

Barbara-Gespräche Payerbach 1998	Band 5	"Abfallentsorgung aus erdwissenschaftlicher Sicht" "Klima - Entwicklung"	Seite 57 - 78 Abb 1 - 5	Payerbach 2001
-------------------------------------	--------	---	----------------------------	-------------------

BARBARA-GESPRÄCHE

Payerbach 1998

In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen

(Mineralische Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Bentonitmatte,
Kapillarsperre)

S. MELCHIOR



Payerbach,
18. September 1998

INHALT

Zusammenfassung	59
1 Einleitung	59
2 Untersuchungskonzept	60
3 Wasserbilanzen	61
4 Wirksamkeit der Dichtungen	62
4.1 Bindige mineralische Dichtung	62
4.2 Bentonitmatte	65
4.3 Kapillarsperre	66
4.4 Kombinationsdichtung	68
5 Schlussfolgerungen	69
Dank	70
Literatur	70
Diskussion	71

Anschrift des Verfassers:

Dr. Stefan MELCHIOR

IGB Ingenieurbüro für Grundbau, Bodenmechanik und Umwelttechnik

Heinrich Hertz Straße 116

D-22083 Hamburg

In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen

(Mineralische Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Bentonitmatte,
Kapillarsperre)

S. MELCHIOR

Zusammenfassung

Seit 1986 werden unterschiedliche Abdecksysteme in situ auf der gesicherten Altlast Hamburg-Georgswerder untersucht. Die Wasserbilanzen von acht Jahren sind verfügbar. Die Wirksamkeit der unterschiedlichen Dichtungen wurde in Testfeldern durch direkten Auffang der Dichtungsdurchsickerung auf Flächen von 100 m² bis 500 m² gemessen. Kombinationsdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen über mineralischen Dichtungen haben sich am besten bewährt. Eine erweiterte Kapillarsperre funktioniert ebenfalls zufriedenstellend. Die Wirksamkeit der untersuchten bindigen mineralischen Dichtungen (ohne bedeckende Kunststoffdichtungsbahnen) hat demgegenüber innerhalb von fünf Jahren infolge Austrocknung, Schrumpfung und Durchwurzelung sehr stark abgenommen. Die jährliche Durchsickerung schwankt seither zwischen 150 mm/a und 200 mm/a. Rund 50 % des Wassers, das die Entwässerungsschicht oberhalb der mineralischen Dichtungen erreicht, sickern durch die Dichtungen. Die max. Durchlässigkeit hat von $2 \cdot 10^{10} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf rund $4 \cdot 10^8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zugenommen. Seit 1994 werden auch zwei Bentonitmattentypen unter Feldbedingungen getestet. Die Ergebnisse sind enttäuschend. Die Bentonitmatten sind im ersten Sommer nach ihrer Quellung stark ausgetrocknet und rissig geworden. An den Bentoniten wurde ein Austausch der Natriumionen gegen Calciumionen festgestellt. Die Wiederbefeuchtung der Matten hat nicht zu einer Schließung der Risse geführt. Seither sickern jährlich selbst in niederschlagsarmen Jahren 130 mm/a bis 160 mm/a durch die Matten.

1 Einleitung

Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten haben vielfältige Aufgaben. Üblicherweise sollen sie die direkte Aufnahme von Schadstoffen durch Menschen, Tiere oder Pflanzen verhindern und sowohl die unkontrollierte Gasmigration als auch die Infiltration von Niederschlagswasser minimieren. Der Aufbau von Abdecksystemen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Beim Entwurf zu berücksichtigen sind die Witterungsbedingungen am Standort, die geomechanischen Verhältnisse, die von der belasteten Fläche ausgehende Umweltgefährdung, die am Standort geplante Nachnutzung und auch die Kosten der Maßnahme. Entsprechend vielseitig sind die jeweiligen technischen Lösungen. Standorte, die gewerblich oder industriell genutzt

werden sollen, können beispielsweise an der Oberfläche durch Asphaltbeton versiegelt werden. Meist wird jedoch auf Altlasten und Altdeponien eine Begrünung gefordert.

Eine begrünbare Abdeckung hat üblicherweise einen mehrschichtigen Aufbau. Ein erosionsbeständiger Oberboden, die sogenannte Re-kultivierungsschicht, soll die Vegetation mit Nährstoffen und Wasser versorgen. Darunter folgen mehrere Schichten, die entweder Wasser oder Gas seitlich abführen sollen (Entwässerungsschicht, Gasdrainage), oder eine vertikale Barriere gegen den Transport von Wasser und Gas bilden (Dichtungen).

Der Funktionszeitraum einer Oberflächenabdichtung ist im Vergleich zu anderen Ingenieurbauwerken lang. Die Anforderungen

variieren von einigen Dekaden bis zu Hunderten von Jahren. Obwohl es umfangreiche praktische Erfahrungen mit dem Entwurf und mit der Herstellung von Oberflächenabdichtungen gibt, ist wenig über ihre Langzeitbeständigkeit bekannt. Abdecksysteme sind, anders als Basisabdichtungen von Deponien, einer Vielfalt von Umwelteinflüssen ausgesetzt (z. B. Erosion, Frost, Erwärmung, Austrocknung, Durchwurzelung und Durchwühlung, Einwirkung und Fällung von Kolloiden, Hydroxyden, Karbonaten). Hinzu kommen Einwirkungen, die aus dem Abfallkörper resultieren (Deponiegas und Gaskondensat, belastete Staufflüssigkeit, Setzungsdifferenzen). Das Langzeitverhalten eines Abdecksystems kann daher nicht allein auf der Grundlage von theoretischen Überlegungen oder von Laboraten vorhergesagt werden. Aus diesem Grunde wurde auf der Altlast Hamburg Georgswerder eine Versuchsanlage konzipiert, hergestellt und über zehn Jahre lang betrieben, um unterschiedliche mehrschichtige Abdecksysteme in situ untersuchen zu können. Unter jeweils einer Rekultivierungsschicht und einer Entwässerungsschicht wurden die folgenden Dichtungen getestet:

Bindige mineralische Dichtung,

Betonitmatte,

Verbunddichtung aus bindiger mineralischer Dichtung über Kapillarsperre („erweiterte Kapillarsperre“) und

Kombinationsdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn über bindiger mineralischer Dichtung.

2 Untersuchungskonzept

Die Deponie Hamburg-Georgswerder wurde 1979 geschlossen und von 1986 bis 1995 mit einem mehrschichtigen Abdecksystem gesichert (Aufbau der Abdeckung von oben nach unten: Rekultivierungsschicht / Entwässerungsschicht / Kombinationsdichtung / Ausgleichsschicht und Gasdränage). Die wichtigsten Daten der nunmehr gesicherten Altlast (nach Umweltbehörde Hamburg 1995): Grundfläche 44 ha, Höhe 40 m, mittlere Setzungen

1992 10 cm/a, Deponieinhalt 7 Mio. m³ Haus- und Sperrmüll sowie rund 3 % hochtoxische, flüssige Industrieabfälle. Die Gasfassung nahm von 600 m³/h (1986) auf 300 m³/h (1995) ab. Die Temperatur innerhalb des Deponiekörpers beträgt rund 35° C. Die Gras- und Krautvegetation der Abdeckung wird zweimal jährlich geschnitten. 1995 wurden Sträucher, Büsche und Bäume in ausgewählten Abschnitten der Abdeckung gepflanzt. Das Klima Hamburgs ist humid und gemäßigt. Der Niederschlags-eintrag betrug zwischen 1988 und 1995 durchschnittlich 865 mm/a. Die Niederschläge waren gleichmäßig über das Jahr verteilt. Die Niederschlagsintensität ist üblicherweise gering (maximal 3 mm in 10 Minuten, selten über 10 mm/h). Das langjährige Mittel der Lufttemperatur beträgt 8,7° C mit durchschnittlichen Werten von 0,1° C im Januar und 17,5° C im Juli. Im Mittel liegt das Tagesmaximum der Temperatur an 23 Tagen des Jahres oberhalb von 25° C, und 25 Tage pro Jahr haben eine maximale Lufttemperatur unter 0° C. Die durchschnittliche potentielle Evapotranspiration nach HAUDE beträgt 540 mm/a.

1987 wurden sechs Testfelder mit einer Größe von 10 m x 50 m in den Nordhang der Deponieabdeckung integriert, um den Wasserhaushalt und die Wirksamkeit unterschiedlicher Abdecksysteme zu untersuchen. Der Schichtaufbau dieser Testfelder ist in Abb. 1 dargestellt. Die Felder mit der Bezeichnung F haben eine Hangneigung von 4 %, die „steilen“ Felder S sind 20 % geneigt. Alle Felder wurden nach dem Stand der Technik hergestellt. Es wurden die gleichen Materialien und Qualitätssicherungsprogramme eingesetzt wie bei der Herstellung der Abdeckung der Gesamtdeponie. Die Dichtungen wurden großflächig eingebaut. An den Testfeldgrenzen gibt es keine die Dichtung durchdringenden Fremdstoffe. Auf diese Weise wurde die Bildung von künstlich geschaffenen Fließwegen für Wasser verhindert (näheres zur Herstellung der Testfelder in Melchior 1993). Das Meßprogramm der Testfelder umfaßt meteorologische und bodenhydrologische Parameter und die direkte Messung folgender Abflüsse: Oberflächenabfluß, seitlicher Abfluß im Oberboden, seitlicher Abfluß in der Entwässerungsschicht auf der Dichtung, Durchsickerung der

Dichtsicht. Letztere wird in kiesgefüllten Auffangwannen unter den Dichtungen gefaßt. Die Rekultivierungsschicht und die Entwässerungsschicht sind auf diesen sechs Testfeldern gleichartig aufgebaut. Die Rekultivierungsschicht (0,75 m) besteht aus sandigem Lehm (25 % < 0,063 mm, 1,1 % organischer Kohlenstoff). Die Entwässerungsschicht (0,25 m) besteht aus einer Sand-/Kiesmischung (9 % < 0,63 mm, 47 % zwischen 0,63 mm und 2 mm, 38 % zwischen 2 mm und 6,3 mm, 6 % > 6,3 mm) mit 8,8 % CaCO₃. Die Speicherkapazität für pflanzenverfügbares Wasser beträgt in der Rekultivierungsschicht und der Entwässerungsschicht zusammen 105 mm. Die einzelnen Felder unterscheiden sich in der Art der Dichtung, die jeweils untersucht wird (bindige

mineralische Dichtung, Kombinationsdichtung und erweiterter Kapillarsperre).

