

Kritische Anmerkungen zur Genehmigungspraxis bei Deponieoberflächenabdichtungen

Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten
NAUE GmbH & Co. KG, Gewerbestraße 2, 32339 Espelkamp-Fiestel
T: +49 5743 41-212, F: +49 5743 41-283, E: gheerten@naue.com

Dr.-Ing. Ernst Reuter
IWA Ingenieurgesellschaft für Wasser- u. Abfallwirtschaft, Marienstraße 122, 32425 Minden
T: +49 571 94618-11, F: +49 571 94618-77, E: reuter@iwa-minden.de

1 EINLEITUNG

Oberflächenabdichtungen sollen die Umweltbelastungen, die von einer verfüllten und abgeschlossenen Deponie ausgehen können, auf ein vertretbares Maß begrenzen. Das Dichtungssystem soll die unkontrollierte Freisetzung von Deponiegas und Schadstoffen sowie die Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper verhindern.

In allen die Deponie betreffenden Vorschriften in Deutschland, aber auch in der EU-Deponierichtlinie, ist die mineralische Dichtung aus natürlichen bindigen Böden, nach bekannten Regeln der Technik erdbautechnisch hergestellt, das maßgebende Dichtungselement für Oberflächenabdichtungssysteme. Nach positiven Erfahrungen und Nachweisen zur Wirksamkeit von mineralischen Dichtungen an der Deponiebasis gibt es vermehrt Hinweise auf ungenügende Wirksamkeiten und völliges Versagen der erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien. Geologisch/mineralogisch begründete Beständigkeitsannahmen mit entsprechend unterstellter "ewiger" Funktionsdauer in Verbindung mit der gesetzlichen Vorgabe zur Anwendung erzeugen noch zu häufig ein unkritisches Beharrungsvermögen in Bezug auf die kontinuierliche Anwendung von mineralischen Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen. Diese ungeprüften Beständigkeits- und Wirksamkeitsannahmen erzeugen für technisch und wirtschaftlich überlegene Alternativlösungen mit nachgewiesenen langen Nutzungsdauern häufig unüberwindbare Hürden und verhindern die besseren Lösungen für das übergeordnete Ziel des Schutzes der Umwelt. Für den Gesetzgeber ergibt sich hieraus dringender Handlungsbedarf!

2 ZUR GENEHMIGUNGS- UND BAUPRAXIS VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGEN

2.1 Vorschriften und Erfahrungen

Über die "Abfall-Ablagerungsverordnung AbfAbIV" von 2001 und die "Deponieverordnung DepV" von 2002 mit direkter Bezugnahme auf "TA Abfall" von 1991 und "TA Siedlungsabfall" von 1993 ist uns in Deutschland immer noch die mineralische Dichtung aus natürlichen bindigen Böden für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien gesetzlich verordnet. Allerdings können die Genehmigungsbehörden nach § 14 Abs. 6 DepV Alternativlösungen zulassen und genehmigen, wenn der Nachweis erbracht wird, dass mit der alternativen Abdichtungsmaßnahme die Schutzziele im Sinne der Anforderungen von AbfAbIV (2001) und DepV (2002) erreicht werden. Als Voraussetzung für eine Genehmigung ist ein

Nachweis der Gleichwertigkeit für das Dichtungssystem und/oder die einzelne Komponente des Dichtungssystems, die alternativ ausgeführt werden soll, zu erbringen.

In der jungen Geschichte der Deponietechnik wurden erdbautechnisch aus natürlichen bindigen Böden hergestellte Dichtungen zunächst in Dichtungssystemen an der Deponiebasis gebaut. Die gesammelten und dokumentierten positiven Erfahrungen, mit zum Teil deutlich besseren Wirksamkeiten als gefordert, bildeten die Grundlage, natürliche mineralische Dichtungselemente auch für Oberflächenabdichtungssysteme vorzuschreiben. Wegen der im Vergleich zur Deponiebasis vermuteten "leichteren" Aufgaben – Zurückhalten von Deponiegas und Niederschlagswasser – wurden die Anforderungen an das mineralische Dichtungselement für Oberflächenabdichtungssysteme im Hinblick auf Dicke und Dichtwirkung reduziert. In Tabelle 1 sind die zurzeit in Deutschland definierten technischen Anforderungen an das mineralische Dichtungselement zusammengestellt.

Tabelle 1: Anforderungen an die mineralische Dichtung in Oberflächenabdichtungssystemen gemäß TA Abfall und TASI

Material- und Einbauparameter	TA Abfall	TA Siedlungsabfall, Deponieklasse 2	TA Siedlungsabfall, Deponieklasse 1
Stärke der Dichtung	0,5 m	0,5 m	0,5 m
Durchlässigkeitsbeiwert	$\leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s	$\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s	$\leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s
Suffosionsbeständigkeit	gefordert	gefordert	gefordert
Geringe Reißanfälligkeit	gefordert	gefordert	gefordert
Feinstkorngehalt (< 2 μ m)	≥ 20 Gew.-%	≥ 20 Gew.-%	≥ 20 Gew.-%
Tonmineralgehalt	≥ 10 Gew.-%	≥ 10 Gew.-%	≥ 10 Gew.-%
Größtkorn	20 mm	20 mm	20 mm
Stückigkeit	32 mm	32 mm	32 mm
Calciumcarbonatgehalt	≤ 15 Gew.-%	≤ 15 Gew.-%	≤ 15 Gew.-%
Einbauwassergehalt* (w)	$w_{pr} < w < w_{0,95}$	$w_{pr} < w < w_{0,95}$	$w_{pr} < w < w_{0,95}$
Luftporenanteil bei Abweichungen vom Wassergehalt	≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 5 %
Einbaudichte*	≥ 95 % D_{pr}	≥ 95 % D_{pr}	≥ 95 % D_{pr}
Anteil fein verteilter organischer Substanz	≤ 5 Gew.-%	≤ 5 Gew.-%	≤ 5 Gew.-%

* w_{pr} = Wassergehalt bei 100 % Proctordichte

$w_{0,95}$ = Wassergehalt bei 95 % Proctordichte auf dem nassen Ast

D_{pr} = Proctordichte bei optimalem Wassergehalt w_{pr}

Eine dauerhafte Funktion des Dichtungselementes "natürliche mineralische Dichtung" wurde unterstellt, da die verwendeten feinkörnigen bindigen Böden (Tone/Schluffe/Feinsande als Bestandteile) als Endprodukte der Gesteinsverwitterung als unbegrenzt beständig angesehen werden und direkt auf eine entsprechend dauerhafte Funktionsfähigkeit geschlossen wurde, die durch eine vergleichsweise großzügig vorgegebene Dicke von 50 cm, zweilagig zum Fehlstellenausgleich eingebaut, zusätzlich abgesichert würde.

