermögen des Rekultivierungsbodens war ausgeschöpft, so dass das infiltrierende Niederschlagswasser teilweise ungehindert die Dichtschicht erreichen und in diese Schicht infiltrieren konnte. Die fehlende Dränageschicht begünstigte dies zusätzlich.

Das verhältnismäßig trockene Jahr 2004 (mit einem Jahresniederschlag von 580 mm) zeigt aufgrund eines ausgeglicheneren Wasserhaushalts einen Anstieg der Systemwirksamkeit. Auftreffendes Niederschlagswasser konnte zunächst im Rekultivierungsboden gespeichert und größtenteils über Evapotranspiration wieder in die Atmosphäre abgegeben werden.

Die Nichteignung der in den Feldern 3 (Ca-Bentonitmatte) und 4 (Na-Bentonitmatte) verwendeten Dichtmaterialien als langzeitstabiles Oberflächenabdichtsystem im Vergleich zum TA-

Si-Regelsystem (Testfeld 7), kann unter den klimatischen Rahmenbedingungen und den realisierten Einbaubedingungen sowie geringmächtigen Rekultivierungsschichten vom 50 cm, nachgewiesen werden. Diese Testfelder weisen 2005 eine Dichtwirkung von ca. 75 % (vgl. Abb. 3) auf. Der zeitliche Verlauf der Wirksamkeitskurven in Abb. 3 ist analog zu den Betrachtungen für Testfeld 1 zu bewerten.

Deutlich bessere Dichteigenschaften weisen die Dichtsysteme in den Testfeldern 5 und 6 auf. Es werden Dichtwirkungen von fast 90 % (vgl. Abb. 3) erreicht, wobei anzunehmen ist, dass sich die Materialien durch stetiges „Altern“ tendenziell weiter verschlechtern werden. In den ersten 2 bis 3 Jahren konnten an beiden Testfeldern teilweise sehr geringe Durchflüsse durch das Dichtelement nachgewiesen werden. Am Testfeld 6 sind erste Verschlechterungen im Zeitraum 2001/2002 nachweisbar, die u. a. auf die sehr geringe Überdeckung von 50 cm und der daraus resultierenden starken Beeinflussung von natürlichen Einflussfaktoren (Frost, Pflanzen, Austrocknung, ...) zurückführbar sind.

Das System in Testfeld 5 kann u. a. aufgrund der mechanischen Sperrwirkung der integrierten Wurzelschutzfolie den o. g. Einwirkungen länger standhalten. Ab dem Jahr 2004 zeigen sich am Wirksamkeitsverlauf (in Abb. 3) auch für dieses System signifikante Verschlechterungen. Die Ursachen für die nachlassende Dichtwirkung sind z. B. im ansteigenden k_f -Wert begründet und werden u. a. durch Ionenaustauschprozesse sowie Austrocknungs- und Frosteinflüsse, biologische Einwirkungen und fehlende Auflasten hervorgerufen. Beispielhaft sei erwähnt, dass die Funktionalität einer Bentonitmatte einer Mindestüberdeckung von 100 cm bedarf [13], [14].

Für eine genauere Beurteilung des Langzeitverhaltens sind u. a. spezifische Betrachtungen zu den einzelnen Dichtmaterialien sinnvoll. Abbildung 4 stellt den zeitlichen Verlauf der Dichtelementwirksamkeiten grafisch dar und wird durch die Integration der k_f -Wert-Ermittlungen aus den Materialuntersuchungen 2001 und 2005 ergänzt. Tendenziell verlaufen die Wirksamkeitskurven der Elemente ähnlich denen der Systeme. Deutlich wird jedoch die signifikant schlechteren Dichtleistungen der Einzelelemente. Für die eingebauten Abdichtmaterialien in Feld 1, 3 und 4 können seit dem Einbau ständig sinkende Wirksamkeiten aufgezeigt werden (vgl. Abb. 4). Seit 2001/2002 schwanken die Dichtleistungen fast stetig und liegen tendenziell unter 20 %. Die minderwertige mineral. Dichtung aus Feld 1 wird keine Dichtleistung >10 % mehr erreichen.

Die modifizierte Form einer Bentonitmatte in Feld 6 (vorgefeuchtet eingebaut) zeigt ebenfalls einen größtenteils abnehmenden Kurvenverlauf der Elementwirksamkeit auf, welcher im Jahre 2005 bei geringfügig unter 70 % Dichtleistung angekommen ist. Ursachen hierfür sind hauptsächlich in der geringen Überdeckung, dem größtenteils abgeschlossenen Ionenaustausch und der fehlenden Standsicherheit des integrierten Bentonits (keine vernadelte Bentonitmatte) zu sehen.