1994 wurden zwei weitere Testfelder mit den Bezeichnungen B 1 und B 2 installiert. Sie haben eine Größe von jeweils 100 m² und ein Gefälle von rund 8 %. Auf ihnen wird die Wirksamkeit der beiden Bentonitmatten Bentofix D 3000 und NaBento unter einer geringmächtigen Abdeckung von 0,3 m Rekultivierungsschicht und 0,15 m Entwässerungsschicht untersucht. Die Bentonitmatten Gundseal, Bentomat und Claymax SP 500 wurden zusätzlich in drei kleinen Beobachtungsfeldern unter einer gleichartigen Abdeckung, jedoch ohne Auffangmöglichkeit für die Durchsickerung der Matten installiert.

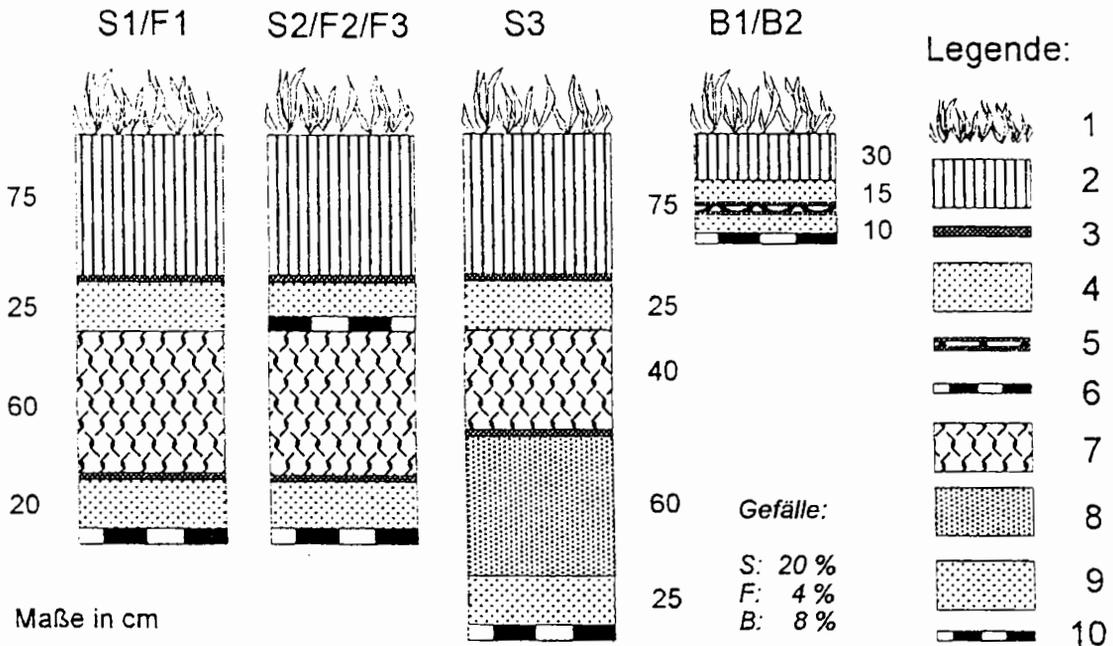


Abb. 1: Schichtaufbau der Testfelder

(Legende: 1: Vegetation, 2: Rekultivierungsschicht, 3: Geotextil, 4: Entwässerungsschicht, 5: Bentonitmatten, 6: Kunststoffdichtungsbahn (PEHD, 1,5 mm), 7: Bindige mineralische Dichtung, 8: Kapillarschicht, 9: Kapillarblock (nur auf S3), 10: Kunststoffdichtungsbahn des Auffangdräns)

3 Wasserbilanzen

Die Wasserhaushaltsdaten der Testfelder sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Verdunstung (Evapotranspiration) und der seitliche Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der Dichtungen sind die dominierenden Parameter der Wasserbilanz. Nennenswerter Oberflächenabfluß fand lediglich im ersten Jahr

nach der Herstellung der Testfelder bei einer noch schüttereren Vegetationsbedeckung statt. In den Folgejahren war der Oberflächenabfluß äußerst gering und von der Hangneigung unabhängig. Allerdings traten in den acht Jahren des Meßzeitraumes ungewöhnlich wenige Ereignisse mit intensiven Starkregen oder Schneeschmelzen auf.

Seitlicher Abfluß in der Rekultivierungsschicht wurde lediglich bei steiler Hangneigung beobachtet und beschränkte sich auch dort auf nur wenige Millimeter pro Jahr (maximale Flußraten von rund 0,4 mm/d oder 0,1 mm/h). Der Entwässerungsschichtabfluß und die Verdunstung variieren von Jahr zu Jahr und zwischen den einzelnen Testfeldern. Im allgemeinen ist die Höhe des jährlichen Drainageabflusses von der Hangneigung unabhängig (Maxima 40 mm pro Woche und 39 mm pro Woche auf den Feldern S bzw. F). Die kurzfristigen Flußraten sind jedoch auf den steilen Feldern deutlich höher als auf den flachen Feldern (Maxima rund 23 mm/d oder 3,7 mm/h bei den Feldern S und 15 mm/d und 0,9 mm/h bei F). Die jährliche Verdunstung ist auf den flachen Feldern höher als auf den steilen Feldern, da die Einstrahlung im Winter, Frühjahr und Herbst dort höher ist. Entsprechend sind die jährlichen Abflußraten in der Entwässerungsschicht auf den flachen Feldern etwas geringer als bei den steilen Feldern.

4 Wirksamkeit der Dichtungen

4.1 Bindige mineralische Dichtung

Bindige mineralische Dichtungen wurden auf drei Testfeldern untersucht. Auf den Feldern F1 und S1 wurden drei Lagen, auf S3 zwei Lagen à 0,2 m Geschiebemergel eingebaut und verdichtet, so daß sich eine Gesamtmächtigkeit von 0,6 m (S1, F1) bzw. 0,4 m (S3) ergibt. Die mineralische Dichtung hat die folgenden Eigenschaften (Mittelwerte): 17 % Ton, 26 % Schluff, 52 % Sand und 5 % Kies; kein organischer Kohlenstoff; 9,8 % CO₃; 50 % der Tonminerale sind Illit, 30 % Smektit, 20 % Chlorit und Kaolinit; Fließgrenze 20,4 %; Plastizitätszahl 9,8; Konsistenzzahl 0,8; Trockendichte 1,950 g/cm³, Wassergehalt 12,1 % der Trockenmasse oder 23,6 Vol.-%; Proctordichte 2,039 g/cm³; optimaler Wassergehalt 9,6 %; Verdichtung > 95 % Proctordichte auf der nassen Seite des optimalen Wassergehaltes; Porenvolumen 27,0 %; Sättigungszahl 0,87; geometrisches Mittel des Labordurchlässigkeitswertes $2,4 \cdot 10^{-10}$ m/s. Aufgrund seines gestuften Kornaufbaues, seines geringen Ton-

gehaltes und der Dominanz relativ inaktiver Tonminerale ist der Geschiebemergel im Vergleich zu anderen „Tondichtungen“ wenig schrumpfanfällig.

Abb. 2 zeigt die Abflüsse in der Entwässerungsschicht oberhalb der Geschiebemergeldichtung und die Dichtungsdurchsickerung (der Maßstab der beiden Y-Achsen unterscheidet sich um den Faktor 10). Der Drainageabfluß oberhalb der Dichtung ist im Frühjahr und Winter hoch, im Sommer gering bis ausbleibend. In den ersten 20 Monaten nach der Herstellung der Dichtung war die Dichtungsdurchsickerung sehr gering. Im August 1989 nahm sie jedoch sprunghaft zu, nachdem ein ergiebiges Niederschlagsereignis zu einem schwachen Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der Dichtung geführt hatte. Von diesem Zeitpunkt an hatten die beiden Abflüsse oberhalb und unterhalb der Dichtung einen sehr ähnlichen Verlauf.

