

Zur Langzeitwirksamkeit von Komponenten für Deponie- oberflächenabdichtungen

Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten

1. Einleitung

In Deutschland und in der Europäischen Gemeinschaft wird politisch das Fernziel verfolgt, durch Abfallvermeidung und Abfallverwertung geschlossene Stoffströme zu erzeugen, die die Deponie zur Abfallablagerung zum Auslaufmodell werden lassen. Aktuell befinden sich Europa und auch Deutschland aber noch voll in der Ablagerungsphase mit entsprechendem Deponiebetrieb. Zum Schutz der Umwelt sind die Deponien auf einer geologischen Barriere und mit Basis- und Oberflächenabdichtungssystem anzulegen.

Oberflächenabdichtungssysteme sollen die Umweltbelastungen, die von einer verfüllten und abgeschlossenen Deponie ausgehen können, auf Dauer (nach dem Vorsorgeprinzip) auf ein vertretbares Maß begrenzen. Das Dichtungssystem soll die unkontrollierte Freisetzung von Deponiegas und Schadstoffen sowie die Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper dauerhaft verhindern. Mit dem Zurückhalten und der anzustrebenden Verwertung von Deponiegas werden erhebliche Emissionen des hochgradig klimaschädigenden Methangases (CH₄) verhindert.

In den relevanten deutschen Rechtsverordnungen und Verwaltungsvorschriften ist geregelt, dass die Betriebsphase einer Deponie die Ablagerungsphase und die Stilllegungsphase umfasst, an der sich die Nachsorgephase bis zur Feststellung des Abschlusses der Nachsorge nach § 36 Abs. 5 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes durch die zuständige Behörde anschließt, wenn keinerlei Gefährdung der Umwelt und des Wohls der Allgemeinheit durch die Deponie mehr zu befürchten ist. Der Zeitraum vom Beginn der Ablagerungsphase bis zum Abschluss der Nachsorge kann viele Jahrzehnte umfassen. Allein für die Nachsorgephase wird von mindestens 30 Jahren für die Deponien der Klasse I bis III ausgegangen mit entsprechender Sicherheitsleistung vom Betreiber über diesen Zeitraum. In der Nachsorgephase sollen neben der umfassenden und regelmäßigen Kontrolle der Deponie und der Dichtungssysteme auch "Langzeitsicherungsmaßnahmen" wie das Reparieren von Böschungsrutschungen oder des Entwässerungssystems ausgeführt werden. Aus diesen zeitlichen Abläufen können Vorgaben für erforderliche Langzeitwirksam-

keiten unter Beachtung der Kontroll- und Eingriffsmöglichkeiten für Komponenten von Oberflächenabdichtungssystemen abgeleitet und begründet werden.

2. Die neue integrierte Deponieverordnung

Zurzeit wird im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit an einer neuen integrierten Deponieverordnung gearbeitet, die drei Rechtsverordnungen (DeponieV, AbfallablagerungsV, DeponieverwertungsV) und drei Verwaltungsvorschriften (TA Abfall, TA Siedlungsabfall, Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Grundwasserschutz) in einer Verordnung zusammenführen soll. Ein erster Arbeitsentwurf der integrierten Deponieverordnung wurde Bundes- und Landesbehörden sowie Deponiebetreibern und sonstigen Wirtschaftsbeteiligten zur Erörterung und Stellungnahme im Februar 2007 zugeleitet [2].

Im Rahmen dieses Beitrages sind die folgenden wesentlichen Eckpunkte des Arbeitsentwurfes relevant (auszugsweise zitiert aus Anschreiben des BMU an Deponiebetreiber und sonstige Wirtschaftsbeteiligte vom 5. Februar 2007):

- Es soll grundsätzlich nur noch nach 5 Deponieklassen (DK 0 bis V) unterschieden werden. Einzelne Erleichterungen, die bisher für die Monodeponie galten, finden sich bei den spezifischen Anforderungen.
- Für die Dichtungssysteme sollen nur noch die grundlegenden Komponenten und deren Leistungsfähigkeit vorgegeben werden. Die Komponenten sollen bundeseinheitlich zugelassen und eignungsgeprüft sein. Die bisherige Vorgabe, wonach immer ein undurchlässiges Oberflächendichtungssystem nach Abklingen der Hauptsetzungen aufzubauen ist, soll flexibilisiert werden. Hierzu soll auch die Möglichkeit eröffnet werden, dass einzelne Dichtungskomponenten durch Kontrollsysteme ersetzt werden können.
- Es sollen konkretere Bedingungen für die Entlassung einer Deponie aus der Nachsorge vorgegeben werden. Hierzu soll der Weg beschritten werden, dass die bisher in der DeponieV vorgegebenen qualitativen Kriterien durch ergänzende Einbeziehung quantitativer Kriterien konkretisiert werden können.

Diese Eckpunkte lassen erkennen, dass nicht nur eine Zusammenführung der genannten Vorschriften beabsichtigt ist, sondern technische Systemanforderungen deutlich revidiert werden sollen, mit erheblichen Auswirkungen vor allem auf den Deponiebetrieb und das

Oberflächendichtungssystem der Deponieklassen I, II und III. Diese Deponieklassen sind im aktuellen Arbeitsentwurf wie folgt definiert:

Deponie der Klasse I:

Deponie für nicht gefährliche Abfälle, die einen sehr geringen organischen Anteil enthalten und bei denen eine sehr geringe Schadstofffreisetzung im Auslaugungsversuch stattfindet.

Deponie der Klasse II:

Deponie für nicht gefährliche Abfälle, einschließlich mechanisch-biologisch behandelter Abfälle, die einen höheren organischen Anteil enthalten als die, die auf Deponien der Klasse I abgelagert werden dürfen, und bei denen auch die Schadstofffreisetzung im Auslaugungsversuch größer ist als bei der Deponieklasse I und zum Ausgleich die Anforderungen an den Deponiestandort und an die Deponieabdichtung höher sind.

Deponie der Klasse III (Deponieklasse III, DK III):

Oberirdische Deponie für gefährliche Abfälle, die einen höheren Anteil an Schadstoffen enthalten als die, die auf einer Deponie der Klasse II abgelagert werden dürfen, und bei denen auch die Schadstofffreisetzung im Auslaugungsversuch größer ist als bei der Deponieklasse II und zum Ausgleich die Anforderungen an Deponieerrichtung und Deponiebetrieb höher sind.

