

Als Anlage ist eine Fassung mit Druckfehlern beigelegt



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

D-12200 Berlin
Telefon: 0 30/81 04-0
Telefax: 0 30/8 11 20 29

Dieses Dokument darf nur in
vollem Wortlaut und ohne
Zusätze veröffentlicht werden.
Für die veränderte Wiedergabe
und Auszüge ist vorher die
widerrufliche schriftliche
Einwilligung der BAM
einzuholen.

Gutachtliche Stellungnahme zu den Eigenschaften einer Oberflächenabdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen für Altdeponien

Aktenzeichen	IV.32/1304/03
Ausfertigung	1 von 4
Antragsteller/ Auftraggeber	Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V. (AK GWS) Friedrichstraße 95, 10117 Berlin
Antrag/Auftrag vom	2003-01-16
Eingegangen am	2003-01-20
Gegenstand der Stellungnahme	Eigenschaften einer Oberflächenabdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen für Altdeponien
Gliederung	<p>Zusammenfassung</p> <ol style="list-style-type: none">1. Veranlassung2. Oberflächenabdichtung mit PEHD-Dichtungsbahnen3. Einwirkungen auf eine Deponieoberflächenabdichtung und Eigenschaften der PEHD-Dichtungsbahnen<ol style="list-style-type: none">3.1 Chemische Einwirkungen3.2 Biologische Einwirkungen3.3 Temperatur und Witterung3.4 Wassergehaltsänderungen3.5 Mechanische Einwirkungen3.6 Hydraulische Einwirkungen4. Zum Nachweis der Dauerbeständigkeit5. Beständigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen gegen oxidativen Abbau6. Verformungsverhalten der PEHD-Dichtungsbahnen und Spannungsrissbeständigkeit7. Dichtigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen8. Einbau der PEHD-Dichtungsbahnen9. Exkurs: Bewässerung des Müllkörpers und Oberflächenab- dichtungen sollen dicht sein, ein Widerspruch? <p>Anlagen: A-1. Anmerkungen A-2. Literatur</p>

GUTACHTEN



Zusammenfassung

Eine Deponieoberflächenabdichtung aus dafür zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen ist wasserdicht, praktisch undurchlässig gegen Gase und besitzt eine extrem lange Funktionsdauer von weit über hundert Jahren. Die Kunststoffdichtungsbahnen müssen dazu mit hoher Qualität aus speziell ausgewählten Polyethylen-Formmassen gefertigt werden, ausreichend dick sein und nach dem Stand der Technik, insbesondere der Schweißtechnik, eingebaut werden. Die Langzeitbeständigkeit solcher Dichtungsbahnen, die umfangreich und sorgfältig untersucht wurde, ist zumindest gleichwertig zu der anderer in Oberflächenabdichtungen verwendeter Abdichtungsmaterialien, soweit deren Beständigkeit überhaupt zuverlässig und nicht nur vermutlich bekannt ist. In der Fähigkeit, den durch Setzungen aufgezwungenen Verformungen auch noch nach langer Zeit schadlos zu folgen, übertreffen die Dichtungsbahnen bei weitem die Asphaltbetondichtung und alle Arten von – auch polymervergüteten – mineralischen Dichtungen. Die Dichtungsbahnen sind wurzelfest und nagetierbeständig. Als UV-Schutz genügt eine einfache Erdabdeckung. Die Wasserspannung in der Rekultivierungsschicht und deren Schwankung im Verlauf der Jahreszeiten haben ebenso wenig wie Frost Einfluss auf die Eigenschaften der Dichtungsbahn. Eine Rekultivierungsschicht kann daher völlig unabhängig von einer solchen Dichtungsbahnabdichtung gestaltet werden.

Die sehr hohe Wirksamkeit einer Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen steht und fällt jedoch mit der Qualität des Einbaus. Nur erfahrene Verlegefachbetriebe, die mit qualifiziertem Personal und den erforderlichen Maschinen und Geräten ausreichend ausgestattet sind, beherrschen die Einbautechnik. Eine Abdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen kann nach den vorliegenden Erfahrungen fehlerfrei hergestellt werden, wenn folgende Punkte beachtet werden: Die Anforderung an die Stüttschicht werden eingehalten. Die Bauverfahrenstechnik des Einbaus von Drainage- und Rekultivierungsschichten wird sorgfältig nach den Erfordernissen einer Abdichtung aus Dichtungsbahnen ausgewählt. Es werden nur zugelassene PEHD-Dichtungsbahnen mit einer Dicke von mindestens 2,5 mm verwendet und die Bestimmungen und Anforderungen der Zulassungsrichtlinie und des Zulassungsscheins eingehalten. Das heißt genauer: Die Verlege- und Schweißarbeiten werden auf der Grundlage der jeweils gültigen Zulassungsanforderungen und der einschlägigen DVS-Richtlinien, insbesondere DVS-R 2225-4, von erfahrenen und qualifizierten Verlegefachbetrieben durchgeführt, die einer Güteüberwachung unterliegen. Sowohl die Herstellung der Dichtungsbahnen wie auch der Einbau werden im Rahmen von Qualitätsmanagementsystemen eigen- und fremdüberwacht, wobei die fremdprüfenden Stellen sowohl für die erforderlichen Inspektionsmaßnahmen (nach DIN EN 45004) wie auch für die dabei durchzuführenden Prüfungen (nach DIN EN ISO 17025) akkreditiert sein müssen.