Erläuterungen zu Tabelle 1 (rechts):

S1, S2, S3, F1, F2, F3: Testfeldbezeichnung (Schichtaufbau siehe Abb. 1);

Oberflächenabfluß nur auf S1 und F1 gemessen (Daten auf S2, S3 bzw. F2, F3 extrapoliert);

II: Lateraler Abfluß in der Rekultivierungsschicht (auf allen Feldern gemessen kein Abfluß auf F1, F2, F3);

III: Lateraler Abfluß in der Entwässerungsschicht oberhalb der Dichtung;

IV: Unterhalb der Dichtungen aufgefangenes Wasser (= V + VI auf S3);

V: Lateraler Abfluß innerhalb der Kapillarschicht (nur auf S3);

VI: Vertikale Versickerung in den Kapillarblock (nur auf S3);

ET+dW: Aktuelle Verdunstung und Änderung des Bodenwasservorrats.

mm/a		1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	Mittel
Niederschlag		854.8	713.9	917.3	744.1	853.7	1032.3	1019.9	780.2	864.5
Oberflächenabfluß S1		19.6	1.8	0.9	0.6	0.6	1.0	0.8	0.2	3.2
Oberflächenabfluß F1		5.5	1.2	1.9	1.0	1.7	3.3	1.9	1.0	2.2
Bindige mineralische Dichtung										
S1	II	5.8	2.5	4.1	2.3	4.2	5.3	5.2	3.5	4.1
	III	385.8	246.5	317.9	176.9	289.4	343.1	343.8	229.4	291.6
	IV	1.9	3.1	13.3	13.5	48.1	136.2	150.4	149.8	64.5
	ET+dW	441.7	460.0	581.1	550.8	511.4	546.7	519.7	397.3	501.1
F1	III	368.0	182.7	286.4	187.2	226.2	253.4	246.6	155.5	238.3
	IV	7.0	7.8	17.5	8.8	102.7	174.0	165.8	163.5	80.9
	ET+dW	474.3	522.2	611.5	547.1	523.1	601.6	605.6	460.2	543.1
S3	II	12.1	6.2	8.3	5.2	7.6	8.0	7.4	5.9	7.6
	III	395.9	233.8	318.8	200.1	278.6	263.2	248.4	150.6	261.2
	V+VI	8.4	13.9	31.0	32.5	116.8	171.0	184.0	201.4	94.9
	ET+dW	418.8	458.2	558.3	505.7	450.1	589.1	579.3	422.1	497.6
Erweiterte Kapillarsperre										
S3	V	8.4	13.9	31.0	32.5	101.7	169.9	172.0	152.7	85.3
	VI	0.0	0.0	0.0	0.0	15.1	1.1	12.0	48.7	9.6
Kombinationsdichtung (Kunststoffdichtungsbahn über mineralischer Dichtung)										
S2	II	13.2	5.9	8.5	5.3	8.3	10.8	9.7	6.8	8.6
	III	354.8	236.6	320.9	191.6	329.8	389.9	388.7	296.6	313.6
	IV	0.6	0.3	0.5	0.7	1.0	1.7	3.0	2.8	1.3
	ET+dW	466.6	469.3	586.5	545.9	514.0	628.9	617.7	473.8	537.8
F2	III	293.2	156.4	262.9	170.9	313.2	412.2	409.0	309.7	290.9
	IV	3.5	0.6	0.4	0.5	0.8	1.3	1.8	1.7	1.3
	ET+dW	552.6	555.7	652.1	571.7	538.0	615.5	607.2	467.8	570.1
F3	III	367.3	155.3	262.1	168.2	325.9	481.1	431.4	328.0	314.9
	IV	4.1	1.4	2.6	2.0	3.5	5.0	5.2	5.2	3.6
	ET+dW	477.9	556.0	650.7	572.9	522.6	542.9	581.4	446.0	543.8

Tabelle 1: Wasserhaushalt der Testfelder auf der Altlast Hamburg-Georgswerder in mm/a (bilanziert auf Kalenderjahre)

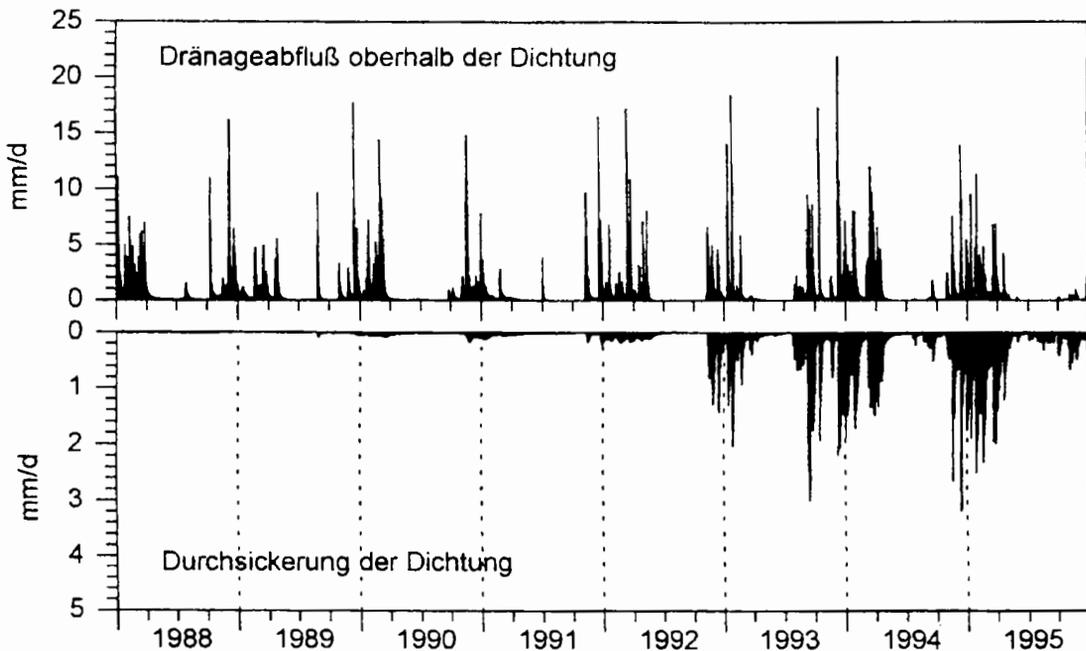


Abb. 2: Bindige mineralische Dichtung auf Testfeld S1: Seitlicher Abfluß in der Entwässerungsschicht und Durchsickerung der Dichtung

Das Abflußverhalten und die Ergebnisse eines Tracerversuches bewiesen die Existenz kontinuierlicher, bevorzugter Wasserleitbahnen in der Dichtung, die eine schnelle Versickerung erlauben. Im Herbst 1992 nahm die Dichtungsdurchsickerung nochmals heftig zu.

Die Maximalwerte der Dichtungsdurchsickerung haben auf Testfeld S1 wie folgt zugenommen:

1988/89:	$1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$
1990/91:	$2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$
1993/94:	$4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Auf Feld F1 haben die maximalen Flußraten eine ähnliche Entwicklung durchlaufen und erreichten 1993 $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Die gemessenen bodenhydrologischen Daten (Wassergehalt und Matrixpotential) zeigen deutlich, daß aufwärts gerichteter Wassertransport in die im Sommer trockenen Entwässerungs- und Rekultivierungsschichten die Austrocknung der Dichtungen und in der Folge die Bildung von Rissen verursacht haben (näheres in MELCHIOR 1993 und 1996).

1993 und 1995 wurden Aufgrabungen der mineralischen Dichtungen durchgeführt. Dabei zeigten sich in Dichtungen, die noch nicht von Pflanzenwurzeln durchwurzelt waren (Feld F1), schmale Risse, die mit bloßem Auge kaum zu erkennen waren. Auf Feld S1 wurden 1995 sehr viel drastischere Schäden sichtbar. Pflanzenwurzeln waren massiv in den Dichtungen eingedrungen und hatten diese in ihrer gesamten Mächtigkeit bis in eine Tiefe von 1,6 m unter Geländeoberfläche durchwurzelt (z. B. *Lotus corniculatus*, *Cirsium* spp., *Rumex* spp., *A Armoracia rusticana*). Der Geschiebemergel war spröde, sehr hart und sehr trocken und von Rissen mit mehreren Millimetern Breite durchzogen. Abb. 3 zeigt die Austrocknung der Dichtung zwischen 1987 (Einbau) und 1995 (Aufgrabung). Der 1995 gemessene mittlere Wassergehalt (14,4 Vol.-%) liegt deutlich unter dem Wassergehalt, der im Labor bei der Bestimmung der Wasserretentionsfunktion bei Wasser spannungen von 3.000 hPa (22,6 Vol.-%) und 15.000 hPa (17,7 Vol.-%) festgestellt wird. Daher müssen in der Dichtung während des sehr trockenen Sommer 1995 entsprechend hohe Wasserspannungen geherrscht haben. Diese Wasserspannungen wirken im Boden als Zugspannungen und verursachen die Bildung der Schrumpfrisse.

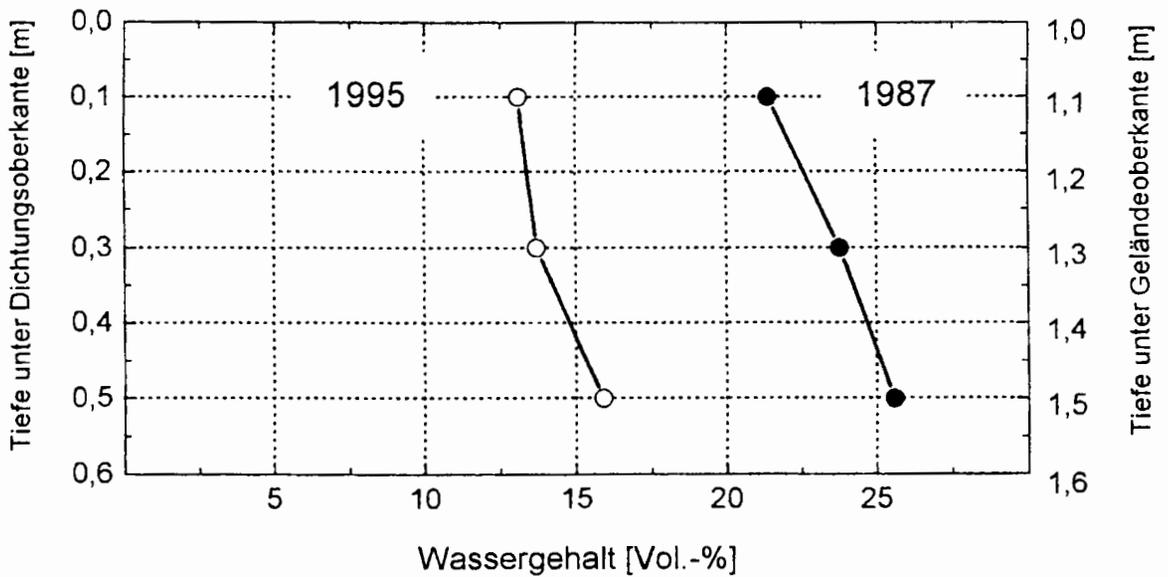


Abb. 3: Wassergehalt der bindigen mineralischen Dichtung auf Feld S1 beim Einbau 1987 und bei der Aufgrabung 1995

Die Abfolge der zunehmend trockeneren Sommer von 1989, 1992 und 1995 hat zu steigenden Durchsickerungsraten der Dichtungen in den darauffolgenden Wintern geführt. Von 1993 bis 1995 sind 136 mm/a bis 202 mm/a durch die mineralischen Dichtungen gesickert (vgl. Tabelle 1: Fluß „IV“ der Felder F1 und S1, Fluß „V + VI“ auf S3). Die Summe des seitlichen Abflusses in der Entwässerungsschicht (Fluß „III“) und der Dichtungsdurchsickerung repräsentiert die potentielle Versickerung in den Deponiekörper. 1995 sind im Mittel 49 % dieser potentiellen Versickerungsrate tatsächlich durch die Dichtungen versickert.