Da von der neuen integrierten Deponieverordnung alle Deponien erfasst werden, auf denen nach dem 31.12.1996 noch abgelagert wurde, bleibt die Deponieklasse II allein wegen der großen Anzahl existierender Deponien von herausragender Bedeutung. Auf diesen Hausmülldeponien durften noch bis zum 1. Juni 2005 unbehandelte Abfälle abgelagert werden. Weiterhin dürfen diese Deponien auch bei nicht TASI-konformer Basisabdichtung, aber bei entsprechender Ertüchtigung und behördlicher Genehmigung, noch bis zum 15. Juli 2009 weiter betrieben werden. Alle Deponien, in denen noch erhebliche organische Abfallmengen eingelagert sein dürften mit entsprechendem Reaktionspotenzial im Hinblick auf Sickerwasserbelastung und Deponiegasbildung.

Nachdem in den letzten Jahren vehement auf die Austrocknungsgefährdung und ungenügende Langzeitwirksamkeitsuntersuchung der erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtungskomponente des bisherigen Regelabdichtungssystems hingewiesen wurde [5, 6, 7, 8] sollen über die integrierte Deponieverordnung zukünftig nur noch bundeseinheitlich zugelassene oder eignungsgeprüfte Komponenten zur Anwendung kommen. Diese Chance gilt es zu nutzen, um für die oben formulierten Umweltschutzziele standort-

gerecht optimal ausgelegte Deponieoberflächenabdichtungssysteme zur Anwendung zu bringen. Hierbei gilt es auch, Begrifflichkeiten wie "auf Dauer", "dauerbeständig", "langzeitbeständig" oder "langzeitwirksam" zu definieren. Hierzu formulierte die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in einem Grundsatzpapier bereits 1999, dass "die Abdichtungssysteme und sonstigen technischen Einrichtungen einer Deponie wie jedes andere von Menschenhand errichtete Bauwerk nicht dauerhaft Bestand haben können" [18].

In den DIBt-Grundsätzen "Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen" [3] sind folgende Definitionen zu finden:

- **Langzeitbeständigkeit:**
Erhalt der maßgebenden Eigenschaften kann nach dem Stand der Technik für einen Zeitraum von 50-100 Jahre angenommen werden.
- **Dauerbeständigkeit:**
Erhalt der maßgebenden Eigenschaften kann nach dem Stand der Technik über mehrere hundert Jahre angenommen werden.

Zum Prognosezeitraum von mehreren hundert Jahren für ein Bauprodukt oder eine Komponente eines Dichtungssystems gilt es parallel darauf hinzuweisen, dass auch das Verhalten des Deponiekörpers und die Einwirkungen z.B. aus Wetter- oder Klimageschehen entsprechend prognostiziert und berücksichtigt werden müssten. Hier führen statistische Unsicherheiten automatisch zu aufwendigeren Lösungen, deren Sinn nur in Relation zum aktuell gegebenen Gefahrenpotenzial für die Umwelt und dem Wohl der Allgemeinheit standort- und objektbezogen beurteilt werden kann. Reuter [19] macht daher zur Begrenzung der Prognoseunsicherheiten und der Kostenspirale den Vorschlag, als "dauerbeständig" eine uneingeschränkte Funktionsfähigkeit aller Komponenten eines Dichtungssystems von mindestens 200 Jahren zu definieren. Einen Prognosezeitraum von 200 Jahren hält er für angemessen, praktikabel und ausreichend. Im Rahmen des technischen und wirtschaftlichen Wettbewerbs muss diese Nachweistiefe für den Nachweis der Langzeitwirksamkeit oder die dauerhafte Funktionsfähigkeit (> 200 Jahre) von allen Systemkomponenten identisch gefordert werden.

Die Europäische Organisation für Technische Zulassungen (EOTA) gibt die in Tabelle 1 angegebenen Hinweise zur wirtschaftlich angemessenen Standzeit von Bauwerken und der anzunehmenden Funktionsdauer von Bauprodukten in Abhängigkeit von der Reparierbarkeit.

| European Organisation for Technical Approvals (EOTA) | | | | |
|---|-------|--|---|-----------------------------|
| Bei der Zuordnung vorgesehener Produkte zu Standzeit-Kategorien sollten die Annahmen der "Interpretative documents", Absatz 1.3.5, bezüglich der "wirtschaftlich angemessenen Standzeit" berücksichtigt werden. | | | | |
| Angenommene Standzeit von Anlagen | | In ETAGs, ETAs und hENs anzunehmende Funktionsdauer von Bauprodukten (Jahre) | | |
| Kategorie | Jahre | Kategorie | | |
| | | reparierbar oder leicht ersetzbar | reparierbar oder mit etwas größerem Aufwand ersetzbar | Funktionsdauer ² |
| kurz | 10 | 10 ¹ | 10 | 10 |
| mittel | 25 | 10 ¹ | 25 | 25 |
| normal | 50 | 10 ¹ | 25 | 50 |
| lang | 100 | 10 ¹ | 25 | 100 |

¹ In Ausnahmefällen oder gerechtfertigten Fällen, z.B. für gewisse Reparaturprodukte, kann eine Funktionsdauer von 3 bis 6 Jahren vorgesehen werden (bei Zustimmung von EOTA TB oder CEN)

² Wenn nicht reparierbar oder "leicht" ersetzbar oder "mit etwas größerem Aufwand" ersetzbar.