Aktuell ist der Kenntnisstand bei der Anwendung von natürlichen mineralischen Dichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien durch folgende Aussagen gekennzeichnet:

Es wurde an Testfeldern und durch Aufgrabungen bereits seit Ende der 80er Jahre vielfach nachgewiesen, dass mineralische Dichtungen, die nach diesen Anforderungen gebaut worden sind, ihre Dichtungswirkung eben nicht dauerhaft sicherstellen konnten, sondern teilweise bereits nach wenigen Jahren so weit verloren, dass sie als nicht funktionstüchtig eingeordnet werden müssen.

Bei einem Status-Workshop "Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen" im Jahre 2002 wird einleitend festgestellt, dass "es bisher aber noch nicht möglich war, die Langzeitwirksamkeit mineralischer Abdichtungsschichten abschließend zu beurteilen" Nach dem Workshop wird ausgeführt: "Es muss jedoch betont werden, dass derzeit trotz der Erkenntnis der Ursachen sowie der vorliegenden empirischen Erfahrungen noch keine endgültigen Empfehlungen für die langfristig funktionsfähige Gestaltung von Oberflächendichtungssystemen mit tonmineralischen Abdichtungsschichten gegeben werden können." (Zitat aus [12]).

Witt [15] führt aus, dass selbst die jüngst in den Allgemeinen Grundsätzen für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme (10.09.2004) der LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnische Vollzugsfragen" [8] zusätzlich verankerten Anforderungen an Wassergehaltsschwankungen zur Vermeidung von Schrumpfrissen und Beständigkeit gegen hohe Temperaturen nicht abgesichert bzw. unerfüllbar sind. Witt hält allerdings die Austrocknungsgefahr durch veränderten Systemaufbau, geeignete Materialien und Einbautechniken mit einer "Minimierung der Schrumpfrissbildung" für beherrschbar in Verbindung mit Eignungsuntersuchungen, die allerdings teilweise über bodenmechanische Standardversuche hinausgehen. Zur Lösung haben Witt u.a. [16] 2004 Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen in Kombination mit einer Rekultivierungsschicht mit mehr als 150 cm Dicke vorgeschlagen, womit sie allerdings eine weitere mineralische Schicht und auch zusätzliche Kosten in den Systemaufbau einführen.

Der von Witt u.a. vorgeschlagene Ansatz [16] entspricht konzeptionell den austrocknungssicheren zweilagigen Bentonitmatten mit zwei durch einen Vliesstoff als kapillarbrechende Schicht voneinander getrennten wirksamen Bentonitdichtungslagen. Diese Produkte (Bentofix BZ 6000 bzw. DZ 6000) wurden 1998 vom Deutschen Institut für Bautechnik als Alternative für die erdbautechnisch hergestellte mineralische Dichtung für Deponieklasse 1 zugelassen. Für diese Produkte wurden in aufwendigen Prüfverfahren die Dauereigenschaften nachgewiesen, die für das gesetzlich vorgeschriebene Dichtungselement nur angenommen wurden und werden.

Mit der Modellierung des Wasserhaushaltes z.B. nach HELP oder BOWAHALD können (bzw. müssten in Anbetracht des fehlenden „Selbstheilungsvermögens“) bei bekannten Klimadaten, bei den Kennwerten der verwendeten Materialien und den Grenzbedingungen für Trockenrissebildung standortspezifisch optimierte und ingenieurmäßig bemessene Dichtungssysteme entworfen werden [15]. Stand der Technik ist diese Vorgehensweise allerdings bis heute nicht – und schon gar nicht Bestandteil abfallrechtlicher Genehmigungsverfahren.

Im Einklang mit EU-Empfehlungen für Bauwerke mit langer Funktionsdauer hält auch Witt [15] einen Nachweis für 100 Jahre Funktionsdauer und Beständigkeit für Oberflächenabdichtungssysteme für völlig ausreichend und fordert eine Abkehr vom Anspruch, dass eine Dichtung über Zeiträume von vielen hundert Jahren ohne Nachsorge, Pflege und ggf.

Reparatur ihre Leistungsfähigkeit behält. Speziell für Dichtungssysteme für Deponieoberflächen hält er die bisher vertretenen und eingeforderten Nachweise zur "Dauerbeständigkeit" über mehrere hundert Jahre für unangemessen und auch nicht für notwendig.

Trotz dieses hier aufgezeigten Erkenntnisstandes zur erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtung aus natürlichen bindigen Böden für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien wird in der Praxis zu häufig an den unrealistischen und überholten Vorstellungen der mineralogisch begründbaren Langzeitwirksamkeit und an dem natürlichen mineralischen Dichtungselement als unverzichtbarer Bestandteil eines Oberflächenabdichtungssystems festgehalten, ohne einen projektspezifischen Nachweis dauerhafter Austrocknungssicherheit wie er z.B. im Rahmen der Zulassungsverfahren für Bentonitmatten bereits in den 90er Jahren vom DIBt gefordert wurde (s.u.). Stattdessen scheitern Gleichwertigkeitsnachweise für Alternativen häufig daran, dass allein aus methodischen Gründen kein Nachweis der Langzeitbeständigkeit über beliebig große (möglichst unendliche) Zeiträume geführt werden kann, obwohl aus zum Teil langjährigen Feldversuchen und Aufgrabungen deutlich bessere Anwendungserfolge als mit der Regeldichtung dokumentiert werden.

2.2 Aktuelle Beispiele

Auf der Basis von 95 hier bekannten Objekten für die Oberflächenabdichtung von Deponien aus der gesamten Bundesrepublik, die sich aktuell in der Planung oder Bauausführung befinden, ergibt die Genehmigungs- und Baupraxis, dass ca. 75 % aller Deponien mit alternativen Systemaufbauten realisiert werden, während nur 25 % dem in den gesetzlichen Vorschriften verankerten Regelaufbau folgen. Die hier berücksichtigten Alternativen betreffen nur Alternativlösungen für die im Regelsystem vorgesehene Dichtung und für die oberhalb angeordnete Dränschicht zur Ableitung des durchsickernden Niederschlagswassers. Alternative Entwürfe und Ausführungen für Rekultivierungsschichten sowie für Ausgleichs- oder Dränschicht unterhalb der Dichtung werden nicht betrachtet. Auch wird die häufig praktizierte und notwendige Integration von Trenn- und Filtervliesstoffen zwischen Rekultivierungsschicht und Dränschicht oder die Anordnung von Schutzvliesstoffen zum Schutz einer ggf. im Aufbau des Dichtungssystems vorhandenen Kunststoffdichtungsbahn hier nicht als Alternativaufbau angesehen, sondern als notwendiger Bestandteil des Regelaufbaus gewertet. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Anwendung dieser Geokunststoffkomponenten weitgehend diskussionslos erfolgt. Für Schutzvliesstoffe sicherlich, weil über eine Zulassung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ein identisch hohes Qualitäts- und Vertrauensniveau dokumentiert werden kann wie für die BAM-zugelassene Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und für Trenn- und Filtervliesstoffe, weil sie seit Jahrzehnten Anwendungspraxis in der Geotechnik vor allem bei Infrastrukturprojekten sind und ihre Notwendigkeit und technische Wirksamkeit bei Beachtung der bekannten Filterregeln akzeptiert sind. Mit der häufig erhobenen Forderung, für diese Vliesstoffe als Komponente des Oberflächenabdichtungssystems Rohstoffe und Fasern der BAM-zugelassenen Schutzvliesstoffe einzusetzen, kann zudem eine dem Maßstab für BAM-zugelassene Kunststoffdichtungsbahnen entsprechende Beständigkeit erwartet und erreicht werden.