4.2 Bentonitmatte

Bentonitmatten werden in Deutschland seit Anfang der 90er Jahre vermarktet. Sie werden für eine Vielzahl geotechnischer Anwendungen einschließlich der Abdeckung von Altlasten angeboten. Laborversuche haben gezeigt, daß die Wasserdurchlässigkeit gequollener Bentonitmatten auch nach einigen Trocken-Naß-Zyklen sehr gering bleibt. Angesichts der Austrocknungsgefährdung, denen bindige mineralische Dichtungen im Feld unterliegen, bestand jedoch die Frage, ob die

unter Feldbedingungen auftretenden Einwirkungen (z.B. Pflanzenwurzeln, im Bodenwasser gelöste Ionen, Kolloide und Hydroxide, vom Laborversuch abweichende Geschwindigkeit und Intensität von Austrocknung und Wiederbefeuchtung) das Verhalten der Bentonitmatten beeinflussen würden. Daher wurden im April 1994 zwei weitere Testfelder und drei Beobachtungsfelder installiert. Die Bentonitmatten wurden in diesen Feldern unter einer relativ dünnen Überdeckung untersucht. Die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht beträgt 0,3 m (sandiger Lehm, 4 % organischer Kohlenstoff) und 0,15 m Entwässerungsschicht (Kies, 1 mm bis 8 mm). Diese geringmächtige Überdeckung wurde aus zwei Gründen gewählt. Erstens werden Bentonitmatten in Abdecksystemen für Altlasten unter ähnlich geringmächtigen Überdeckungen eingesetzt. Zweitens sind Feldversuche zeitaufwendig. Aus den Versuchen an bindigen mineralischen Dichtungen ist bekannt, daß die Durchwurzelung und Austrocknung in trockenen Jahren bis in tiefe Bodenschichten reicht. Durch eine geringmächtige Überdeckung der Bentonitmatten wird deren Durchwurzelung und Austrocknung beschleunigt und sichergestellt, daß die für die Untersuchung maßgeblichen Einwirkungen innerhalb kurzer Zeit und nicht erst nach u.U. vielen Jahren auftreten.

Für die Versuche in den Testfeldern, in denen die Durchsickerung der Matten direkt gemessen wird, wurden zum einen eine vernadelte Bentonitmatten (Bentofix D 3000 mit natürlichem Natriumbentonit, Naue Fasertechnik) und eine vernähte Bentonitmatten (NaBento mit aktiviertem Calciumbentonit, Huesker Synthetic) ausgewählt. Die amerikanischen Bentonitmatten wurden in den Beobachtungsfeldern installiert, die keine Auffangwannen unter den Matten aufweisen. Das Untersuchungskonzept und der Aufbau der Testfelder wurde mit den Herstellern der Matten bzw. deren deutschen Vertriebspartnern vor Beginn der Studie abgestimmt.

Der durchschnittliche Wassergehalt der Bentonitmatten betrug bei der Installation im April 1994 10,4 Gew.-%. Im November 1994 waren die Bentonitmatten gequollen (der Wasserhalt von Bentomat und Claymax betrug 138 Gew.-% bzw. 152 Gew.-%; aus den anderen Matten wurden keine Proben entnommen) Pflanzenwurzeln hatten die Bentonitmatten zu diesem Zeitpunkt bereits erreicht. Der Sommer 1995 war in Hamburg extrem trocken (die Wassergehalte lagen in der Rekultivierungsschicht und der Drainage bei 5 Vol.-% bzw. 1 Vol.-%). Die Wasserspannung überschritt in den Bentonitmatten den Meßbereich von Tensiometern. Die gemessenen Wassergehalte von 29 Gew.-% (Bentomat) und 37 Gew.-% (Claymax) belegen ebenfalls die Austrocknung der Bentonitmatten. Im Herbst und Winter 1995 wurden die Bentonitmatten wieder befeuchtet und erreichten Wassergehalte > 100 Gew.-%. Der Bodenfrost drang im Winter nicht bis zu den Bentonitmatten vor. Visuelle Inspektionen von Bentomat und Claymax im Sommer 1995 und von Bentofix und NaBento in Frühjahr 1996 zeigten eine deutliche Bodenstruktur innerhalb der Bentonitlagen mit bis zu 2 mm breiten Rissen zwischen den Bentonitaggregaten, die rund 1 cm Durchmesser aufwiesen.

Die charakteristische Eigenschaft von Bentonitmatten ist ihre Fähigkeit zur Rehydratisierung und Quellung. *Abb. 4* zeigt die Niederschlagsdaten und die Durchsickerung der Bentonitmatten bis zum Frühjahr 1997. Beide Bentonitmatten der Felder B1 und B2 funktionierten im ersten Winter (0,0 mm/a und 4,1

mm/a Durchsickerung durch Bentofix bzw. NaBento im hydrologischen Jahr von April 1994 bis März 1995). Dieses Ergebnis zeigt die fehlerfreie Installation der Bentonitmatten einschließlich der Überlappungsbereiche. Nach dem trockenen Sommer 1995 bewirkten die ersten Niederschläge im August eine Wiederbefeuchtung des Oberbodens. Anschließend führte jedes nennenswerte Niederschlagsereignis zu hohen Durchsickerungsraten der Bentonitmatten (die Durchsickerungsvolumina erreichten $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Im hydrologischen Jahr 1995/96 sickerten 56 mm/a durch Bentofix und 102 mm/a durch NaBento. Im gesamten Winterhalbjahr war die Rückquellung der Matten nicht ausreichend, um die in den Rissen gebildeten bevorzugten Fließwege durch die Matte wieder zu verschließen. Aufgrabungsergebnisse aus dem Jahr 1996 zeigten, daß das Tonmineral Bentonit nach wie vor in seiner Struktur erhalten geblieben ist. Die Ionenbelegung des Bentonits hat sich jedoch entscheidend verändert. Die ursprünglich am Tonmineral adsorbierten einwertigen Natriumionen sind mittlerweile größtenteils durch zweiwertige Calciumionen ersetzt worden. In der Folge hat das Quellungsvermögen des Bentonits stark abgenommen und zeigt nunmehr die typischen Werte eines Calciumbentonits. Andere Ursachen für die Schädigung der Bentonitmatten als Austrocknung und Ionenaustausch wurden bei der Aufgrabung 1996 nicht festgestellt (Herold 1997). Bislang gab es keine Anzeichen für die Verlagerung und Fällung von Ton-Humus-Komplexen, Carbonaten oder Metallhydroxiden, die im Zuge der langfristigen Bodenentwicklung im Abdecksystem freigesetzt und verlagert werden können.

4.3 Kapillarsperre

Die im Testfeld S3 untersuchte Kapillarsperre besteht aus 0,6 m Feinsand (78 % der Körner mit Durchmessern zwischen 0,1 mm und 0,2 mm) als lateral leitfähige Kapillarschicht über 0,25 m Grobsand und Feinkies (58 % zwischen 0,63 mm und 6,3 mm) als Kapillarblock. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Kapillarschicht beträgt $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ bei Wasserspannungen unterhalb 30 hPa. Die Kapillarsperre wird - von oben nach unten - durch

Kapillarsperren in einer 10 m langen Kipprinne bei unterschiedlicher Hangneigung und Zusickerungsrate untersucht (Steinert et al. 1997). Kapillarschichten mit Mittel- und Grobsanden haben dabei sehr viel höhere laterale Dränkapazitäten gezeigt als die Materialkombination, die im Testfeld S3 eingesetzt wurde. Diese Ergebnisse belegen, daß Kapillarsperren mit geeigneten Materialkombinationen eine erhebliche Leistungsfähigkeit besitzen.