Tabelle 1: Hinweise zur Standzeit von Bauwerken und anzunehmender Funktionsdauer von Bauprodukten nach EOTA (Original in englischer Sprache)

3. Langzeitwirksamkeitsnachweise

3.1. Begriffe

Der Titel dieses Beitrages lässt Aussagen zur Langzeitwirksamkeit von Komponenten für Deponieoberflächenabdichtungen und Strategien zur Untersuchung und Bestimmung der Langzeitwirksamkeit erwarten. Hierzu müssen zunächst die Begriffe "Beständigkeit" und "Wirksamkeit" differenziert und eindeutig bestimmt werden:

Eine langzeitwirksame Komponente ist auch automatisch für diesen Zeitraum langzeitbeständig, während eine Aussage zur Langzeitbeständigkeit nicht hinreichend gleichbedeutend mit entsprechender Langzeitwirksamkeit ist. Vielfache Wechselbeziehungen und Einwirkungen können eine langzeitbeständige Komponente für die planmäßige Aufgabe im Deponieabdichtungssystem unwirksam machen. Mit verschiedentlich genannten "mineralogischen Analogien" sind ggf. Aussagen zur Langzeitbeständigkeit mineralischer Substanzen (z.B. Quarzkorn) möglich, keinesfalls jedoch Aussagen zur Langzeitwirksamkeit von geotechnischen Strukturen aus entsprechenden Materialien wie Kiese, Sande, Tone oder deren Gemische mit oder ohne Zusatzmittel zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften.

Mit den zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten oder Nachweisführungen zur Langzeitwirksamkeit einer Komponente in einem Oberflächenabdichtungssystem einer

Deponie sowie dem aktuellen Stand der Werkstoff- und Ingenieurtechnik sind zeitlich unbegrenzte Nachweise seriös nicht zu erbringen. In Analogie zur LAGA-Aussage, dass von Menschenhand errichtete Bauwerke nicht dauerhaft Bestand haben können, ist auch eine unbegrenzte Langzeitwirksamkeit eines Bauproduktes nicht prognostizierbar bzw. nachweisbar. Alle Labor- oder Felduntersuchungen, auch die von der LAGA empfohlenen "zeitraffenden Reaktorsimulationen" für Geokunststoffe sind in ihrer Durchführbarkeit aus organisatorischen und methodischen Gründen oder auch aus Kostengründen zeitlich begrenzt, sodass die Versuchsergebnisse immer eine Angabe von Mindestfunktionsdauern ergeben werden.

Außerhalb der Geokunststoffe sind vergleichbare Prüfmethode gar nicht bekannt bzw. entwickelt oder als Stand der Technik zu bezeichnen. Die sich daraus ergebenden Fragen im Zusammenhang mit der Nachweisführung zur Langzeitwirksamkeit der Abdichtungssysteme sollen nachfolgend kurz diskutiert werden. Dazu werden als Vergleichsmaßstab für alternative Komponenten Geokunststoffe herangezogen, denn die Erfahrungen der letzten Jahre belegen, dass es keine anderen Systemkomponenten gibt, deren Eignungsfeststellung vergleichbar intensiv diskutiert, erforscht, überprüft und nachgewiesen worden ist. Für die erdbautechnisch hergestellte Tondichtung oder die grobkörnige Entwässerungsschicht wurde ohne konkrete Nachweise und ohne Zeitbezug eine praktisch unbegrenzte Wirksamkeit bisher angenommen und akzeptiert – wenig Wissen über die Langzeitwirksamkeit der genannten Schichten führte paradoxerweise zu höherer Akzeptanz als viel Wissen über konkrete Nachweise für Geokunststoffkomponenten.

3.2 Langzeitwirksamkeitsnachweise für Geokunststoffe

Aufgrund ihrer überlegenen Chemikalienbeständigkeit werden PEHD-Dichtungsbahnen seit ca. 35 Jahren bevorzugt im Deponiebau als Dichtungselement eingesetzt.

Durch das bereits Ende 1989 durch die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin, eingeführte Zulassungsverfahren für PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen gibt es bereits eine fast 20 Jahre erprobte Vorgehensweise zur Beurteilung der dauerhaften Funktionsweise von Geokunststoffen für die Anwendung im Deponiebau, die ausführlich in der Literatur beschrieben wird [14]. Für die Beurteilung des Gewerkes "flächenhafte Dichtung mit Kunststoffdichtungsbahn" sind drei separate Bausteine über die Zulassungsrichtlinie der BAM definiert [13]:

- Anforderungen an Werkstoffe, Halbzeuge und Endprodukt
- Zeitstandsversuche für die Abschätzung der Funktionsdauer > 100 Jahre
- Füge- und Einbautechnik mit Anforderungen auch an die Stützschiicht als Auflager und die aufliegende Schutzschicht.

Damit sind auch Oberflächenstrukturen rauer Kunststoffdichtungsbahnen und die Schweißnähte zum Fügen von Kunststoffdichtungsbahnen und als Anschlüsse an andere Bauteile (z.B. Rohrdurchführungen) als dauerhaft funktionsfähig einzustufen.

Bei der Anwendung einer BAM-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahn in einem Oberflächenabdichtungssystem ist ergänzend zu erwähnen, dass

- die überlagernden Schichten perfekten langfristigen Schutz vor UV-Strahlung bieten,
- die Kunststoffdichtungsbahn in weiten Grenzen aufgezwungenen Verformungen schadlos folgen kann,
- die Kunststoffdichtungsbahn unbeeinflusst bleibt von Frosteinwirkungen sowie von Schwankungen des Wassergehaltes oder der Wasserspannungen in überlagernden Schichten (Rekultivierungsschicht),
- die Kunststoffdichtungsbahn wurzelfest und nagetierbeständig ist,
- die Kunststoffdichtungsbahn dauerhaft gas- und wasserdicht bleibt.

Die Überprüfung in Oberflächenabdichtungen eingebauter BAM-zugelassener Kunststoffdichtungsbahnen durch elektrische Kontrollsysteme belegt, dass weniger als eine Schadstelle pro 50.000 m² gefunden wird, wobei etwa zu gleichen Teilen der Baubetrieb beim Aufbringen der mineralischen Schichten oder das Kunststoffdichtungsbahn-Schweißen fehlerursächlich sind. Damit sind jeweils mehr als 100.000 m² schweißtechnisch und einbautechnisch (Erdbaubetrieb) einwandfrei und ohne Schadstelle - ein beeindruckender Beleg für die hohe Qualität einer Dichtung mit PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen nach BAM-Zulassungskriterien. Es darf angenommen werden, dass unter diesen dokumentierten Randbedingungen das Abdichtungsziel, die unkontrollierte Freisetzung von Deponiegas und Schadstoffen sowie die Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper zu verhindern, dauerhaft bestmöglich erreicht wird, sodass die BAM-zugelassene Kunststoffdichtungsbahn heute als Maßstab für alle anderen Dichtungskomponenten dienen kann. Diese Aussage wird durch Untersuchungen und Aussagen in der internationalen Literatur nachhaltig gestützt.