Die bei den betrachteten 95 Oberflächenabdichtungssystemen vorgefundene Anzahl von Alternativlösungen für Dichtungsschicht und Sickerwasserdränschicht sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Ausführungsformen von Dichtungs- und Dränschichten bei aktuellen Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen in Deutschland

Ausführungsformen	Anzahl (Stück)	Verteilung (%)
Regelsystem	25	26
Alternative Dichtungs- und Dränschicht	25	26
Alternative Dichtungsschicht	14	15
Alternative Dränschicht	31	33
SUMME	95	100

Auf der Basis der ausgewerteten Objekte werden bereits knapp 60 % der aktuellen Oberflächenabdichtungssysteme mit alternativen Dränschichten ausgeführt. Als Alternative kommen ausschließlich geosynthetische Dränsysteme (Dränmatten) zur Anwendung. Der seit Herbst 2004 vorliegende Eignungsnachweis der BAM für ein Secudrän-Produkt (Secudrän® R201Z WD601Z R201Z) als Bestandteil einer endgültigen Oberflächendichtung von Deponien hat diese Alternative zusätzlich deutlich "genehmigungsfähiger" gemacht.

Bemerkenswert ist aber der Umkehrschluss, dass bei ca. 60 % der Objekte die vom Regelsystem vorgesehene 30 cm dicke Dränschicht aus Kies 16/32 mm nicht gebaut wird, obwohl an der langen Funktionsfähigkeit und Beständigkeit keine dokumentierten Zweifel bestehen, wenn die Filterabstufung zwischen Rekultivierungsschicht und Dränschicht ggf. durch einen geotextilen Vliesstofffilter gegeben ist. Für die Anwendung der Kunststoffdränelemente werden daher wirtschaftliche Gründe ggf. in Verbindung mit Mangel an geeignetem Material ausschlaggebend sein.

Im Gegensatz hierzu wird bei ca. 60 % der betrachteten Objekte die natürliche mineralische Dichtung gebaut, für die es aktuell nicht möglich ist, die Langzeitwirksamkeit zu beurteilen und für die eine Vielzahl von Untersuchungsergebnissen aus Labor und Feld vorliegen, die die Wirksamkeit in Frage stellen. Besonders kritisch sind hier die Anwendungen, in denen die natürliche mineralische Dichtung als alleiniges Dichtungselement vorgesehen ist. In vielen Fällen kompensiert die Kombinationsdichtung mit einer BAM-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahn (KDB) die sonst nicht vorhandene Austrocknungs- und Durchwurzelungssicherheit für das erdbautechnisch aufwendig hergestellte mineralische Dichtungselement.

Durch diese Wirksamkeitssymbiose von KDB und mineralischer Dichtung muss man sich allerdings zwangsläufig von der alten Philosophie, dass die begrenzte Lebensdauer einer KDB von der dicken mineralischen Dichtungsschicht überdauert wird, die "ewig" dichtwirksam ist, verabschieden.

Für die erdbautechnisch hergestellte mineralische Dichtung sind Wirksamkeits- und Beständigkeitsmodelle und –nachweise für betrachtete lange Funktionsdauern (> 100 Jahre) allerdings noch zu entwickeln, während sie für Alternativlösungen wie z.B. für Geokunststoffe oder polymervergütete mineralische Dichtungen bereits erarbeitet wurden.

Bei den Alternativen zur natürlichen mineralischen Dichtung wurden, bezogen auf die Gesamtzahl der betrachteten 95 Objekte, 18 % nur mit einer KDB, 17% mit einer geosynthetischen Tondichtungsbahn (Bentonitmatte) - teilweise als alleiniges Dichtungselement, teilweise als Bestandteil einer Kombinationsdichtung - und 5 % mit polymervergüteter mineralischer Dichtung als Bestandteil einer Kombinationsdichtung genehmigt oder ausgeführt.

3 GEOSYNTHETISCHE KOMPONENTEN VON OBERFLÄCHENABDICHTUNGSSYSTEMEN

3.1 Kunststoffdichtungsbahnen aus PEHD mit BAM-Zulassung

Die von der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM, Berlin) zugelassenen, mindestens 2,5 mm dicken, aus hochwertigen definierten Formmassen hergestellten PEHD-Dichtungsbahnen, nach definierten Qualitätsanforderungen von zertifizierten Fachverlegern eingebaut, sind das zurzeit verlässlichste und vertrauenswürdigste Dichtungselement für Dichtungssysteme an der Deponiebasis oder Deponieoberfläche. Die der BAM-Zulassung zugrunde liegenden Prüfkriterien erlauben die sichere Extrapolation von Beständigkeit und Wirksamkeit glatter und strukturierter (oberflächenrauer) Dichtungsbahnen über einen Zeitraum > 100 Jahre für Bauwerke mit langen Funktionsdauern gemäß EU-Empfehlung und damit für die im europäischen Konsens längsten Nutzungsperioden für Bauwerke. Obwohl eine über 100 Jahre hinausgehende Extrapolation des in Zeitrafferversuchen ermittelten Alterungsverhaltens der Dichtungsbahnen aus methodischen Gründen mit Unsicherheiten behaftet ist, ist eine deutlich längere Lebens- und Nutzungsdauer als 100 Jahre allgemeine Erwartungshaltung der beteiligten Fachleute und es ist zu erwarten, dass archeologische Grabungen in ferner Zukunft die BAM-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen immer noch vorfinden.

Auf die gerade im Hinblick auf Alterungsuntersuchungen an Kunststoffdichtungsbahnen entscheidenden Unterschiede zwischen BAM-Zulassung, DIBt-Zulassung oder Österreichische Norm (ÖNORM) S2073 weist Müller nachdrücklich hin [11]. Mit den für DIBt-Zulassungen geforderten Prüfungen im Hinblick auf 25 Jahre Nutzungsdauer sind vergleichbare Aussagen zur Beständigkeit und langen Nutzungsdauer von Kunststoffdichtungsbahnen, wie sie Grundlage der BAM-Zulassungen sind, nicht möglich. Diese Einschränkungen der DIBt-Zulassungen gelten nach Müller erst recht für nach ÖNORM S2073 geprüfte Dichtungsbahnen, die nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Müller weist auch darauf hin, dass BAM-zugelassene Kunststoffdichtungsbahnen sehr viel kostenaufwendiger hergestellt werden müssen, da sehr hohe Anforderungen erfüllt werden müssen, wie z.B. durch unterschiedliche Definition der Mindestdicke (BAM-Anforderung: Alle Proben müssen Dicken $\geq 2,5$ mm aufweisen), durch wesentlich geringere zulässige Schrumpfwerte der produzierten Bahn sowie einen vergleichsweise hohen Prüf- und Überwachungsaufwand – Qualität hat ihren Preis.