4.4 Kombinationsdichtung

(Kunststoffdichtungsbahn über mineralischer Dichtung)

Auf drei Testfeldern werden seit 1988 Kombinationsdichtungen aus einer 1,5 mm dicken PEHD-Kunststoffdichtungsbahn oberhalb von dreilagigen bindigen mineralischen Dichtungen untersucht (zu den Eigenschaften der mineralischen Dichtungen siehe oben). Auf zwei der Testfelder (S2, F2) sind die Kunststoffdichtungsbahnen verschweißt, auf Feld F3 wurden sie in Hangrichtung überlappend verlegt. Die Wirksamkeit der Kombinationsdichtungen ist ausgezeichnet. Tabelle 1 zeigt, daß im Durchschnitt 1,3 mm/a unter den Dichtun-

gen der Felder S2 und F2 aufgefangen wurden. Auf Feld F3 wurden geringfügig mehr (im Mittel 3,6 mm/a) aufgefangen. Die detaillierte Auswertung der bodenhydrologischen Daten und der Bodentemperaturen belegt, daß das unter den Dichtungen aufgefangene Wasser nicht das Ergebnis einer Durchsickerung von Fehlstellen innerhalb der Kunststoffdichtungsbahn ist, sondern auf eine temperaturabhängigen Wasserabgabe der bindigen mineralischen Komponente im Sommerhalbjahr beruht. Mit dieser sommerlichen Wasserabgabe der mineralischen Dichtungen, die immer dann auftritt, wenn die Oberkante der Dichtung wärmer ist als ihre Unterkante, geht eine Veränderung der Wasserspannung in der mineralischen Dichtung einher. Ergänzende Studien zum temperaturabhängigen Wassertransport in Kombinationsdichtungen (Vielhaber 1995) haben gezeigt, das sowohl die absolute Temperatur als auch die Temperaturgradienten die Wasserbewegung in dampfförmiger und flüssiger Phase von warmen zu kalten Bodenbereichen auslösen. Unter gemäßigten Klimabedingungen und unterhalb mächtigerer Rekultivierungsschichten ist die temperaturinduzierte, abwärts gerichtete Wasserabgabe jedoch gering und zudem auf eine kurze

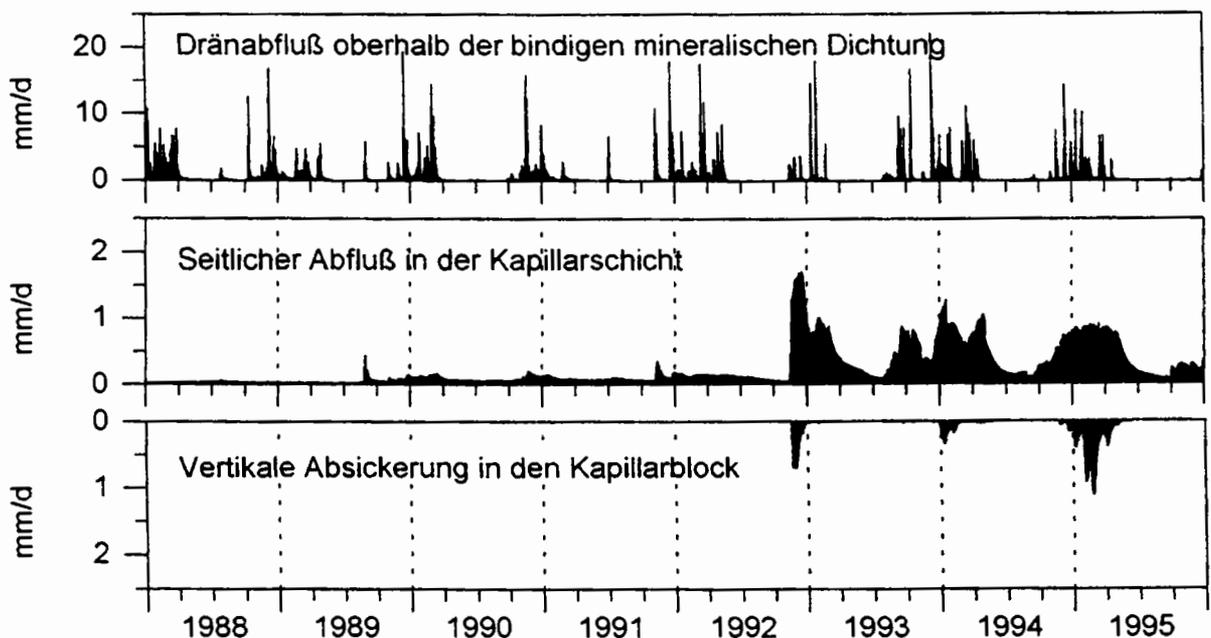


Abb. 5: Erweiterte Kapillarsperre (Feld S3)

Periode im Jahr begrenzt, so daß sie die mineralische Komponente der Kombinationsdichtungen erst nach vielen Jahrzehnten durch Austrocknung gefährden kann.

5 Schlußfolgerungen

Der Wasserhaushalt und die Wirksamkeit von mehrschichtigen Deponieabdeckungen können auf Testfeldern sehr genau untersucht werden. Solche Studien sind jedoch zeitaufwendig und benötigen einen angemessenen technischen Aufbau der Versuchsanlagen. Aus der Studie in Hamburg Georgswerder können nach gut zehn Jahren die folgenden wichtigsten Schlußfolgerungen gezogen werden:

Eine Abdeckung sollte so gestaltet werden, daß die Evapotranspiration und die seitliche Dränage von Wasser maximiert werden. Unter humiden Klimabedingungen und in semi-ariden Bereichen, die seltene - jedoch intensive - Niederschlagsereignisse aufweisen, ist allerdings eine Abdichtung erforderlich, um die Infiltration in eine Deponie oder Altlast zu minimieren.

Bindige mineralische Dichtungen und Bentonitmatten sind gegen Austrocknung und Schrumpfrissbildung sehr empfindlich. Aufwärts gerichtete Wasserabgabe in trockene Oberböden sowie die Wasserentnahme durch Pflanzenwurzeln haben die irreversible Bildung von Rissen und von bevorzugten Wasserleitbahnen in den untersuchten Dichtungen verursacht. Die Durchwurzelung und die Austrocknung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten muß durch ausreichend mächtige Rekultivierungsschichten oder andere Schutzmaßnahmen verhindert werden. Gegenwärtig sind keine Maßnahmen bekannt und erprobt, durch die die Eigenschaften der Tone so beeinflußt werden, daß entweder die Bildung von bevorzugten Wasserleitbahnen während der Austrocknung verhindert wird oder sich die gebildeten Risse ausreichend schnell wieder schließen.

Kapillarsperren sind vielversprechende Komponenten von Abdecksystemen für Hänge. Sie sind in Abhängigkeit von Hangneigung, Hanglänge, Materialverfügbarkeit und erwarteter Zusickerung in die Kapillarschicht zu

dimensionieren. Die Materialkombination ist so auszuwählen, daß ihre laterale Dränkapazität den genannten Randbedingungen gerecht wird. Die Kapillarschicht sollte bis zu einer Wasserspannung von mindestens 30 hPa eine sehr hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit aufweisen. Sehr gut sortierte grobe Sande sind daher als Kapillarschichtmaterial besonders geeignet. Gestufte Materialien, Schluffe, Lehme, Tone aber auch Kiese sind für Kapillarschichten aufgrund zu geringer ungesättigter Wasserleitfähigkeit in der Regel ungeeignet. Der Kapillarschicht sollte aus Kies bestehen und gegenüber der Kapillarschicht ausreichend filterstabil sein. Innerhalb einer Verbunddichtung (z.B. unter einer Kunststoffdichtungsbahn) kann die Kapillarsperre eine Sekundärdichtung bilden und gleichzeitig als Kontrollsystem für die Wirksamkeit der oberen primären Dichtung fungieren.

Kombinationsdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen über bindiger mineralischer Dichtung haben sich am besten bewährt. Die Kunststoffdichtungsbahn ist eine effektive und über lange Zeiträume beständige Dichtung, sofern geeignete Polymere benutzt und die Bahnen intakt installiert werden. Die bindige Komponente der Kombinationsdichtung ist in der Lage, lokale Fehlstellen der Kunststoffdichtungsbahn abzudichten. Anders als in Basisdichtungen wird die bindige Komponente in der Oberflächendichtung jedoch nicht genutzt, um den Schadstofftransport zu begrenzen. Unter einer intakten Kunststoffdichtungsbahn ist die mineralische Dichtung zwar gegen aufwärts gerichtete Wasserabgabe geschützt, langfristig (zumindest nach einigen Jahrzehnten) ist dieses im Falle eines Versagens der Kunststoffdichtungsbahn jedoch nicht länger der Fall. Die der mineralischen Komponente ursprünglich zugeordnete Aufgabe, nach Versagen der Kunststoffdichtungsbahn wirksam zu werden, kann sie daher in der Oberflächenabdichtung nicht erfüllen. Zudem kann möglicherweise temperaturabhängiger Wassertransport auch unter einer intakten Kunststoffdichtungsbahn bereits zu einer Austrocknung der bindigen mineralischen Komponente führen. Zusammenfassend kann die Kombinationsdichtung daher als eine sehr effektive und über lange Zeiträume beständige Dichtung durchaus

empfohlen werden. Es gibt jedoch einige Möglichkeiten, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Dichtsystems zu verbessern. So können die Mächtigkeit oder die Qualität der mineralischen Komponente verringert werden oder aber auch die bindige mineralische Komponente durch eine andere Kunststoffdichtungsbahn oder beispielsweise auch eine Kapillarsperre ersetzt werden.

Abdecksysteme für Altdeponien und Altlasten sollten immer vor dem Hintergrund der speziellen Randbedingungen des Einzelfalles entworfen werden (z. B. Witterungsverhältnisse am Standort, Geometrie des Abfallkörpers, aktuelle Gefahren und Gefährdungspotential, geplante Nachnutzung der Fläche, Materialverfügbarkeit, kritische Einwirkungen wie beispielsweise Setzungsdifferenzen oder der Angriff aggressiver Chemikalien, Kosten). Die Planer von Abdecksystemen können aus einer

Reihe von Optionen auswählen, um ein geeignetes und kostengünstiges Abdecksystem zu gestalten.

Dank

Die Untersuchungen, über die in dieser Veröffentlichung berichtet wird, wurden am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg durchgeführt. G. Miehllich, B. Vielhaber, K. Berger, B. Steinert, J. Maaß, J. Ludwig, M. Türk und viele Studenten haben die Untersuchungen mit großem Einsatz mitgestaltet. Die Studien wurden über den Gesamtzeitraum von der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH, Umweltbehörde) sowie in Teilperioden vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT, jetzt BMBF) und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

Literatur

HEROLD, C. (1997): Besondere Aspekte bei der Zulassung von Bentonitmatten für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien der Deponieklasse I. In LGA Bayern (Hrsg.): 13. Nürnberger Deponieseminar. 17 S.

MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22, 330 S.