Mit Hinweis auf die umfassende Literatur [17]) zur Untersuchung der Langzeitwirksamkeit von PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen kann auf der Basis vieler Untersuchungen an verschiedenen PEHD-Dichtungsbahnen die folgende Langzeitwirksamkeit abgedeckter, d.h. UV-geschützt eingebauter PEHD-Dichtungsbahnen in Abhängigkeit von der einwirkenden Temperatur auf der Basis von ARRHENIUS-Extrapolationen angegeben werden, die auf Angaben von Koerner & Hsuan [11] sowie Müller [17] zurückgehen (Tabelle 2):

| Temperatur (°C) | Langzeitwirksamkeit (Jahre) |
|--------------------|--------------------------------|
| 20 | 400 – 1000 |
| 25 | 250 – 600 |
| 30 | 150 – 400 |
| 35 | 100 – 250 |
| 40 | 60 – 180 |

Tabelle 2: Langzeitwirksamkeit von PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

In der angegebenen Zeitspanne werden auf der Basis aggressiver Laboreinlagerungsversuche bei 80°C zur Beschleunigung der Alterungsvorgänge bei gleichbleibender Temperatur die maßgebenden mechanischen Eigenschaften abgebaut. Gemäß Tabelle 2 werden bei konstanter Umgebungstemperatur für die Dichtungsbahn von z.B. 30°C in 150 bis 400 Jahren die mechanischen Eigenschaften soweit abgebaut, dass eine spröde Kunststoffplatte zurückbleibt, die ihre abdichtende Wirkung wohl aber immer noch erfüllt. Nach Vorgaben der BAM-Zulassung produzierte und eingebaute PEHD-Dichtungsbahnen bilden im Rahmen der vorliegenden Informationsvielfalt zum Langzeitverhalten von PEHD-Dichtungsbahnen die Obergrenze dieser Zeitspanne. Diese in der Literatur [17] mit "Lebensdauer" bezeichnete Zeitspanne ist daher die gesuchte Langzeitwirksamkeit mit immer noch vorhandener Dichtwirkung einer versprödeten HDPE-Platte, die auf einem lange aus der Nachsorge entlassenen, stabilen Deponiekörper aufliegt und dauerhaft ihre Dichtungsfunktion erfüllt.

Mit diesen Ableitungen wird klar, dass ein zur PEHD-Dichtungsbahn eingebautes Dichtungskontrollsystem, mit dem in der Einbauphase weniger als eine Schadstelle pro 50.000 m² entdeckt wird (BAM-Standard für Produktion und Einbau, Datenbasis ca. 12 DK-II-Deponien mit ca. 900.000 m² abgedichteter Fläche), erst nach vielen hundert Jahren am Ende der Langzeitwirksamkeit der KDB wieder aktiv werden müsste. In der Zwischenzeit gibt es nichts zu messen, da die PEHD-Dichtungsbahn unbeeinflusst durch Frost, Wasserspannungen,

Wurzeln und Nagetiere ihre Funktion als Dichtung erfüllt. Ein die Funktion der PEHD-Dichtungsbahn gefährdender Setzungs- oder Sackungsschaden, der eine Verformung der KDB von mehr als 6% verursachen müsste, ist direkt optisch am Deponiekörper zu erkennen und bedarf keines Kontrollsystems. Im Arbeitsentwurf der neuen integrierten Deponieverordnung genannte Messzeiträume eines Kontrollsystems von mindestens 20 Jahren machen im Hinblick auf die Langzeitwirksamkeit einer Kunststoffdichtungsbahn keinen Sinn. Auch ein Dichtungskontrollsystem muss dauerhaft einsetzbar sein, um die Sicherheit einer redundanten zweiten Dichtungskomponente auszugleichen!

Vor dem Hintergrund dieses Sachverhaltes ist der Einbau eines zweiten redundanten Dichtungselementes, das automatisch die wenigen, ggf. vorhandenen Schadstellen der Kunststoffdichtungsbahn ausgleicht, eine sinnvolle und auch kostenmäßig attraktive Alternative. Als Resümee für die PEHD-Kunststoffdichtungsbahn bleibt festzuhalten, dass eine nach BAM-Zulassungskriterien gefertigte und eingebaute PEHD-Kunststoffdichtungsbahn als Dichtungselement in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien dauerhaft die Dichtungsfunktion übernehmen wird und über mehrere hundert Jahre langzeitwirksam sein wird. Begleitend sind für Deponieböschungen die Standsicherheiten nach dem Stand der Technik und Beachtung der z.B. nach GDA E 3-8 "Reibungsverhalten von Geokunststoffen" ermittelten Reibungsbeiwerte zwischen Kunststoffdichtungsbahn und benachbarten Reibungspartnern zu ermitteln und mit ausreichenden Sicherheiten für Bau- und Betriebszustände nachzuweisen.

Über das Engagement bei PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen hinaus hat sich die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auch intensiv mit der Beurteilung der Funktionsdauern von anderen Geokunststoffprodukten befasst. Zulassungen, Eignungsnachweise und spezielle Untersuchungen zum Alterungsverhalten der Geokunststoffe dokumentieren, dass mit speziell ausgewählten Rohstoffen, Stabilisatoren oder Additiven Produkte hergestellt werden können, die ebenso wie die Kunststoffdichtungsbahn dauerhaft über mehrere hundert Jahre langzeitwirksam bleiben.

Bei ihren Prüfungen und Nachweisen für Geokunststoffe hat sich die BAM von den für die Kunststoffdichtungsbahn erprobten Versuchsprinzipien und Nachweisführung leiten lassen, um über identische Ansätze und Nachweistiefe vergleichbar belastbare Aussagen zur Langzeitbeständigkeit der Kunststoffkomponenten zu präsentieren.