3.2 Geosynthetische Tondichtungsbahnen / Bentonitmatten

Seit über 15 Jahren stehen fabrikmäßig gefertigte, schubkraftübertragende geosynthetische Tondichtungsbahnen (vernadelte Bentonitmatten) als Ersatz für die erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtungen zur Verfügung. Erste durch spätere Aufgrabungen positiv bewertete Anwendungserfahrungen mit Bentonitmatten (Bentofix D) als alleiniges Dichtungselement im Dichtungssystem für eine Deponieoberfläche gehen zurück auf das Jahr 1990 (Deponie Grabow [6]). Aus diesen Anfängen heraus hat sich national, aber besonders international eine breite Anwendung von vernadelten geosynthetischen Tondichtungsbahnen als Ersatz erdbautechnisch hergestellter mineralischer Dichtungen bei Basis- und Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien entwickelt.

Die Entwicklung der Bentonitmattenanwendung in Deutschland ist wesentlich geprägt durch sehr mühsame Gleichwertigkeitsdiskussionen, zum Teil mit Nachweisszenarien, die für das mineralische Dichtungselement des Regelsystems nie erbracht werden mussten und aktuell auch nicht erbracht werden können.

Auf der Basis der "Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen" des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, Berlin) wurde ein Anforderungskatalog für die Zulassung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen DK I (Deponieklasse 1) erarbeitet (Tabelle 3) und schließlich wurden für einige Produkte Zulassungen für die Anwendung in Oberflächenabdichtungssystemen DK I 1997/1998 erteilt. Die Zulassungen waren für 5 Jahre befristet und mit Auflagen verbunden.

DIBt-Anforderungskatalog für die Eignungsbeurteilung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen der DK I	
Dichtigkeit = 26 nachzuweisende Kriterien	
Beständigkeit = 15 nachzuweisende Kriterien	
Herstellbarkeit = 9 nachzuweisende Kriterien	
Qualitätssicherung = 7 nachzuweisende Kriterien	
Standssicherheit = 6 nachzuweisende Kriterien	
Insgesamt mussten 54 Anforderungskriterien nachgewiesen werden!!!	

Tabelle 3: Überblick über die Anforderungen des DIBt für die Zulassung von Bentonitmatten (DKI)

Für die am Markt überwiegend verwendeten einschichtigen (Standard)Produkte sollten in einem anschließenden Untersuchungsprogramm die erforderlichen Nachweise vorgelegt werden, dass die schubkraftübertragenden vernadelten Bentonitmatten unter üblichen Systemrandbedingungen das Heilungsvermögen besitzen, das man in der Fachwelt irrtümlich den dicken erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtungen zugeschrieben hat, nämlich die Fähigkeit, nach Austrocknung und Rissbildung die eingetretene Strukturbildung in ausreichendem Umfang zu heilen und eine den Anforderungen genügende Dichtungswirksamkeit langfristig sicherzustellen. Darüber hinaus sollten für alle zugelassenen Bentonitmatten weitere Nachweise zum Alterungsverhalten der geotextilen Komponenten vorgelegt werden.

Das DIBt hat leider 1998 die Zulassungsaktivitäten für Deponiebauprodukte eingestellt, sodass ein Ansprechgremium für eine Verlängerung der Zulassung nicht mehr zur Verfügung stand. Zwischenzeitlich wurden aber für Bentofix-Produkte die Auflagen abgearbeitet und der LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnische Vollzugsfragen", die sich nunmehr mit der Eignungsbeurteilung von Alternativkomponenten zum Regeldichtungssystem befasst, vorgestellt.

Zum Nachweis der Strukturheilung nach Wiedervernässung wurden in der zweiten Hälfte der 90er Jahre umfangreiche Untersuchungen durch 8 Aufgrabungen an 7 verschiedenen Deponieoberflächenabdichtungssystemen durchgeführt. Die Bentonitflächengewichte der ausgegrabenen Produkte lagen zwischen 3 kg/m² und 5 kg/m². Die Beanspruchungsdauer unter Feldbedingungen betrug 15 bis 72 Monate. Die Überdeckungen der Bentonitmatten lagen zwischen 0,4 m und 1,0 m. Die Proben entstammten Klimaregionen in Deutschland, deren durchschnittliche Jahresniederschläge vom Deutschen Wetterdienst mit ca. 600 mm/Jahr bis ca. 1200 mm/Jahr angegeben werden. In Bezug auf die üblichen Beanspruchungsgrößen wie Ionenaustausch, Frost, Trockenstress und Durchwurzelung unterlagen alle Proben den für die jeweilige Region und ausgeführten Systemen maßgeblichen Beanspruchungen.

Die Aufgrabungen wurden stets durch unabhängige Gutachter mit sehr großer Sorgfalt durchgeführt oder begleitet, um keine Störungen der Proben zu verursachen. Die Durchlässigkeitsversuche wurden nach ASTM D 5887 in Triaxialzellen durchgeführt, bei denen sowohl die in die Proben hineinfließenden als auch die herausfließenden Wassermengen getrennt gemessen werden können. Durch die getrennte Messung ist es möglich, die Sättigungsphase von der stationären Durchflussphase zu unterscheiden und Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Ergänzt durch Bewässerungsversuche in einer Lysimeteranlage der Universität Gesamthochschule Essen [9] und Röntgenuntersuchungen des TÜV Nord konnten die Strukturheilungsprozesse nach Wiedervernässung und die zeitabhängige Verbesserung der Dichtwirkung bis nahezu zum Ausgangswert als "Selbstheilungsfunktion" dargestellt werden.

Bild 1 zeigt die durch Röntgenaufnahmen transparent gemachte Gefügeheilung nach Austrocknung mit Schrumpfrissbildung eines Bentofix-Produktes mit einlagiger Bentonitdichtungsschicht.