MELCHIOR S. (1996): Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung - Ergebnisse von mehrjährigen In-Situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Altdeponie Hamburg-Georgswerder. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung - Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung. 3. Deponie-Seminar des Geologi-

schen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30.05.1996 in Bingen-Büdesheim/Rhein. Selbstverlag, Mainz, 40 S.

STEINERT, B., S. MELCHIOR, K. BURGER, K. BERGER, M. TÜRK & G. MIEHLICH (1997): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 32, 362 S.

VIELHABER, B. (1995) : Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen. Feldversuche in bindigen mineralischen Dichtungen unter Kunststoffdichtungsbahn. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 29, 200 S.

UMWELTBEHÖRDE HAMBURG (1995): Deponie Georgswerder, Sanierung 1984-95. 77 S.

DISKUSSION:

Schutz des Grundwassers durch Basisdichtungen

In-situ-Untersuchungen zur Wirksamkeit von
Oberflächenabdichtungen

STEIRER: Ich darf bitte jetzt diese beiden Vorträge zur Diskussion stellen. Sie haben uns gezeigt, daß wir es im Deponiebau sowohl oben wie auch unten mit technischen Systemen zu tun haben, die natürlich auf Alterungsprozesse anfällig sind und dann versagen.

NEGENDANK: Das waren ganz exzellente Vorträge, mit ihren Ergebnissen. Daß wir hier weiterarbeiten müssen ist klar. Aber das Fazit Ihrer Untersuchungen: es gibt im Grunde keine vernünftige Form der Deponierung, also containern wir das Ganze, bauen wir anständige Dächer darüber, solange, bis man weiß, was damit irgendwann einmal in der Zukunft geschieht. Ist das richtig ?

ENTENMANN: Also grundsätzlich machen wir ja genau das die ganze Zeit: wir bauen eine Basisdichtung, wir bauen einen Müllkörper, und wir bauen einen Deckel darauf; im Prinzip ist das ja ein großer Container. Nur die einen glauben, wir machen das für die Ewigkeit, und die anderen, die zweifeln das an.

Wir haben das Problem, daß wir einen durchlässigen Körper zwischen zwei dichten Körpern haben, und dann noch irgendwo eine Basisdrainage, und der richtige Weg wäre, wenn das schon für alle Zeiten halten soll, daß wir diese Durchlässigkeitsunterschiede ausmerzen. Im Prinzip müßte es unten am dichtesten sein, dann sollte man als Sicherheitselement die Basisdrainage ruhig behalten, und dann müßte etwas kommen, was auch dicht ist, aber das ist momentan überhaupt nicht dicht, und ich glaube, hier müßte man angreifen. Der Müllkörper selbst hat meinen Untersuchungen zufolge Durchlässigkeiten von 10^{-4} und 10^{-6} m/sec und mit ganz geringen Ausnahmen auch einmal 10^{-7} m/sec. Da kommt man mit Verdichtung und wenn mit Glück das Material stimmt hin; besser ist es einfach nicht möglich. Und

dann legen wir eine sehr gering durchlässige Oberflächenabdichtung darauf, und die wird irgendwann einmal wie jedes technische Element versagen. Wenn wir den Mittelteil nicht dichter machen, können wir eine langfristige Sicherheit nie gewährleisten.

Wenn wir das in der Mitte dicht machen können, und wenn wir es auch noch entfrachten von all den Schweinereien, die wir momentan noch einbauen, dann haben wir ein gutes Konzept, sodaß wir auch mit Deponierung in einigen hundert Jahren noch leben können.

MELCHIOR: Die Frage zielt ja auf die neuen Deponien. Man muß gerechterweise schon sagen, so schwierig die ganzen rechtlichen Vorgaben sind, die wir in den letzten Jahren erhalten haben, daß sie auch eine ganze Reihe von positiven Auswirkungen nach sich gezogen haben. Die Gesamtmüllmenge ist deutlich zurückgegangen, wir sortieren sehr viel besser, und es ist auch sehr gut möglich für neue Deponien genauer zu wissen, was man wie einbaut, und das Gefährdungspotential wird deutlich geringer sein als bisher. Dennoch sollte man sehr genau auf das chemische Milieu achten. Wir machen Unsinn, indem wir z.B. Schlämme, die belastet sind und unter stets reduzierenden Bedingungen eigentlich keine Schwermetallproblematik aufweisen, aus Gewässern baggern und sie in Landdeponien bringen, wo sie wunderbar durchlüftet werden, und wir erhalten dann auch sehr lange Zeit hohe Schwermetallfrachten im Sickerwasser. Das sind Dinge, bei denen man besser noch einmal die Ansätze hinterfragen sollte. Aber bei den neuen Deponien haben wir nicht die großen Probleme, bei denen technische Barrieren gerade an der Oberfläche oft zwingend erforderlich sind. Das sind eben die Altablagerungen, bei denen wir nicht wissen, was drin-

nen ist, wo zusätzlich auch noch die Einwirkungen auf die Oberfläche komplizierter sind als bei der neuen Deponie. Das Problem ist, daß man Altlasten und Altdeponien mit sehr viel Aufwand nachträglich technisch ausgestattet hat, sehr viel Lehrgeld bezahlt hat und heute eigentlich keiner mehr das Geld in die Hand nehmen will, um solche Altlasten zu sichern.

KISTEN: Sie haben sehr viele verschiedene Transformationsprozesse an den Systemen Sickerwasser und mineralische Barriere aufgezeigt ...*unverständlich*... Prozesse dargestellt, einmal mit Karbonatlösung und einmal mit Karbonatbildung. Welche Prozesse werden langfristig dominieren? Und als nachfolgende Frage: ist es sinnvoll bei einer mineralischen Barriere ...*unverständlich*... zu messen und eben von einer weiteren Verkomplizierung oder dem Einsatz technischer Möglichkeiten doch eher abzugehen?

ENTENMANN: Wenn wir differenzieren wollen: einmal haben wir diese Uraltdeponien, in die nicht viel an Schadstoffen hereingekommen ist; da sollte man nicht allzuviel darüber nachdenken, da sollte man eine ordentliche Oberflächenabdichtung darauflegen, und dann hat sich das. Worüber ich hauptsächlich gesprochen habe, das sind diese Deponien aus den Siebzigerjahren, in die wir alles hineingepackt haben, und das sind eben diese Reaktordeponien, da ist richtig Chemismus darin, wir haben Sickerwasser, das wir über ca. 20 Jahre beobachtet haben. Das Dumme ist, wir haben es gar nicht richtig beobachtet, meist haben wir Sickerwasserentnahmestellen in der Deponie, die über 2-3 Jahre Ergebnisse liefern, oder über 5 Jahre (ich habe eine, die sogar über 10 Jahre beobachtet worden ist, da können wir über den Chemismus Aussagen treffen), wir haben in Summe ganz wenige Parameter über wenige Jahre. Ich kann derzeit noch nichts über eine zeitliche Entwicklung des Chemismus im Sickerwasser sagen, ich kann nur sagen, daß diese Phase bei den alten Deponien immer "dicker" wird. Es ist immer mehr Organik drinnen und es kommen schubweise immer mehr Schwermetalle hinzu. Wie es sich insgesamt verlagert, das kann ich überhaupt noch nicht prognostizieren.

Diese Hoffnung, die ja allen diesen alten Konzepten zugrunde liegt, daß nach 12 bis 14 Jahren, solange wie die Gasphase läuft, auch die Sickerwasserphase läuft, ich glaube, die haben wir inzwischen widerlegt. Auf den meisten Deponien, die wir untersucht haben, sind wir in der Gasphase schon längst auf dem absteigenden Ast, da war dieses Problem fast schon zur Gänze erledigt, aber in der Sickerwasserphase, in der Sickerwasserbelastung, sind wir noch auf dem Weg nach oben. Was ich Ihnen sagen kann, ist, zwischen dem Deponiekörper und dem Bereich der Basis haben wir einen Sprung. Wir haben an der Stelle, wo die Drainage auf der Dichtung liegt, Sulfidfällung bis zum Gehnichts mehr. Wenn Sie da aufgraben, da stinkt es richtig, da kommt Ihnen der Schwefelwasserstoff entgegen. Da scheint sich was zu tun. Unterhalb dieser Drainschicht haben wir auch weiter untersucht, aber das haben wir nicht so detailliert machen können. In Neuwulmstorf ist der Porenraum von oben bis unten mit identischem Sickerwasser gefüllt, da gibt es keinen Unterschied, ob sie ganz oben sind in dieser Dichtung oder ganz unten. Da ist im Porenwasser immer dasselbe drin. Wenn wir jetzt einen Schritt weiter gehen und die Tonminerale untersuchen, das Adsorbierte, da zeigt sich auch nicht viel anderes. Egal, ob Sie 30 cm Ton nehmen oder 60 cm, zuerst kommt die Konvektion nach unten und dann breitet es sich lateral aus, geht also ins Gefüge hinein. Von daher ist auch die Diskussion, ob 70 cm oder 50 cm oder 3 m nur etwas, was die Zeit etwas beeinflußt, aber nicht allzuviel.

VORTISCH: Das heposive Ergebnis, wenn man die Ausführungen aus geologischer Sicht betrachtet, bestätigt was wir Geologen schon vor längerer Zeit befürchtend geäußert haben, daß nämlich in Wahrheit die nachsorgefreie Langzeitsicherheit nicht existiert. Auch bei Kapillarsperren nicht, denn die Abfuhr funktioniert nur solange, solange die Abfuhr garantiert ist, sie müssen also diesen Misthügel in der Landschaft verwaltungsmäßig immer mindestens solange kontrollieren, als das Schadstoffpotential existiert, und einige Schadstoffe leben bekanntermaßen ewig, gerade bei den Schwermetallen, und das ist ein

außerordentliches Schwergewicht dieses Resummes.