Die über die Zulassungen für Schutzschichten definierten Fasern mit BAM-Beständigkeitsnachweis, gefertigt aus speziell ausgewähltem Polypropylen-Rohstoff, können und werden

auch in anderen Geokunststoffen, wie z.B. Filterschichten von Kunststoffdränmatten und Vliesstoffkomponente von geosynthetischen Tondichtungsbahnen eingesetzt, sodass es hier keines gesonderten Nachweises für diese Geokunststoffkomponenten mehr bedarf. Diese Fasern sollten auch für Filterschichten im Aufbau von Dichtungssystemen eingesetzt werden, die z.B. mit einer mineralischen Dränschicht kombiniert werden.

Für mit den entsprechenden Fasern gefertigte geosynthetische Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten) konnte die BAM nach Entwicklung und Durchführung entsprechender Zeitstandsversuche [15] im Jahre 2003 ein Gutachten über die Langzeit-Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix B 4000 mit folgender Kernaussage vorlegen (Zitat aus [1]):

"Proben aus der Bentonitmatte Bentofix B 4000 zeigen in den Zeitstand-Scherversuchen bei 80°C außerordentlich lange Laufzeiten, die Mindeststandzeit von 365 Tagen 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 weitergeführt. Ein Versagen wurde bisher nicht beobachtet und die Standzeiten aus den zeitraffenden Alterungs- und Scherversuchen der BAM können inzwischen für Bentofix B 4000 auf über 400 Jahre extrapoliert werden.

Einige Proben dieser Langzeitreihe wurden anschließend in den üblichen Kurzzeitscherversuchen nach DGGT-Empfehlung GDA E 3-8 im Hinblick auf die noch vorhandene innere Scherfestigkeit überprüft. Das Gutachten des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover [10] dokumentiert für die in den Versuchen der BAM künstlich über Jahrhunderte gealterten Proben weitere erhebliche Traglastreserven. Zusammengefasst ergibt sich, dass bei der Anwendung in Deponieoberflächenabdichtungen die innere Scherfestigkeit allein der Geokunststoffkomponenten der untersuchten Bentonitmatten 4000 ausreicht, um einen für Jahrhunderte (>> 100 Jahre) standsicheren Dichtungsaufbau sicherzustellen, ohne dass die zur Zeit möglichen Prüfmethode eine konkrete zeitliche Begrenzung der Funktionsdauer erlauben.

Die vorstehenden Aussagen belegen, dass die Geokunststoffkomponenten in Schutzlagen, Geokunststoffdränsystemen oder geosynthetischen Tondichtungsbahnen alle Voraussetzungen für eine dauerhafte Langzeitwirksamkeit erfüllen.

Während sich bei der PEHD-Kunststoffdichtungsbahn aus der Langzeitbeständigkeit des BAM-zulassungskonformen Gewerkes "Kunststoffdichtung" die Langzeitwirksamkeit des Dichtungselementes direkt ergibt, müssen die technischen Funktionen der Schutzlage, des Dränsystems und der GTD-Dichtung projektbezogen so bemessen und nachgewiesen werden, dass die technischen Funktionen Schützen, Filtern, Dränen und Dichten ebenso dauerhaft erfüllt werden. Hierfür stehen Bemessungsvorschläge nach dem Stand der Technik (z.B. GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.) zur Verfügung.

Die wie bei der in die Kritik gekommenen mineralischen Dichtungskomponenten des TASI-Regelabdichtungssystems auch bei Bentonitmatten gegebene Abhängigkeit der Dichtwirksamkeit vom Wassergehalt bedarf besonderer Aufmerksamkeit. In Großlysimetern und Testfeldern auf Abschnitten von Deponieoberflächenabdichtungssystemen konnten für einzelne Bentonitmatten langjährige (bis zu 7 Jahre) Systemwirksamkeiten nachgewiesen werden, die deutlich unterhalb der von der LAGA vorgeschlagenen 50 mm/Jahr liegen. Der hier zitierte Vorschlag der LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) einer maximalen Durchsickerung des Oberflächenabdichtungssystems geht zurück auf einen Beschluss zur Wirksamkeit von Wasserhaushaltsschichten als Ersatz der mineralischen Dichtungsschicht bei Deponien der Klasse I und II aus den Jahren 2004 [12]. Im ersten Arbeitsentwurf der integrierten Deponieverordnung wird ein deutlich reduzierter Wert von nur noch 10 mm/Jahr Durchsickerung vorgeschlagen. Zu Wasserhaushaltsschichten weiterentwickelte Rekultivierungsschichten mit konkreten Anforderungen an die Minimierung der Infiltration von Niederschlagswasser in den Deponiekörper stehen, wie bei den Kunststoffdichtungsbahnen bereits ausgeführt, mit sich entwickelnder Flora und Fauna ggf. in Wechselbeziehung zu allen Schichten eines Dichtungssystems oberhalb der Kunststoffdichtungsbahn, die als Wurzel- und Nagetiersperre die Ausbreitung und Einwirkung von Flora und Fauna dauerhaft sicher begrenzt.

3.3 Mineralische Komponenten eines Oberflächenabdichtungssystems

Oberflächennahe Bodenschichten werden bedingt durch Klima sowie Flora und Fauna in unserer Klimaregion bis zur Tiefe von ca. 2 bis 3 m durch wechselnde Wassergehalte, Wasserspannungen, Ausbreitung von Pflanzenwurzeln und Bodenauflockerungen durch Kleintiere sowie mit reduzierter Einwirktiefe durch Frost beeinflusst. Diese Dynamik wirkt auch in Deponieoberflächenabdichtungen und beeinflusst alle Komponenten eines Dichtungssystems, die einen veränderlichen Wassergehalt oder wasser-, luft- oder wurzel- und kleintiergängige Porensysteme aufweisen. Die erdbautechnisch eingebauten Kipp-

substrate unterscheiden sich wegen der Gefügezerstörungen gravierend von gewachsenen Böden und benötigen ggf. mehr als 10 Jahre, um mit gewachsenen Böden vergleichbare geohydraulische oder bodenphysikalische Eigenschaften zu entwickeln. Die einzige Komponente, die dauerhaft von der oberflächennahen Dynamik unbeeinflusst bleibt, ist die PEHD-Kunststoffdichtungsbahn.