Die vergleichsweise schnelle Reaktion von vernadelten Bentonitmatten mit Austrocknungsrisen auf ein erneutes Wasserangebot muss in Zusammenhang mit der vollflächigen Vernadelung gesehen werden. Bei fortgesetztem Trockenstress überschreiten die Zugspannungen die Kohäsion/Zugfestigkeit des Bentonits und es bildet sich eine mosaikartige kleinstrukturierte Fläche mit vielen, aber kleinen Rissen (Bild 1, links), die bevorzugt von Faserbündel zu Faserbündel laufen. Bei erneuter Wasserzugabe und ausreichender Vertikalspannung aus den überlagernden Schichten können sich die Rissufer dieser kleinen Risse infolge der Plastifizierung des Bentonits wieder schnell annähern und eine ausreichende Dichtungswirkung sicherstellen (Bild 1, Mitte und rechts).

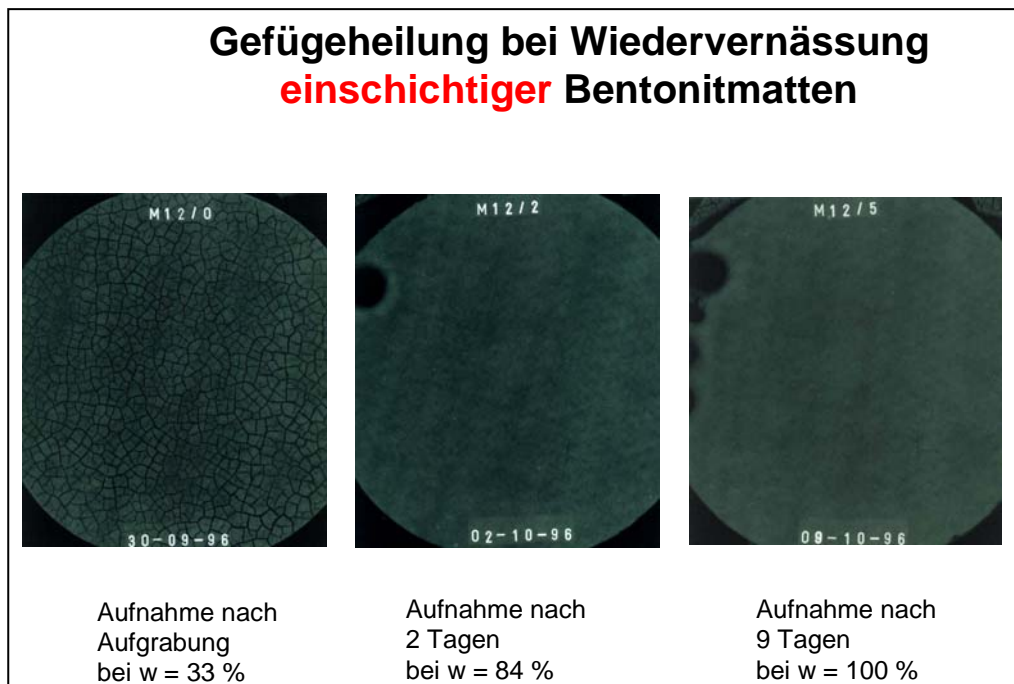


Bild 1: Gefügeheilung bei Wiedervernässung einschichtiger Bentonitmatten

Der Einfluss künstlicher, mehrfach nacheinander ablaufender Trocknungs- und Wiederbefeuchtungszyklen wurde an der Materialforschungs- und Versuchsanstalt der Bauhaus Universität Weimar untersucht. Dabei ergaben sich keine Hinweise darauf, dass dieses Strukturheilungspotenzial nach Ionenaustausch nur eine begrenzte Zeit zur Verfügung stünde. Ein solcher Effekt wäre nur zu erwarten, wenn infolge von Trockenstress mineralogische Veränderungen im (ionenausgetauschten) Natrium-Bentonit stattfinden würden. Alle mineralogischen Untersuchungen der bisher durchgeführten Ausgrabungen haben solche Veränderungen jedoch in keinem einzigen Fall nachweisen können.

Für einen weiteren Nachweis der langfristig vorhandenen Dichtungswirkung unter Feldbedingungen hat die Firma NAUE 1998 eine spezielle Lysimeteranlage gebaut, die aus 6 Einzellysimetern besteht und bis heute - wissenschaftlich und technisch begleitet durch das Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau an der Universität Hannover (Prof. Blümel), die pedo tec GmbH in Berlin (Dr. Markwardt) und die Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Abfallwirtschaft in Minden (Dr. Reuter) - ununterbrochen betrieben wird. Aufbau und erste Messergebnisse sind detailliert in [1] beschrieben.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt deutlich die Unterschiede sommerlicher Trocken- und winterlicher Nässeperioden. Bild 2 zeigt beispielhaft für einen Lysimeter die entsprechenden Wirkungsgrade einer Standard-Bentofix-Bentonitmatte bzw. die Systemwirksamkeit des gesamten Aufbaus hinsichtlich der vorhandenen Dichtungswirkung.