In Abbildung 4 wird ebenfalls deutlich, dass die Wirksamkeit des eingebauten TASI-Dichtelementes („Guttauer Ton“) einen, über den gesamten Versuchszeitraum hinweg, konstanten Wirksamkeitsgrad von ca. 98 % aufweist. Die abgestimmte Schichtenfolge oberhalb des Dichtmaterials sowie der sehr gute k_f -Wert von 10^{-10} m/s bedingen das sehr gute Wirksamkeitsverhalten dieses Dichtmaterials. Niederschlagsreiche sowie trockene Jahre sind schadlos und ohne Leistungsverlust überstanden worden.

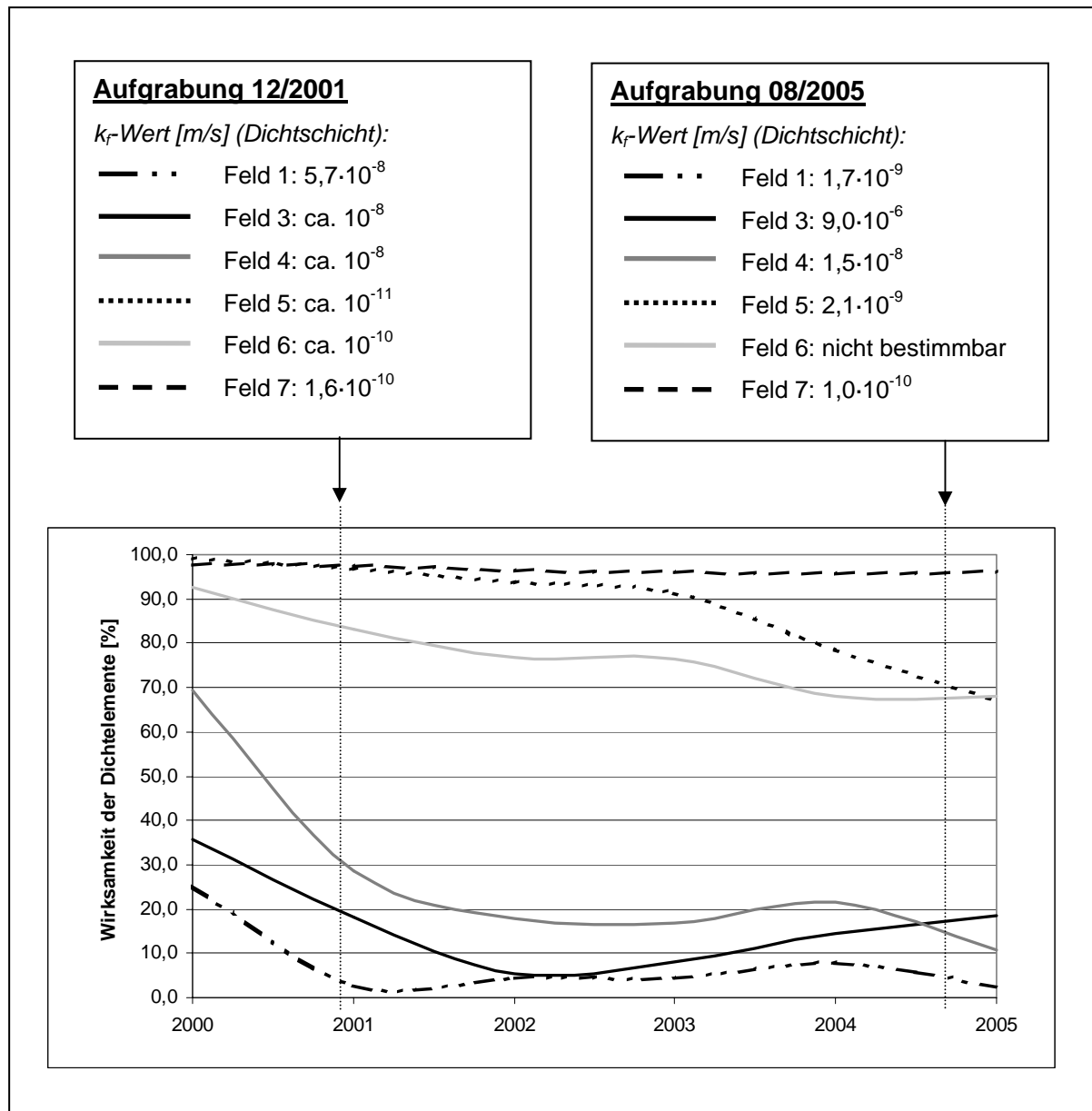


Abb. 4: Wirksamkeit der Dichtelemente in den Testfeldern

Annähernd gleiche bzw. zu Beginn der Testfeldbetrachtungen teilweise sogar bessere Dichtleistungen als das TASI-Dichtelement können für die Bentonitmatte in Testfeld 5 aufgezeigt werden. Hierbei muss der konzeptionelle Aufbau dieser Matte (Cu-Folie) berücksichtigt werden. Neben dem Haupteffekt (Wurzelschutz) wird durch diese Folie auch eine mechanische Sperrwirkung für das Wasser erreicht. Aufgrund des Vernadelungsprozesses bei der Herstellung dieser Bentonitmatte ist diese o. g. Folie jedoch nicht zu 100 % dicht. Jede Vernadelungsstelle stellt eine Perforation und somit eine potentielle Infiltrationsstelle in den Na-Bentonit dar. Über die Zeit betrachtet kommt es somit verzögert zu ersten Wirksamkeitsverlusten auch an dieser Matte. Dies wird im Verlauf der Wirksamkeitskurve in Abb. 4 ab 2003 deutlich. Die hohen Niederschlagsmengen im Jahr 2002 (860 mm) und die sehr geringe Überdeckung (50 cm Rekultivierungsboden) begründen diese sich verschlechternde Tendenz der Dichtleistung. Die Materialuntersuchungen (vgl. Abb. 4) untermauern dies.

Bei einem Vergleich der System- und Elementwirksamkeiten (siehe Abb. 3 und 4) kann die hohe Bedeutung der weiteren Teilkomponenten (Rekultivierungs- und Drainageschicht) im Gesamtsystem eindeutig nachgewiesen werden.