Durch Untersuchungen mit Lysimetern, Testfeldern und Aufgrabungen von Dichtungssystemen wurde vielfach über die Gefährdung bzw. den Verlust der Dichtwirkung einer erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtung berichtet [5, 6, 7, 8], die das ursprüngliche Konzept der Regeldichtung, ausgeführt als Kombinationsdichtung, in Frage stellen, das auf der Annahme basierte, dass die KDB als Konvektionssperre durch eine zeitlich begrenzte Langzeitwirksamkeit gekennzeichnet ist und anschließend die 50 cm dicke Tondichtung die langfristige Dichtwirkung übernimmt. Dieser technische Lösungsansatz ist zu verwerfen, seitdem bekannt ist, dass die Tondichtung innerhalb weniger Jahre durch Austrocknung ihre Dichtwirkung verlieren kann und damit nur eine unwesentlich längere Langzeitwirksamkeit aufweisen kann als die sie bis dahin schützende Kunststoffdichtungsbahn.

Ein Abdichtungssystem, in dem die Kunststoffdichtungsbahn erforderlich ist, um das andere Dichtungselement zu schützen (z.B. als Wurzelsperre und Austrocknungssicherung für die tonmineralische Dichtungsschicht), kann nicht als Kombinationsdichtung bezeichnet werden, da in diesem Fall die beiden Dichtungskomponenten nicht unabhängig voneinander sowie einander in der Dichtwirkung ergänzend wirken [9].

Da das Regelsystem bisher eine "gesetzte Größe" war, liegen zur Langzeitwirksamkeit von Kombinationsdichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen keine gezielten Untersuchungen oder Nachweiskonzepte vor. Beim heutigen Informationsstand ist es schlüssig und notwendigerweise konsequent, auf eine Regeldichtung gemäß bisheriger Verwaltungsvorschriften in der neuen integrierten Deponieverordnung zu verzichten. Als zukünftiges Nachweiskonzept bleibt nur, wie z.B. auf der Deponie Sigmundskron/Bozen demonstriert [4], die begleitende, langjährige Testfeld/Lysimeter-Untersuchung von mineralischen Komponenten einer Kombinationsdichtung ohne die schützende Wirkung einer aufliegenden Kunststoffdichtungsbahn, um so über langjährige Beobachtungen Basisdaten für eine belastbare Aussage zur Langzeitwirksamkeit der mineralischen Dichtungskomponente zu erarbeiten. In Testfeldern der Deponie Sigmundskron/Bozen mit mittelplastischem Ton wurden sowohl mit als auch ohne schützende Kunststoffdichtungsbahn – allerdings bei vergleichsweise hohen Temperaturen des Abfallkörpers der Monodeponie – nach 5-jähriger Beobachtungszeit Austrocknungsschäden mit Rissbildung in der mittelplastischen Tonschicht, die ohne Kunststoff-

dichtungsbahn in den halbfesten Zustand mit durchgängigen bis 4,5 mm breiten Schrumpfrissen übergegangen war, festgestellt. Parallel über 7 Jahre beobachtete gemischtkörnige mineralische Dichtungen zeigten keine vergleichbaren Beeinträchtigungen. Extrapolationsmöglichkeiten entsprechender Ergebnisse für mineralische Systemkomponenten müssen für Langzeitwirksamkeitsaussagen allerdings noch entwickelt werden.

Parallel muss aber beachtet werden, dass alle mineralischen Dichtungsschichten äußerst empfindlich auf unterschiedliche Setzungen und Sackungen im Deponiekörper reagieren und dass setzungs-/sackungsbedingte Rissbildungen und Versagensszenarien im Lysimeter nicht abgebildet werden können. Hierzu ist eine gesonderte messtechnische Überwachung der Deponieoberfläche erforderlich.

Andere Alternativen wie die Kapillarsperre oder die Kombi-Kapillardichtung benötigen in entscheidenden Details den Einbau einer PEHD-Kunststoffdichtungsbahn, für die die notwendige Langzeitwirksamkeit nachgewiesen wurde. Da die Kombi-Kapillardichtung eine "getarnte" Kunststoffdichtungsbahn-Dichtung mit aufgebrachtener Sanddränschicht als Kapillarschicht ist, bleibt zu prüfen, ob die Dränleistung der Sandschicht den Bemessungsfall sicher beherrscht.

Im gesamten Schichtenaufbau mineralischer Systemkomponenten müssen Erdstoffverlagerungsprozesse (Erosion, Kontakterosion, Suffosion und Kolmation) vermieden oder beherrscht werden, was am besten mit gut abgestufter Korngrößenverteilung der Bodensubstrate gelingt.

Abschließend soll noch auf die Rekultivierungsschicht, die immer häufiger konzeptionell zur Wasserhaushaltsschicht aufgewertet wird, eingegangen werden. Ohne Zweifel kann die Rekultivierungsschicht / Wasserhaushaltsschicht einen erheblichen Beitrag zur Minimierung des Eintrags von Niederschlagswasser in den Deponiekörper leisten. Bei den heute üblichen Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht von > 1,0 m können bei den in Deutschland gegebenen klimatischen und wetterbedingten Randbedingungen die Dichtungselemente in Oberflächenabdichtungssystemen einer Deponie während der Vegetationszeit im Sommer "auf Urlaub geschickt" werden, da das gesamte Wasserdargebot in der Rekultivierungsschicht gespeichert und über Evapotranspiration wieder verdunstet wird und weder Dränwasser in der Entwässerungsschicht noch Sickerwasser der Dichtungsschicht anfällt. Eine Kontrolle dieser Eigenschaften und Aussagen über Langzeitwirksamkeiten lässt sich aber auch hier, wie bei den mineralischen Dichtungsschichten, nur über begleitende Testfelder und Großlysimeter erzielen. Im Zeitrahmen der Jahrzehnte bis zum Abschluss der Nach-

sorge der Deponie sollten sich aus dem gefügestörten Kippsubstrat "gewachsene" Bodenverhältnisse entwickelt haben, mit dem Risiko, dass die Entwicklung von Flora und Fauna auch andere mineralische Komponenten des Oberflächendichtungssystems beeinflusst.