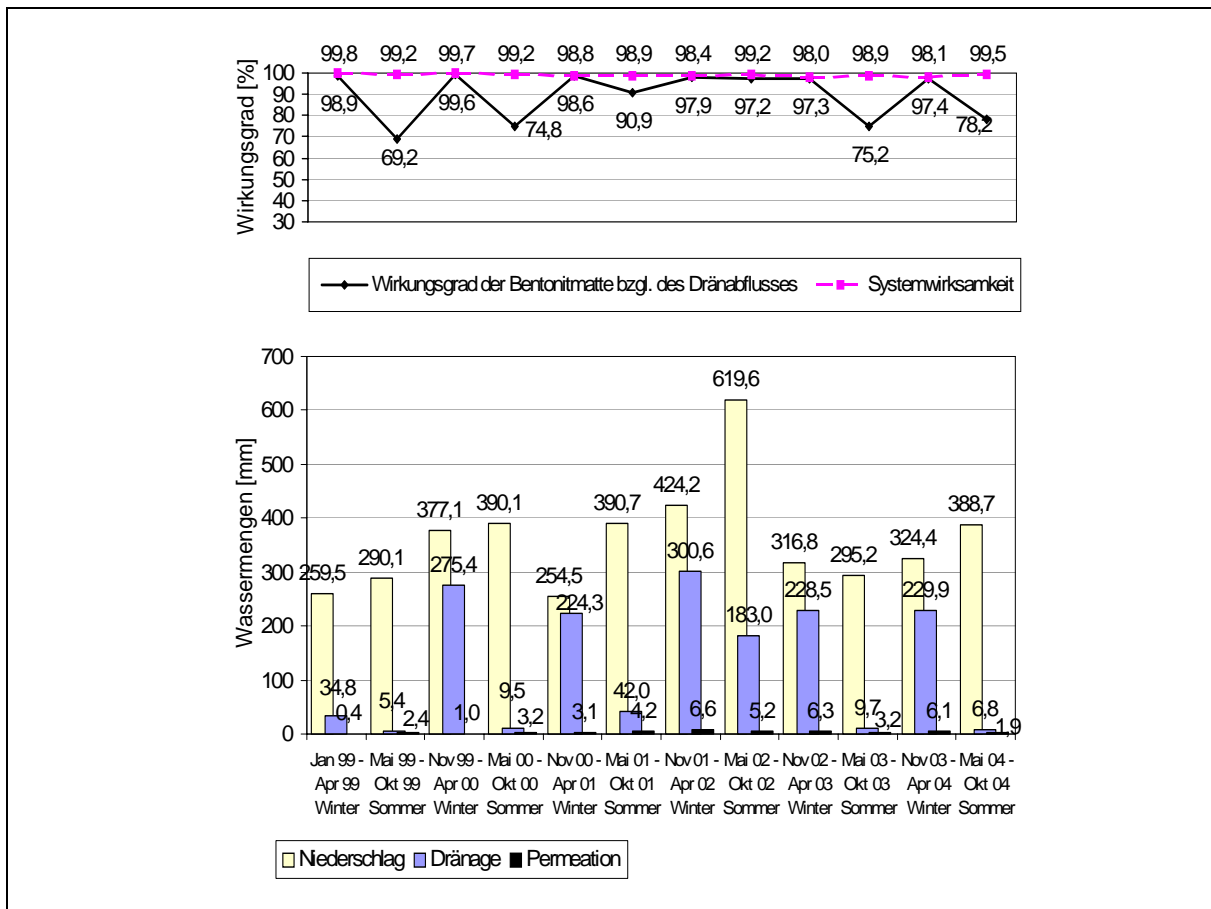


Bild 2: Lysimeter 3 – Auswirkungen von Sommer- und Winterzyklen auf die Dichtungswirkung einer einschichtigen Standard-Bentofix-Bentonitmatte

Dabei wurde der Wirkungsgrad der Bentonitmatte als Quotient der Durchsickerung bezogen auf die Dränspende, also den bis zur Bentonitmatte sickernden Wasseranteil des Niederschlags, berechnet. Die Systemwirksamkeit ergibt sich dagegen aus der Durchsickerung bezogen auf den gesamten Niederschlag und beschreibt neben der Sperrwirkung der Bentonitmatte auch den Verdunstungsanteil, der aus der Rekultivierungsschicht und der Vegetation herrührt. Man erkennt deutlich die in jedem Sommer stattfindende Reduzierung des Wirkungsgrades der Bentonitmatte durch Austrocknungsvorgänge, die aber durch sommerliche Evapotranspiration der Rekultivierungsschicht kompensiert wird, sodass die hohe Systemwirksamkeit von ca. 98 - 99 % erhalten bleibt. Genauso deutlich wird aber auch die in jedem Winter darauf folgende Verbesserung des Wirkungsgrades, die immer wieder das Vorjahresniveau erreicht. Da ein Ionenaustausch (Austausch von Na-Ionen gegen Ca-Ionen im Natrium-Bentonit) in der Bentonitschicht der im Lysimeter eingebauten Bentonitmatten 2 bis 3 Jahre nach Einbau eingetreten ist, dokumentieren die Ergebnisse, dass eine Verminderung sowohl der Dichtwirkung von Bentofix wie auch der Systemwirksamkeit infolge Ionenaustausch in Oberflächenabdichtungssystemen mit vergleichbarem Aufbau auch nach vielen abwechselnden Trocken- und Nasszyklen nicht zu befürchten ist.

Zum Nachweis der Alterungsbeständigkeit der geotextilen Komponenten und der langfristig sicheren Schubkraftübertragung an Böschungen eines Deponiedichtungssystems beauftragte die Firma NAUE im Jahr 2000 die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, mit der Durchführung eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens über die "Langzeitscherfestigkeit von Bentonitmatten". Hierbei sollten besonders Analogien in der Beurteilung der langjährigen Schubkraftübertragung bei strukturierten Kunststoffdichtungsbahnen genutzt werden, um direkt vergleichbare Aussagen mit BAM-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen zu ermöglichen. Nach Entwicklung und Durchführung entsprechender Zeitstandversuche, die Müller [10] im Hinblick auf Prüfverfahren und Extrapolation der Ergebnisse ausführlich erläutert, konnte die BAM im Jahre 2003 ein "Gutachten über die Langzeit-Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix B 4000" mit folgender Kernaussage vorlegen (Zitat aus [2]):

"Proben aus der Bentonitmatte Bentofix B 4000 zeigen in den Zeitstand-Scherversuchen bei 80°C außerordentlich lange Laufzeiten, die Mindeststandzeit von 365 Tage wird deutlich überschritten und bislang wurde noch in keinem Versuch ein Versagen beobachtet. Eine ARRHENIUS-Extrapolation der bisher erreichten Laufzeiten ergibt schon eine untere Grenze der Funktionsdauer bei 15°C von 200 Jahren".

Die Versuche wurden und werden weitergeführt. Ein Versagen wurde bisher nicht beobachtet und die Standzeiten können inzwischen für Bentofix B 4000 auf über 400 Jahre extrapoliert werden. Zusammengefasst ergibt sich, dass bei der Anwendung in Deponieoberflächenabdichtungen die innere Scherfestigkeit allein der Geokunststoffkomponenten in der Bentonitmatte Bentofix B 4000 ausreicht, um einen langfristig standsicheren Dichtungsaufbau zu gewährleisten, unabhängig von der Wassergehaltsentwicklung des Bentonites [3].

Wie sieht es jedoch mit der langfristigen Wassergehaltsänderung und der Scherfestigkeit tonmineralischer Abdichtungen aus? Wie reagiert die Fachwelt auf Schadensfälle durch Böschungsrutschungen infolge lokal aufgeweichter Tonschichten? Welche Scherfestigkeit ist für eine mit Trockenrissen durchsetzte tonmineralische Dichtung anzusetzen? Wie ist die Scherfestigkeit einzuschätzen, wenn sich diese Trockenrisse infolge von Niederschlägen spontan wieder mit Wasser füllen? Sind Betrachtungen dieser Lastfälle, labortechnische Prüfungen und rechnerische Nachweise dieser Abhängigkeiten Bestandteile aktueller abfallrechtlicher Genehmigungsverfahren auch bei tonmineralischen Dichtungen? Nach Kenntnis der Autoren ist das nicht der Fall. Stattdessen wird in entsprechenden Genehmigungsplanungen die Standsicherheit der mineralischen Regelabdichtung auch für den Endzustand ausschließlich mit Einbaukennwerten der Scherfestigkeit geführt.

Wohlgemerkt: Die Autoren fordern nicht zu einer (verwissenschaftlichten) Betrachtung der Eigenschaften tonmineralischer Dichtungen auf. Es soll jedoch deutlich darauf hingewiesen werden, dass sich in der Praxis speziell eine Schiefelage zu Ungunsten von Bentonitmatten ausgebildet hat, da diese sich an Forderungen messen lassen müssen, deren positiver Nachweis für die mineralische Regeldichtung bisher nicht erbracht worden ist (zumindest nicht im Konsens aller Fachleute) und die im Sinne der Ausführungen von Witt [15] deutlich über das übliche ingenieurtechnisch erforderliche und angemessene Sicherheitsniveau hinausgehen.