Hieraus wird deutlich, dass die Wirkung des Abdichtsystems bei den o. g. Feldern nicht ausschließlich von der Qualität des Dichtelementes, sondern dem Zusammenwirken aller Systemkomponenten bestimmt wird. Durch den Einsatz geeigneter Elemente und einer angepassten Schichtfolge (Entwässerungs- und Rekultivierungsschicht) sind dichtwirkungsverbessernde oder -ausgleichende Effekte erzielbar. Unter Beachtung von dichtwirkungsverschlechternden aber auch -verbessernden Effekten können hiermit Alterungseffekte in ihren negativen Auswirkungen unter Umständen gemindert werden.

7 Schlussfolgerung

Zum Aufbau von alternativen Oberflächenabdichtungen sind geeignete Systemelemente auszuwählen und diese dann, an die konkreten Standort- und Klimabedingungen angepasst, miteinander zu kombinieren. Insgesamt kann die große systembeeinflussende Rolle der Rekultivierungsschicht nachgewiesen werden. Bei einer Optimierung der Materialzusammensetzung und Schichtstärke kann diese Systemkomponente die alleinige oder komplementäre Dichtfunktion übernehmen bzw. als systemoptimierender dauerbeständiger Teil eines wirkungsvollen Oberflächendichtsystems fungieren.

Beim Einsatz einer Bentonitmatte als alternatives Dichtmaterial ist ein daraufhin abgestimmter Gesamtaufbau zwingend notwendig. Unzureichend aufeinander abgestimmte Systemelemente stellen kein sinnvolles langzeitbeständiges Abdichtsystem dar. Sobald Schädigungen an den Dichtelementen bzw. auch an den Systemen aufgetreten sind, sind diese nicht ohne größere Aufwendungen reparabel. Zusätzlich integrierte mechanische Dichtbarrieren (Cu-Folie in der Bentonitmatte) bilden ebenfalls keine langzeitstabile Dichtkomponente, sondern bewirken lediglich ein zeitverzögertes Verschlechtern der Dichtwirkungen. Aufgrund von geochemischen Einflüssen der Bodenlösung finden am Bentonit, trotz integrierter Cu-Folie, Ionenaustauschprozesse statt, welche ein vermindertes Quellvermögen und somit eine Verschlechterung der Dichtleistung zur Folge haben.