Die Ausführungen zur Rekultivierungsschicht / Wasserhaushaltsschicht in dem Arbeitsentwurf der neuen integrierten Deponieverordnung lassen zudem befürchten, dass hier eine neue mineralische "Alleskönnerschicht" geschaffen wird, die mit theoretischen Ansätzen bemessen wird und mit zufällig (wenn überhaupt noch) verfügbarem Bodenmaterial mehr oder weniger kontrolliert auf den Deponiekörper aufgebracht wird. Echte Langzeiterfahrungen, die die geforderten Eigenschaften und Wirksamkeiten dauerhaft weit über 100 Jahre dokumentieren oder extrapolieren lassen, liegen nicht vor, sodass mit der Hinwendung zur Multifunktionsrekultivierungsschicht (mit langjährig begrenztem Durchfluss, Wurzel- und Frostschutz für darunterliegende Schichten sowie Wasserspeicher für die Vegetation und ausreichende Luftkapazität) ggf. in einigen Jahren ähnliche Langzeitwirksamkeitsprobleme zutage treten, wie sie in den letzten Jahren im Zusammenhang mit der mineralischen Dichtungsschicht diskutiert werden mussten. In diesem Zusammenhang wird dringend darauf hingewiesen, dass bisher Einwirkungen aus Bodenchemismus, Wasserhaushalt und Vegetation berücksichtigt wurden. Zur Wechselbeziehung Pflanzen/Boden, z.B. durch Nährstoffentnahme oder Mineralumwandlung, und auch zu den vielen Einwirkungen der Fauna, von Würmern und Insekten bis hin zu Wühltieren wie Maulwurf, Mäuse und dergleichen, die allesamt zu kaum vorhersagbaren Veränderungen der Rekultivierungsschicht mit Auflockerungen und Vergrößerung der Makroporenstruktur mit entsprechendem Einfluss auf die Durchlässigkeit führen können, bestehen noch Erkenntnisdefizite. Daher wird die langfristige definierte Funktion einer Rekultivierungsschicht eine laufende Unterhaltung und Pflege erforderlich machen. Gegenüber den Einwirkparametern auf die mineralische Dichtungsschicht in Oberflächenabdichtungssystemen kann ein Vielfaches an Parametern verändernd auf die Eigenschaften der Rekultivierungsschicht einwirken mit kaum überschaubaren Folgen für die Wirksamkeit der Rekultivierungsschicht.

Bei Verzicht auf Dichtungs- und Entwässerungsschichten ist zudem eine Überprüfung der geforderten Ansätze für die Wirksamkeiten der Rekultivierungsschicht nicht möglich, sodass zumindest auch hier Nachweise durch begleitende Lysimeter/Testfelder gefordert werden müssen, um letztlich auch die Forderung nach höherer Sicherheitsleistung für eine später evtl. doch erforderliche Oberflächendichtung zu begründen und prüffähig zu machen.

Weniger günstig ist die Wirksamkeit der Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht im Hinblick auf die Minimierung der Deponiegasemission, der Emission des mit zusätzlichen

Schadstoffen befrachteten Methangases (CH_4), zu werten. Allein auf der Basis der im Arbeitsentwurf der integrierten Deponieverordnung genannten und auf Dauer für tolerierbar gehaltenen Deponiegasfreisetzung während der Stilllegungsphase ($< 5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{h} \cdot \text{ha}$) ergäbe sich bei ca. 8.000 ha reaktiver und hypothetisch nicht gasdichter Hausmülldeponieoberfläche ein 14,5-Mio.-t- CO_2 -Äquivalent der Deponiegasemission pro Jahr. Dies entspricht etwa 8 % der von der Bundesregierung bis 2020 geplanten Reduzierung der Freisetzung von Treibhausgasen. Diese Freisetzung von Deponiegas kann und sollte mit einer qualifizierten Oberflächendichtung schon aus Gründen des Klimaschutzes verhindert werden – dies umso mehr als Methangas CH_4 einundzwanzig Mal schädigender wirkt als CO_2 .

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die verbindliche Vorgabe von Regelabdichtungssystemen in den Verwaltungsvorschriften TA Abfall und TA Siedlungsabfall hat sich über Jahre die paradoxe Situation entwickelt, dass für diese Regelsysteme eine dauerhafte Langzeitwirksamkeit unterstellt und angenommen wurde, während alternative Systeme über Zulassungen oder Eignungsnachweise ihre "Gleichwertigkeit" und dauerhafte Langzeitwirksamkeit aufwendig nachweisen mussten – wenig Wissen über die Langzeitwirksamkeit der mineralischen Regelkomponente führte zu höherer Akzeptanz als viel Wissen über konkrete Nachweise für Geokunststoffe. Mit den Erkenntnissen zum Versagenspotenzial der erdbautechnisch hergestellten Tondichtung des Regelsystems für Oberflächenabdichtungen und den vorhandenen Zulassungen und Eignungsnachweisen für alternative Komponenten ist es daher nur konsequent und uneingeschränkt zu begrüßen, im Arbeitsentwurf der neuen integrierten Deponieverordnung auf ein Regelsystem zu verzichten und nur zugelassene bzw. Systemkomponenten mit Eignungsnachweis zur Anwendung vorzusehen.

Eine seriöse Strategie für die Stilllegung von Altdeponien bedingt vorrangig, ein hochwertiges Abdichtungssystem nach dem Stand der Technik zu errichten, für das im Rahmen von Eignungsprüfungen der Nachweis zu erbringen ist, dass alle Komponenten unter den angegebenen Randbedingungen der Deponiestilllegung eine Langzeitwirksamkeit nachweislich besitzen, die im Sinne des abfallrechtlichen Vorsorgeprinzips deutlich über die im Baurecht (nach dem Gefahrenabwehrprinzip) üblicherweise angesetzten 100 Jahre reicht. Die geforderte Langzeitwirksamkeit muss einerseits den abfallrechtlichen Anforderungen des Vorsorgeprinzips genügen; andererseits muss der Stand der Werkstoff- und Ingenieurtechnik hinsichtlich praktikabler und reproduzierbarer Prüfmethode(n) gewahrt bleiben.

Im Sinne eines fairen technischen wirtschaftlichen Wettbewerbs muss gewährleistet sein, dass hinsichtlich aller zur Beurteilung anstehenden Systemkomponenten tatsächlich eine identische Nachweistiefe bei den Eignungsnachweisen zugrunde gelegt wird.