3.3 Kunststoffdränsysteme

Eine Flächenentwässerung oberhalb des Dichtungselementes zum Sammeln und Ableiten von Sickerwasser aus den überlagernden Rekultivierungsschichten muss Bestandteil eines endgültigen Oberflächenabdichtungssystems einer Deponie sein. Die zuständige Genehmigungsbehörde kann auf Antrag des Deponiebetreibers Abweichungen von der geforderten Schichtstärke und dem Durchlässigkeitsbeiwert zulassen, wenn nachgewiesen wird, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht und die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht langfristig gewährleistet sind.

Seit Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts haben sich Kunststoffdränsysteme, vor allem als Sandwichprodukte aus Vliesstofffiltern und groben Wirrgelegen aus Kunststoffdrähten, als Sicker- oder Dränschicht zunehmend Marktanteile erobert. Größte Vorbehalte ergaben sich anfangs, wie bei allen Geokunststoffalternativen, durch den Vergleich der relativ dicken erdbautechnisch hergestellten mineralischen Schichten zu den geringen Dicken der Geokunststoffe (Dränschicht z.B. 30 cm dicke Kiesfilter gegen 1 cm dünnes Kunststoffdränsystem) und durch Zweifel an einer ausreichenden Beständigkeit bzw. Wirksamkeit.

Die zunehmende Akzeptanz der PEHD-Kunststoffdichtungsbahn als verlässlichstes Dichtungselement im Deponiebau, die als notwendig erkannte Anwendung von Schutzvliesstoffen zum Schutz der hochwertigen, aber empfindlichen KDB und von Filtervliesstoffen zwischen oft feinkörnigen Rekultivierungsschichten und einer groben Kiesdränschicht, in Verbindung mit der Vertrauen und Qualität fördernden Zulassungstätigkeit der BAM schafften ein Klima, in dem auch Kunststoffdränsystemen mehr Beachtung geschenkt wurde. Die genaue Untersuchung des Materialverhaltens und die Aufgrabung und Untersuchung langjährig eingebauter Produkte wurde von den Herstellern vorangetrieben. Die BAM erarbeitete im Dialog mit allen Beteiligten – Fachbehörden, Planern, Fremdüberwachern, Baufirmen und Herstellern – die Richtlinie "Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten", Berlin, 2003.

Die erste konkrete Eignungsprüfung gemäß der o.g. BAM-Richtlinie wurde dann unter zusätzlicher analoger Beachtung der Ausführungen und Anforderungen zur Langzeitbeständigkeit in den "Grundsätzen für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen" des DIBt durchgeführt. Die Prüfung der Langzeitscherfestigkeit des Verbundproduktes aus Vliesstofffilterschichten und Dränkern erfolgte wieder in Anlehnung an die Anforderungen und Prüfungen für strukturierte Kunststoffdichtungsbahnen aus der KDB-Zulassungsrichtlinie der BAM. Damit wird ein identisches Nachweinsniveau für Kunststoffdichtungsbahnen, Bentonitmatten und Dränsystemen für Bauwerke mit langer Nutzungsdauer (> 100 Jahre) geschaffen.

Im September 2004 konnte für Secudrän R201Z WD601Z R201Z der erste Eignungsnachweis für ein Kunststoffdränelement für die endgültige Oberflächendichtung von Deponien ausgestellt werden [4].

Bild 3 zeigt den Aufbau des Produktes aus vernadelten Vliesstoffen und eingebetteter Dränschicht aus einem Polypropylen-Wirrgelege in Wellenstruktur. Vliesstoffe und Dränkern sind im rechteckigen Raster punktverschweißt.



Bild 3: Ausschnitt aus dem Kunststoffdränelement Secudrän® R201Z WD601Z R201Z

Vor dem Hintergrund der im August 2005 erneuten dramatischen Hochwasserlagen in Bayern als Ergebnis von Starkniederschlägen aus einer Vb-Wetterlage soll besonders auf das Aufgrabungsergebnis der Testfelder auf der Deponie Kienberg 1999 hingewiesen werden. Hier fand eine Aufgrabung 1 Tag nach Starkregenereignissen, die zur letzten Katastrophen-Hochwassersituation 1999 führten, statt. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich eine Secudrän-Dränmatte und die Regeldrängschicht aus 30 cm Kies 16/32 mm in der Dränleistung nicht unterschieden [14] und die Dränabflüsse als Folge des Starkregens sicher abgeführt werden konnten. 1 Tag nach den Regenfällen zeigte sich im Secudrän-Kunststoffdränsystem keinerlei Rückstau – das Sickerwasser war bereits komplett abgeführt worden. Grundsätzlich gilt, dass die Ermittlung einer maßgebenden Dränspende immer noch wesentlich anspruchsvoller und aufwendiger ist, als die anschließende Bemessung bzw. Auslegung der Wasserableitkapazität des Dränsystems. Für die Ermittlung der Dränspende wird der Einsatz der bekannten Wasserhaushaltsmodelle z.B. nach HELP oder BOWAHALD empfohlen. Die z.B. auch in der GDA-Empfehlung E 2-20 genannten (Vor)Bemessungswerte erscheinen nicht zuletzt vor dem Hintergrund der immer häufiger ausgeführten Rekultivierungsschichtstärken von 1,5 m sehr konservativ.

4 FAZIT UND WERTUNG

Vor dem Hintergrund der aktuellen Erkenntnis, dass derzeit noch keine endgültigen Empfehlungen für die dauerhaft funktionsfähige Gestaltung von Oberflächenabdichtungssystemen mit tonmineralischen Abdichtungsschichten gegeben werden können und in den letzten Jahren zahlreiche Ergebnisse über mangelhafte oder nicht mehr vorhandene Dichtwirksamkeiten erdbautechnisch hergestellter natürlicher mineralischer Dichtungsschichten vorgelegt worden sind, sollte der Gesetzgeber die Anwendung von alternativen Komponenten in Deponieoberflächenabdichtungen fördern, indem er die grundsätzlichen Anforderungen an die Nachweise zur Verwendbarkeit auf das übliche ingenieurtechnische Niveau reduziert [vgl. 15].

Der Gesetzgeber hat der Ingenieurpraxis in der Deponietechnik einen Bärendienst erwiesen als er im Vorwort zur Konzeption der TA Siedlungsabfall (nachzulesen in der im Bundesanzeiger veröffentlichten Fassung) Deponien als "Bauwerke für die Ewigkeit" definierte und daraus die vom Regelabdichtungssystem (zumindest bei Zugrundelegung der Mindestanforderungen) nicht erfüllbare Forderung nach einer nachsorgefreien Deponie, resp. Oberflächenabdichtung, zum Standard behördlicher Genehmigungen erhob.