Zur Durchführung von Langzeitstudien unter realen Bedingungen stellen Testfeld- bzw. Lysimeteranlagen eine geeignete Untersuchungsmethodik dar, wobei es sich als äußerst vorteilhaft erweist, wenn eine TASI- und/oder DepV-Dichtvariante unter gleichen Bedingungen als Vergleichs- bzw. Referenzfeld parallel getestet wird. Ausschlaggebend für die Wertung solcher Messergebnisse ist u. a. der homogene Einbau der Rekultivierungsschichten sowie ein relativ einheitlicher Bewuchs. Für das Erreichen der Gesamtzielstellung (Darstellung der Langzeitcharakteristik, Prognosen zum Langzeitverhalten mittels Modellierung, zeitliche Definition der Nachsorgephase, ...) ist eine Laufzeit der Testfeldanlage über möglichst viele Jahre notwendig. Ergänzend dazu sind versuchsbegleitende Materialuntersuchungen sehr sinnvoll und zielführend, da dadurch mehrere Effekte laborativ nachgewiesen werden können. Hierzu hat sich das parallele Betreiben kongruent aufgebauter Aufgrabungsfelder als vorteilhaft erwiesen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] MÜLLER, M.; SCHOENHERR, J. I.; BAUMERT, R.; WERNER, H.: Langzeitauswertung der in-situ-Testfelder auf der Deponie Bautzen-Nadelwitz. In: DRESDNER GRUNDWASSER-FORSCHUNGSZENTRUM e. V. (Hrsg.): Altablagerungen und Deponiestilllegung. Tagungsband zum XV. Sächsischen Altlastenkolloquium, Dresden, 2004
- [2] ARLT, K.-J.; WOLSFELD, N.: Angepasste Oberflächenabdichtungen für Monodeponien der Stahlindustrie. In: Kilchert, M. (Hrsg.): Leipziger Deponiefachtagung 2005 – Sicherung von Deponien und Altablagerungen. Tagungsband zur Leipziger Deponiefachtagung 2005, Leipzig, 2005
- [3] LOHSE, A.: Wasserhaushaltliche Untersuchungen zur Deponie Nadelwitz. Diplomarbeit, Fakultät: Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg, 2002
- [4] MACHATZKY, A.: Erstbewertung und Untersuchung der Testfelder auf der Deponie Bautzen-Nadelwitz. Studienarbeit, MVSR-Forschungslabor, Fachbereich Mathematik / Naturwissenschaften, Hochschule Zittau/Görlitz, 1999
- [5] MACHATZKY, A.: Untersuchungen zum Bau-Wirkungsmechanismus von verschiedenen Abdeck- und Abdichtungssystemen bei Hausmülldeponien. Diplomarbeit, MVSR-Forschungslabor, Fachbereich Mathematik/Naturwissenschaften, Hochschule Zittau/Görlitz, 2000
- [6] MÜLLER, M.: Felduntersuchungen zur Gleichwertigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen für Hausmülldeponien. Diplomarbeit, MVSR-Forschungslabor, Fachbereich Mathematik / Naturwissenschaften, Hochschule Zittau/Görlitz, 2001
- [7] GARTUNG, E.: Empfehlungen zum Qualitätsmanagement. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (Hrsg.): GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten. 3. Aufl., Ernst & Sohn Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften, Berlin, 1997
- [8] DYCK, S.; PESCHKE, G.: Grundlagen der Hydrologie. 3. Auflage, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1995
- [9] WWW.WISSENSCHAFT.DE: Hydrologisches Jahr.
<www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geo/50>, recherchiert am 26.05.2004
- [10] SÄNGER F.; FEUSTEL J.: Prüfbericht – Aufgrabungen der Versuchsfelder am Bauvorhaben Deponie Nadelwitz. Int. Bericht vom 02.11.1999, DBI-EWI GmbH, Blankenburg, 1999
- [11] SÄNGER F.; FEUSTEL J.: 2. Prüfbericht – Aufgrabungen der Versuchsfelder am Bauvorhaben Deponie Nadelwitz. Int. Bericht vom 19.02.2002, DBI-EWI GmbH, Blankenburg, 2002
- [12] SCHOENHERR, J. I.; MÜLLER, M.; BAUMERT, R.; BALOUN, T. A.; SÄNGER, F.; FEUSTEL, J.: Langzeitbewertung von alternativen Deponieoberflächensicherungsvarianten. aFuE-Bericht: 604903, Landesamt für Umwelt und Geologie Dresden, Dresden 2005
- [13] REUTER, E.: Langzeitmessung zur Dichtwirkung vernadelter Bentonitmatten – Erfahrungen aus 7 Jahren Lysimetermessungen. Wissenschaftliche Schriften der Hochschule Zittau/Görlitz (in Vorbereitung), Tagungsband zum Deponieworkshop Zittau-Liberec 2005, Zittau, 10./11.11.2005

-
- [14] HEYER, D.; SAATHOFF, F.; EGLOFFSTEIN, T.; FLÜGGE, F.; HEIBAUM, M.; HOLZLÖHNER, U.; SÄNGER, F.; SCHMIDT, R.; SEDLMAIR, G.; SIEGMUND, M.; WILHELM, L.; ZANZINGER, H.: Empfehlungen zur Anwendung geosynthetischer Tondichtungsbahnen EAG-GTD. 1. Auflage, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2002
- [15] MARKWARDT, N.; REUTER, E.; KILCHERT, M.; HEGEWALD, K.-D.: Ausgeführte Oberflächenabdichtungen/Oberflächenabdeckungen in Sachsen-Anhalt; Aufgrabungsergebnisse und langjährige Wasserhaushaltsmessungen. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): 15. Nürnberger Deponieseminar – 2004 – Abdichtung, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Heft 82 der Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Nürnberg, Eigenverlag LGA, Nürnberg, 2004
- [16] EGLOFFSTEIN, T.: Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. Band 3, ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe, 2000