In die Dimensionierung von Oberflächenabdichtungssystemen können auch nur Zeithorizonte eingehen, über die auch die tatsächlich stattfindenden Einwirkungen (z.B. aus Klima und Wetter) anforderungsgerecht prognostiziert werden können. Unsichere, zu lange Prognosezeiträume mit dadurch erzielter scheinbarer Sicherheit führen zu extrem unwirtschaftlichen Bauweisen und verletzen das Gebot des sparsamen und effizienten Umgangs mit den Abgaben der Bürger.

Ein Zeitraum für die zu fordernde uneingeschränkte Langzeitwirksamkeit aller Abdichtungskomponenten von mindestens 200 Jahren wird als angemessen, praktikabel und ausreichend angesehen [19]. Vorausschauend darf angenommen werden, dass die technischen Möglichkeiten im Umweltschutz, aber auch die Anforderungen in 200 Jahren, also im Jahr 2207, ganz andere, heute noch nicht vorstellbare Optionen im Hinblick auf z.B. den kompletten Rückbau von obertägigen Siedlungsabfalldeponien (mit gleichzeitiger Energiegewinnung?) eröffnen könnten.

Die Chance, die der erste Arbeitsentwurf zur neuen integrierten Deponieverordnung bietet, langzeitwirksame, standortgerechte Oberflächendichtungssysteme für Deponien zu entwerfen und zu bauen, sollte im Sinne des Schutzes der Umwelt und des Wohls der Allgemeinheit uneingeschränkt genutzt werden. Allerdings sollte die Freisetzung von Deponiegas mit einer qualifizierten Oberflächendichtung schon aus Gründen des Klimaschutzes verhindert werden – dies umso mehr als Methangas CH_4 einundzwanzig Mal schädiger wirkt als CO_2 – und eine gasdichte Oberflächendichtung aufgebracht werden.

Literatur

- [1] Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung: Gutachten über die Langzeit-Scherfestigkeit der Bentonitmatte Bentofix B 4000, Dezember 2003 bzw. 2. aktualisierte Fassung vom Juni 2005, unveröffentlicht.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erster Arbeitsentwurf einer integrierten Deponieverordnung, Bonn, 5. Februar 2007.

- [3] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. In: GDA-Empfehlung Geotechnik der Deponien und Altlasten. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) (Hrsg.). Berlin: Ernst & Sohn 1995.
- [4] Gartung, E. und Schick, P.: Gemischtkörnige Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen. Tagungsunterlagen des Status-Workshops "Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme" am 30.11. und 1.12.2006 in Höxter, veranstaltet vom AK 6.1 (Geotechnik der Deponiebauwerke) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) und dem Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik, Fachbereich Technischer Umweltschutz, Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter.
- [5] Heerten, G. und Reuter, E.: Kritische Anmerkungen zur Genehmigungspraxis bei Deponieoberflächenabdichtungen. 2. Symposium Umweltgeotechnik – DGGT, IFGT & CiF e.V., CiF Publication 3/2005, Freiberg, September 2005, pp. 35-52.
- [6] Heerten, G. und Reuter, E.: Die mineralische Dichtungskomponente in Oberflächenabdichtungssystemen – Quo vadis? 22. SKZ-Fachtagung "Die sichere Deponie", Würzburg, Februar 2006.
- [7] Heerten, G. und Reuter, E.: Oberflächenabdichtungen von Deponien – Grenzen und Konsequenzen technischer Regelung. 13. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Darmstadt, März 2006.
- [8] Heerten, G. und Reuter, E.: Erfahrungen mit der mineralischen Komponente in Oberflächenabdichtungssystemen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 83: Geotechnische Aspekte im Umweltschutz 2006, Fachseminar, Braunschweig, März 2006.
- [9] Henken-Mellies, U.: Kombinationsabdichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen. Tagungsunterlagen des Status-Workshops "Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme" am 30.11. und 1.12.2006 in Höxter, veranstaltet vom AK 6.1 (Geotechnik der Deponiebauwerke) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) und dem Fachgebiet Abfallwirtschaft und Deponietechnik, Fachbereich Technischer Umweltschutz, Abteilung Höxter der Fachhochschule Lippe und Höxter.

- [10] Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover (IGBE): Versuche zur Bestimmung der "inneren Scherfestigkeit" geosynthetischer Tondichtungsbahnenproben mit der Bezeichnung "Bentofix B 4000 mit TL", die zuvor in besonderen Prüfgeräten einer mehrjährigen konstanten Schubbeanspruchung ausgesetzt waren, August 2006, unveröffentlichter Prüfbericht.
- [11] Koerner, R.M. and Hsuan Y.G.: Lifetime prediction of polymeric geomembranes used in new dam construction and dam rehabilitation. Proceedings Assoc. of State Dam Safety Officials Conference, Lake Harmony, Pennsylvania, 2003.
- [12] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Fachliche Eckpunkte für die Beurteilung von Ausnahmeanträgen nach §14 Absatz 6 Deponieverordnung. Beratungsergebnisse der LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnische Vollzugsfragen" vom 4.2.2004.
- [13] Müller, W.W. (Hrsg.): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Abdichtung von Deponien und Altlasten. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaften GmbH, Bremerhaven, 1999.
- [14] Müller, W.W.: Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik. Birkhäuser Verlag, Basel, 2001.
- [15] Müller, W.W.: Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten. 19. Fachtagung "Die sichere Deponie", Süddeutsches Kunststoffzentrum Würzburg, Eigenverlag 2003.
- [16] Müller, W.W. (Hrsg.): BAM-Richtlinie: Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten. Berlin: BAM (www.bam.de/deponietechnik.htm) 2003.
- [17] Müller, W.W.: HDPE Geomembranes in Geotechnics. Springer-Verlag, Heidelberg, 2007.
- [18] NLÖ/NLfB: Abfallwirtschaftsfakten Nr.6 "Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen", Eigenverlag, Hildesheim, 2000.
- [19] Reuter, E.: Überlegungen zum Eignungsnachweis von Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen für Altdeponien. Deponieworkshop Zittau-Liberec 2006, Langzeitverhalten von Deponieabdichtungen, Zittau, November 2006.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten,
Geschäftsführender Gesellschafter
NAUE GmbH & Co. KG
Gewerbestraße 2
32339 Espelkamp-Fiestel

Tel.: 05743 41-212
Fax: 05743 41-283
E-Mail: gheerten@naue.com