Das zweite wäre die Frage der Deponien, bei denen Verbrennungsrückstände abgelagert werden, in Gesamtheit oder einzelne Stoffgruppen für sich. Die Verbrennung, die auch noch sehr ausführlich zu diskutieren ist, und die zur Zeit öffentlich - rechtlich ja eher gefördert wird, entkommt ja der Deponierung auch nicht. Das was bei ihr übrig bleibt, ist in Wahrheit geologisch sogar noch problematischer auf bestimmte Stoffgruppen, gerade wenn man auf die Phasengleichgewichte schaut, die physiochemische Stabilität über die Prozesse, die da noch ablaufen können,.

Die Frage wäre, ob man überhaupt jemals eine Deponie gefunden hat, wo die Oberflächenabdichtung wirklich funktioniert hat, nachsorgefrei, und dann wäre die Frage ob da nicht sofort ein geologisches Argument zur Verfügung steht, um das auf längere Sicht in Zweifel zu stellen, denn wir reden von Langzeit, über größere Verwaltungszeiträume, über Generationen.

MELCHIOR: Zunächst einmal, ich bin von den Ergebnissen nicht ganz so deprimiert. Ich war sehr überrascht, daß die mineralische Dichtungen so schlecht abschneiden, daß die so austrocknen.

VORTISCH: Das haben wir erwartet

MELCHIOR: 1985 haben wir das so drastisch noch nicht erwartet, da haben wir mit diesen Untersuchungen erst begonnen. Wir haben wohl gedacht, daß sie austrocknen können, aber nicht in dem Ausmaß. Ich als Bodenkundler habe das damals so gesehen, das Ergebnis ist aber sehr eindeutig (bei den Bentonitmatten hatte ich dann auch entsprechende Bedenken). Aber ich habe zum Beispiel den Kunststoffdichtungsbahnen als Geowissenschaftler in Richtung Beständigkeit 1985 nicht sehr viel zugetraut, und habe mich da von den Ergebnissen belehren lassen müssen. Das KDB ist durchaus eine sehr wirkungsvolle Dichtung ist, die aber auch nicht ewig hält. Ganz klar. Die Kapillarsperren sind ein wesentlich angepassteres System an die ungesättigten Verhältnisse in der Oberflächendichtung, deswegen auch ein relativ beständiges

System, aber Stofftransport, Karbonate, alles, was die Dichtwirkung von Drainagen betrifft, das muß man auch bei Kapillarsperren als kritische Einwirkung betrachten.

Es ist klar, daß man eine Deponie nachsorgefrei haben will. Viele Deponien werden als nachsorgefrei bezeichnet, fast alle, denn keiner will die Nachsorge so betreiben, wie wir sie in Büchern und Vorschriften festlegen, das ist meine feste Überzeugung. Selbst in Fällen, wo alle Meßvorrichtungen installiert sind, kommt man zwei, drei Jahre später drauf: keiner hatte eigentlich die Zeit sich mit dem notwendigen Elan darum zu kümmern und man müßte alles wieder neu machen. Die Nachsorge wird entfallen, und wir werden dann sehr unterschiedliche Deponien haben, von denen eine Vielzahl gar nicht einmal so problematisch sein wird, wie wir das in der Vergangenheit selbst auch gedacht haben. Die Schadstoffausbreitung ist an vielen Standorten äußerst gering und wir werden erst prüfen müssen, wie das im Vergleich der Umweltbilanz zu anderen Entsorgungswegen aussieht. Es wird aber auch eine ganze Reihe gravierender Fälle geben, und an die muß man herangehen. Die Oberflächenabdichtung ist ein reparierbares System. Es gibt technische Lösungen, die doch kostengünstig sind und für eine relativ lange Zeitdauer funktionieren. Aber natürlich nicht für die Ewigkeit.

Es gibt einen anderen Bereich, in dem man diese ewige Haltbarkeit tatsächlich fordert, und auch berechtigterweise, das sind die Altstandorte der Rüstungsproduktion in Nordamerika. Eine Dimension völlig jenseits dessen, was wir von Sondermüllabfällen kennen, das ist lächerlich dagegen. Es gibt Kostenschätzungen, daß man allein auf den sechs oder sieben großen Standorten, Los Alamos und wie sie alle heißen, zur Sanierung mehr aufwenden muß, als die Herstellung des kompletten Straßensystems der Vereinigten Staaten jemals gekostet hat, inklusive Unterhalt. Das werden auch die USA nicht aufbringen können.

Dort sucht man nun Abdecksysteme, die wirklich für die Ewigkeit gedacht sind. Fragen werden debattiert, wie weit ändert sich in der

Zukunft die Sprache, man muß mit Piktogrammen arbeiten, die auch in 800 Jahren noch verstanden werden, denn man kann das nicht als Text irgendwo hinschreiben. Auch da kommt man zu Systemen mit Bitumen, mit Asphalt, kombiniert mit sehr blockigem Material ("rip-rap"), die durchaus sehr lange halten werden. Auch nicht ewig, und mit Tausendjährigen Institutionen haben wir insgesamt weltweit schlechte Erfahrungen gemacht.....

VORTISCH: Auch in den Fünfzigerjahren haben die Deponien unterschiedliche Einträge gehabt, vom Sofa über das Moped bis zu einem entsorgten toten Kaninchen, Eisenteile usw. Es gab natürlich nicht die hochentwickelten Stoffe, die erst später zum Tragen kommen, die Computer ...*unverständlich*... später entsorgen, aber ...*unverständlich*...

Bei Kunststoffdichtungsbahnen wird im allgemeinen eine Haltbarkeit von etwa 30-34 Jahren diskutiert. Sie sind ist also eine technische Lösung auf Zeit, die eine Verwaltungs-generation beruhigen kann, die aber eine Deponie, die irgendwie eingekapselt wird oder zum Teil eingekapselt funktioniert, die können wir aus geologischer Sicht eigentlich nicht als sicher auf Dauer sehen. Wir müssen uns klar machen, daß das Potential eben drinnen steckt, und wenn wir das Potential jetzt blocken, indem wir es gut oben abdichten und die ganzen Prozesse über die Zeit reduzieren, was wird später kommen wenn die Deponie längst vergessen ist, wenn sie solange eingegraben war, oder wenn irgend etwas gemacht wird und dann das Potential zum Tragen kommt.

Das eine wäre natürlich dann eine funktionierende geologische Barriere, obwohl diese unter Umständen, wenn wir sie von der Bilanz her sehen, gar nicht das erfüllen kann, was wir von ihr wollen. Denn entweder ist sie ganz dicht, dann wird eine vergessene Deponie eben einen oberflächennahen Abfluß haben und das Grundwasser entsprechend kontaminieren können, oder aber sie ist nicht dicht, dann geht's nach unten raus. Die ideale geologische Barriere müßte so beschaffen sein, daß sie fortlaufend gerade soviel aufnimmt, daß sie lange Zeit genügend herausfiltert durch die mechanischen und chemischen Prozesse, die

Mineralneubildung, Anlagerungs- und Austauschprozesse.

Was Sie heute erzählt, mit wunderbarer Klarheit dargestellt haben, haben wir natürlich auch schon in anderen Fällen diskutiert, und das, was wir an Ihren Basisdichtungen beobachtet haben, haben wir auch schon vermutet. Mit Koll. Riehl haben wir zusammen eine Exkursion zu einer Sondermülldeponie in Süddeutschland Anfang der Neunzigerjahre gemacht, das Planum war in der Bauphase, auch schon mit Reißbildung und Kunststoffdichtungsbahnen. Damals haben wir gesagt, die Kunststoffdichtungsbahnen werden solange halten, bis die Basisdichtung gut ausgetrocknet ist und entsprechende Risse hat und dann, wenn die Kunststoffe versagen, können wir sicher sein, daß auch die mineralische Basisdichtung ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann. Abgesehen davon, kann selbst eine funktionsfähige Basisdichtung einen Wunschtraum kaum erfüllen, daß nämlich flächig komplett versiegelt wird.. Die Kalkulation das Schadstoffbindungsvermögen einer mineralischen Basisdichtung quantitativ einem Schadstoffpotential anzupassen, würde ja nur funktionieren, wenn es gleichmäßig durchsickert wird. Und das können wir nicht erwarten. Die Austauschprozesse, mit denen wir eine Entschärfung erhoffen, werden linear, also flächig verlaufen, und die Wirkung wird nur ein Bruchteil dessen sein, was wir uns erhofft haben. Das müssen wir uns meiner Meinung nach für die zukünftigen Verfahren einmal gemeinsam klarmachen.

NEGENDANK: Sie haben Trockenrisse in einer Bentonitmatte gezeigt. Welche Größenordnung haben die ?

Das ist eine Frage; die andere ist, im Oberboden hatten Sie schöne Durchgänge. Da würde mich interessieren, wie tief geht die und sind die ähnlich wie normale Kluftsysteme (Sigma 1, Sigma 2, Sigma 3) zu erläutern auf Grund der Austrocknung, die von oben nach unten fortschreitet.

MELCHIOR: Zum letzten habe ich mich offenbar nicht klar genug ausgedrückt. In der Rekultivierungsschicht oberhalb der Entwässerungsschicht haben wir diese Kluftsysteme

nicht gehabt, das war ein schwachbindiges Material. Ich kenne aber Rekultivierungsschichten, die aus tonigem Material bestehen und beim Einbau häufig überfahren wurden. Da finden wir das, was Sie eben ansprechen, dort gibt es tatsächlich in aller Regel solche "Elefantenfüße", polygonale Strukturen mit 30 - 40 cm Durchmesser, und die Rißtiefe reicht locker über 70, 80 cm und tiefer. Und dann kommen die Risse der nachfolgenden Generation, das ist lehrbuchhaft in so einem System. Das war aber im untersuchten Objekt nicht der Fall.