Im Sinne des von Witt [15] dokumentierten Aufrufs zu mehr Ehrlichkeit und Gelassenheit im Umgang mit Oberflächenabdichtungen von Deponien sind die Grenzen material- und ingenieurtechnischer Prognosen offen zu bekennen. Nachsorgefrei werden auch in Zukunft nur die Deponien sein, deren Abfälle vor (oder nach) der Ablagerung entsprechend (vor)behandelt worden sind oder die von vornherein über kein Gefährdungspotenzial verfügen.

Den Deponiebetreibern kann im Hinblick auf die vor dem Hintergrund der aktuellen Rechtslage anzustrebenden abfallrechtlichen Entlassung einer Deponie aus der Nachsorge nur empfohlen werden, bei den Genehmigungsbehörden für Lösungen der Oberflächendichtung einzutreten, die nachweislich über eine lange Nutzungsdauer die Einhaltung der Schutzziele für Grundwasser und Umwelt gewährleisten. Aus Gesprächen mit der LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnische Vollzugsfragen" ist bekannt, dass einer möglichen Entlassung aus der Nachsorge eine umfangreiche Prüfung und Bestandsaufnahme in jedem Einzelfall vorausgehen wird und ein Bonus oder gar eine Gewährleistung für eine Entlassung aus der Nachsorge bei Anwendung des Regelsystems in der Oberflächendichtung der Deponie nicht erwartet werden darf.

Die Regeldichtung mit bisher eindeutiger Fokussierung auf die erdbautechnisch hergestellte natürliche mineralische Dichtung als das dauerhaft wirksame Dichtungselement braucht neue Entwurfs- und Ausführungskonzepte mit wahrscheinlich deutlich höherem Nachweis-, Prüf- und Ausführungsaufwand. Über geologische/mineralogische Analogien von langer Beständigkeit des Werkstoffes "Tonmineral" an sich auf ebenso lange Wirksamkeit der wasser- und luftporenhaltigen Dichtungsschicht schließen zu wollen, ist nicht zielführend, wie viele Ergebnisse aus der Praxis deutlich zeigen.

BAM-zugelassene PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen, gemäß Zulassungsbedingungen produziert und vom zertifizierten Fachverleger sorgfältig eingebaut, bieten die Gewähr für Nutzungsdauern, die alle seriösen ingenieurtechnischen Prognosezeiträume deutlich überschreiten. Entsprechendes Vertrauen in langfristige Wirksamkeiten darf für Kunststoffdränsysteme mit BAM-Eignungsnachweis und Bentonitmatten mit dem Nachweispaket aus alter DIBt-Zulassung, ergänzt um den Nachweis der Gefügeheilung und langfristig sicherer Schubkraftübertragung von der BAM – geprüft in direkter Analogie zu den auch bei der LAGA akzeptierten Kunststoffdichtungsbahnen – erwartet werden.

Die Deponietechnik der 90er Jahre hatte sich zum Ziel gesetzt, dass die Deponien dieser Zeit nicht zu den Altlasten für die nachfolgenden Generationen werden dürfen. Eignungsgeprüfte Geokunststoffe helfen, diese Ziel über Zeiträume sicherzustellen, die die Grenzen ingenieurtechnischer und wissenschaftlicher Nachweisführung überschreiten.

5 LITERATUR

- [1] Blümel, W., Müller-Kirchenbauer, A., Ehrenberg, H., von Maubeuge, K.: Langzeituntersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Bentonitmatten in Lysimetern. Karlsruher Deponieseminar 2002, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Heft 125, Erich Schmidt Verlag 2003.
- [2] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM): Gutachten über die Langzeit-Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix B 4000, Dezember 2003, unveröffentlicht.
- [3] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM): Gutachten über die Langzeit-Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix B 4000, 2. aktualisierte Fassung, Juni 2005, unveröffentlicht.
- [4] Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung (BAM): Gutachten über die Eignung des Kunststoff-Dränelements Secudrän® R201Z WD601Z R201Z für die endgültige Oberflächenabdichtung von Deponien, September 2004, unveröffentlicht.
- [5] Burkhardt, G. und Egloffstein, T.: Die mineralische Oberflächenabdichtung – Quo vadis? Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2001: Neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis – Neuerungen durch die Abfallablagerungs- und Deponieverordnung. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 122, Erich Schmidt Verlag, S. 223-246.
- [6] Heerten, G.: Bentonitmatten als mineralisches Dichtungselement im Umweltschutz. 20. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoffzentrum Würzburg, Eigenverlag 2004.
- [7] Henken-Mellies, W.U., Gartung, E.: Wirksamkeit einfacher Deponie-Oberflächenabdeckungen: Langzeituntersuchung an einem Versuchsfeld in Aurach. Müll und Abfall, Heft 1/2002, S. 28-32.
- [8] LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnische Vollzugsfragen": Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme, 10.09.2004.
- [9] Maile, A.: Leistungsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen zur Verminderung von Sickerwasser und Schadstoffemissionen bei Landschaftskörpern. Studienreihe Abfall-Now, Band 15, Abfall-Now e.V. Stuttgart, Eigenverlag 1997.
- [10] Müller, W.: Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten. 19. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoffzentrum Würzburg, Eigenverlag 2003.
- [11] Müller, W.: Hauptsache: schwarz und billig? Zur Eignung "alternativer PE-HD-Dichtungsbahnen für endgültige Deponieoberflächenabdichtungen. Müll und Abfall, 8/2005, S. 392 – 397.
- [12] Ramke, H.-G., Melchior, S., Maier-Harth, U., Gartung, E., Witt, K. J., Heibroock, G. und Bohne, K.: Ergebnisse des Status-Workshops "Austrocknungsverhalten von

mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen". Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002: Auswirkungen der AbfAbIV und der DepV auf Betreiber, Behörden, Planer, Hersteller und die Bauindustrie. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 125, Erich Schmidt Verlag, S. 115-166.

- [13] Reuter, E.: Stand der Fortschreibung der DIBt-Zulassungen für Bentofix®. 4. Geokunststoff-Kolloquium der NAUE Unternehmensgruppe, Garmisch-Partenkirchen, Januar 2005.
- [14] Steffen, H.: Nachweis der Leistungsfähigkeit von Secudrän 316 DS600 316 im Vergleich zu einem Kiesdrän-System anhand von Lysimeterversuchen auf der Deponie Kienberg. Essen, 22. Januar 2004.
- [15] Witt, K.J.: Unorthodoxe Gedanken zur Eignungsfeststellung von mineralischen Abdichtungskomponenten für Oberflächenabdichtungen von Deponien. 21. Fachtagung "Die sichere Deponie", AK GWS / Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, Februar 2005.
- [16] Witt, K.J., Zeh, R.M. und Fabian, F.: Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen. Müll und Abfall, Heft 11/2004, S. 540-546.