Zu den Rißgrößen in den Bentonitmatten und auch in der mineralischen Dichtung: die variieren. In Zeiten der Austrocknung im Sommer haben wir in den Matten Rißweiten von 2-2,5 mm festgestellt bei einer Gefügegröße um 1 cm Durchmesser. Das weist auf das enorme Quell- und Schrumpfvermögen der Bentonite hin, das muß so sein. Die Rißweiten verringern sich bei Wiederbefeuchtung, sie schließen aber nicht wieder so stark, daß die Matten wieder dichtwirksam wären, und im günstigsten Zustand hat man feine Haarrisse, die man mit der Lupe erkennen kann, mit bloßem Auge kaum.

Das war in der mineralischen Dichtung ähnlich; da hatten wir einerseits die vermeintlich gut aussehenden, die hatten auch Haarrisse, die häufig miteinander kommunizieren und erhöhte Flüssigkeitsdurchgänge erlauben. Die Risse sind im Sommerhalbjahr stärker. Nur die Gefügegrößen sind da anders als in den Bentonitmatten. Andererseits gibt es aber auch Dichtungen mit weitaus breiteren Rissen. Für die Durchlässigkeit ist die Rißbreite allerdings nachrangig. Bereits Haarrisse erhöhen die Durchlässigkeit drastisch.

HUMER: Sie haben erzählt, daß Pflanzen direkt an die Kunststoffolie herangehen...*unverständlich*... wenn sie. Zeit, Raum, Licht und Ruhe haben. Es ist allerdings bekannt, daß die Pflanzen, die Sie dort finden, kleinräumig die Chemie des Bodenwassers durch Wurzelausscheidungen verändern können, die ...*unverständlich*... Ausscheidungen. Gibt es Untersuchungen mit derartigen Wässern, wie lange die Bahnen unter deren Einfluß halten?

MELCHIOR: Untersuchungen mit Sekreten, die die Wurzel ausscheidet, um sich Nährstoffe zu erschließen, sind mir nicht bekannt. Sie sind auch kaum möglich, weil man die Menge an Sekret für einen solchen Test wohl kaum generieren kann. Es gibt aber eine Fülle von Untersuchungen zur Medienverträglichkeit von PE-Bahnen, die durch den Einsatz solcher Dichtungsbahnen in der Basisdichtung veranlaßt waren, und da hat man mit konzentrierten Laugen, Säuren und allen möglichen Flüssigkeiten geprüft und es gibt, glaube ich, in der ganzen Deponietechnik kein Konstruktionselement, das gerade auf chemische Angriffe hin so ausführlich untersucht worden ist wie Kunststoffdichtungsbahnen auf PE-Basis. Die Debatte ist mittlerweile geklärt, die Schätzungen, wie lange sie halten, gehen auseinander; aber der Mindestzeitraum der Haltbarkeit, der in den USA, aber auch in Deutschland, vertreten wird, ist 80 - 90 Jahre.

HUMER: Aber keine Praxisuntersuchungen?

MELCHIOR: Es gibt Zeitrafferversuche, die bei Hoechst an PEHD-Rohren unter Beaufschlagung mit Druck und erhöhter Temperatur seit Jahrzehnten durchgeführt werden. Aus bestimmten mechanischen Parametern leitet man mit speziellen Extrapolationsverfahren die Alterung und die Beständigkeitsdauer ab. Über dieses Vorgehen und die genannten Funktionszeiträume gibt es relativ weiten Konsens. Einige Fachleute gehen von noch sehr viel längeren Beständigkeiten aus. Ich bin frei von Lieferinteressen, und es würde mich nicht überraschen, wenn noch neue Versagensmechanismen durch kombinierte Einwirkung von Druck, Zug, Pflanzenwurzeln oder chemische Stoffe bekannt würden. Ob Schäden entstehen, ist aber in der Oberflächenabdichtung leicht prüfbar. Man muß einen Spaten in die Hand nehmen, ein kleines Stück herausnehmen, und man macht Zugversuche und andere Versuche, mit denen man die Beschaffenheit des PE, das man ja vom Einbau her sehr gut kennt, überprüft. Man kann die Alterung sehr gut erkennen, schon ehe es zum Totalversagen kommt.

Ich gehe damit völlig d'accord, daß man, wenn man die umweltverträgliche Deponie haben will, die Abfälle betrachten muß und das che-

mische Milieu, in dem sie liegen, und zweitens die Durchströmung, die sie erfahren können. Nur so kann man sich einer nachsorgefreien Deponie annähern. Ob man sie je erreichen wird, weiß ich nicht, aber bei all den Fällen, wo wir das nicht mehr tun können, weil der Dreck schon da liegt, muß man technische Systeme wählen. Die Oberflächenabdichtung kann man kontrollieren und kann man auch reparieren. Es gibt Systeme, die das leisten.

BLÜHBERGER: Nachdem Sie uns heute erklärt haben, daß Kombinationsdichtungen eigentlich nur an dieser Kunststoffdichtungsbahn wirksam sind, und die mineralische Dichtung nach kurzer Zeit eigentlich nicht mehr funktioniert, stellt sich die Frage, ob man diesen Aufwand für die Abdichtung überhaupt noch treiben soll oder ob man nicht Kapillarschichten oder andere Materialien als Unterschicht für Kunststoffdichtungsbahnen verwendet.

MELCHIOR: Ich weise auf die Gefährdung der mineralischen Dichtung hin. Es gibt wenige Fälle, die so untersucht sind wie Hamburg - Georgswerder und da haben wir diese Ergebnisse nun, und das Fazit daraus ist, es gibt eine deutliche Gefährdung der mineralischen Dichtung. Es würde mich nicht überraschen, wenn es irgendwo im Voralpenbereich bei 2000mm Niederschlag und bei einer Rekultivierungsschichtmächtigkeit von 2,5 m mineralische Dichtungen gibt, die gut funktionieren. Ich sage nicht, daß jede mineralische Oberflächenabdichtung in diesem Zeitraum, in dem wir sie beobachtet haben, kaputtgehen muß, wir können es aber auch nicht sicher ausschließen.

Zum finanziellen Aufwand: Kosten haben wir gar nicht angesprochen. Ich habe hier eine Folie, die die Kosten eines Projektes 1994 zeigt - da hat sich nicht viel geändert. Für eine Abdeckung, die insgesamt 88 Mio. DM geko-

stet hat, gibt spezielle Kosten, die in Fußpunkteinrichtungen, Gebäude, Infrastruktur gehen. Wenn man die herausnimmt und sich die Kosten des reinen Abdecksystems ansieht, dann sind die weniger als die Hälfte, und man kommt in diesem Fall auf einen Quadratmeterpreis von 146 DM. Und wenn man sieht, was die einzelnen Elemente hier kosten, dann stellt man fest, daß hier die Rekultivierungsschicht mit 30 DM dabei ist, die Drainage mit der Filterschicht mit 20 DM, die PEHD-Dichtung mit 36 DM, (das ist mittlerweile deutlich weniger geworden, die liegen im Moment verlegt zwischen 20,- und 25 DM), die mineralische Dichtung mit 27 DM, (das ist eher teurer geworden, weil man mittlerweile kompliziertere Einbautechniken anwendet). Sie sehen also, das Dichtungssystem kostet nur einen Bruchteil der gesamten Maßnahmen und die Kunststoffdichtungsbahn ist wie jedes andere Element, auch eine Kapillarsperre, kostenmäßig in diesem Rahmen, da sind die Kosten nicht so sehr differenziert. Man muß wirklich im Einzelfall überprüfen, was sind die Einwirkungen, was sind die Randbedingungen, und was ist unter diesen speziellen Rahmenbedingungen das technisch geeignetste System.

NEGENDANK: Ein Schieferdach aus spanischem Schiefer kostet etwa 160 DM, ein normales Dach aus deutschem Dachschiefer kostet 250 DM. Das heißt also, es ist so teuer, wie ein normales Dach über einem Haus.

MELCHIOR: Das Dach ist noch ein bißchen teurer, auf diesen Flächen schwer zu installieren und herzustellen, mit hohem Aufwand zu warten, Lebewesen, Mäuse, Menschen, kommen unter das Dach in ein entsprechendes Milieu mit Deponiegas usw.. Das Problem ist also nicht ganz leicht mit einer Überdachung zu lösen; aber rein von den Herstellungskosten her haben Sie recht.

Diskussionsbeiträge von:

Ing. cand phil. Günther BLÜHBERGER
 Universität Wien
 Inst. f. Geologie
 Geozentrum
 Althanstraße
 1090 Wien

Dr. W. ENTENMANN
 IGB Ingenieurbüro
 Heinrich Hertz Straße 116
 D-22083 Hamburg

Dipl.Ing. Marion HUMER
 Abt. Abfallwirtschaft - IGWA
 Universität f. Bodenkultur
 1190 Wien

Dr. Chr.P. KISTEN
 Abfallwirtschafts-
 u. Umweltdienstleistungs GmbH
 Hennickendorfer Chaussee 18-20
 D-15344 Strausberg

Dr.St. MELCHIOR
 IGB Ingenieurbüro
 Heinrich Hertz Straße 116
 D-22083 Hamburg

Univ.Prof. Dr. Dipl.Geol. Jörg. F. W.
 NEGENDANK
 GeoForschungsZentrum Potsdam
 Aufgabenbereich 3
 "Struktur und Evolution der Lithosphäre"
 Telegrafenberg
 D-14473 Potsdam

Universität Potsdam
 Inst. für Geowissenschaften
 Postfach 60 15 53
 14415 Potsdam

Dipl.Ing Thomas STEIRER
 Kommunalkredit Austria
 Türkenstraße 9
 1090 Wien

Univ.Prof. Dr. Walter VORTISCH
 Inst. f. Geowissenschaften
 Prospektion u. Angewandte Sedimentologie
 Montanuniversität Leoben
 A - 8700 Leoben