Die Verlegung von Kunststoffdichtungsbahnen stellt so ein ganz eigenes Bauhandwerk dar, an das die Verfahrensweisen sowie Maschinen und Geräten des üblichen Erdbaus angepasst werden müssen. Für die Herstellung einer solchen Abdichtung sollte man daher überlegen, ob durch eine getrennte Vergabe des Dichtungsbahneinbaus der Einfluss der Verlegefachbetriebe auf das Baugeschehen verstärkt werden kann.

1. Veranlassung

Auf Initiative der Entsorgerverbände wurde vom Gesetzgeber eine sehr allgemeine Ausnahmeregelung für die Abdichtung von Altdeponien im § 14, Abs. 6 der Deponieverordnung verankert. Die TA Siedlungsabfall fordert eigentlich auch für Altdeponien der Klasse II eine Kombinationsdichtung als Regelabdichtungssystem oder eine dazu gleichwertige Abdichtung. Mit der Ausnahmeregelung kann die zuständige Behörde jetzt im Einzelfall auch andere „alternative“ Abdichtungen zulassen, sofern das Wohl der Allgemeinheit, gemessen an den Zielen der Verordnungen und Verwaltungsvorschriften, nicht beeinträchtigt wird¹. Auslöser für die Ausnahmeregelung waren vor allem Befürchtungen über zu hohe Kosten, welche die Verwaltungsvorschriften angeblich verursachen würden².

Daneben gibt es jedoch auch fachliche Gründe. Der Zustand einer Altdeponie kann so weit außerhalb der Rahmenbedingungen der technischen Anleitung liegen, dass eine Sicherung durch eine Kombinationsdichtung manchmal nicht recht passen will. Ein Beispiel soll dies illustrieren. Eine großflächige alte Hügeldeponie steht ohne funktionstüchtige Basisabdichtung auf einer schlechten geologischen Barriere. Die oberflächennahen Grundwasserleiter werden bereits verunreinigt. Daher wurde die Deponie schon während des laufenden Betriebs mit einer Dichtwand-Umschließung und durch hydraulische Maßnahmen gesichert. Es erschien wenig plausibel auf dieser aktiv gesicherten Deponie eine Kombinationsdichtung mit den dafür erforderlichen gewaltigen Erdstoffmassen zu errichten. Stattdessen wurde eine einfache Abdichtung aus Dichtungsbahnen gewählt, die allein schon den Eintrag von Niederschlagswasser vollständig unterbinden kann. Um die nach der TA Siedlungsabfall erforderliche Redundanz und Fehlertoleranz der Abdichtung zu erreichen, wurde mit der Dichtungsbahn ein Dichtungskontrollsystem eingebaut, mit dem über längere Zeit deren Dichtigkeit überwacht werden kann. Diese Kontrolle fügt sich zwanglos in die ohnehin bereits laufenden langfristig angelegten aktiven Sicherungsmaßnahmen ein. Die Deponie ist damit stabil und kontrollierbar gesichert. Da die Abdichtung tatsächlich dicht ist, kann insbesondere der Wasserhaushalt der Rekultivierungsschicht genau beobachtet werden. Auf der Grundlage der Beobachtungsergebnisse soll über einen eventuellen Ausbau dieser Schicht entschieden werden. Es besteht also eine Option, dass langfristig ein weiteres Sicherungselement hinzugefügt werden kann. Andere spezielle Beispiele ließen sich anführen. Allein schon die Dicke des Regelabdichtungssystems, die wegen der Gasdränage, der mineralischen Dichtungskomponente, der Flächenentwässerung aus Kies und der Rekultivierungsschicht mindestens 2 m beträgt, kann an manchen Standorten zu erheblichen sowohl genehmigungstechnischen wie bautechnischen Problemen führen.

Ausgehend von solchen technischen Überlegungen wurde die Frage aufgeworfen, ob es tatsächlich notwendig ist, die Altdeponien nach dem Vorsorgegebot zu sichern, oder ob nicht vielmehr auch bei diesen Deponien nur das Prinzip der Gefahrenabwehr gelten sollte³. Die etwa 250 Altdeponien, die bis Mitte 2005 geschlossen werden müssen, wären dann zu betrachten wie Tausende von ohnehin schon vorhandenen Altablagerungen. Eine solche Betrachtungsweise hätte Auswirkungen auf die Gestaltung der Abdichtung. Aus dem Vorsorgegebot resultiert nämlich das Multibarrierenkonzept (das bei vielen Altdeponien ohnehin nicht zu verwirklichen ist, da

mindestens die Barriere Abfallvorbehandlung fehlt) und die Forderung nach einem mehrkomponentigen Abdichtungssystem, bei dem jeweils die eine Komponente denkbare Fehler in der jeweils anderen Komponente auszugleichen vermag. In der Altlastensicherung ist eine solch große Redundanz in der Abdichtung dagegen nicht üblich, da die Gefährdungslage regelmäßig überprüft wird.

Diese ökonomischen, technischen und juristischen Überlegungen könnten im Zusammenhang mit der Ausnahmeregelung dazu führen, dass man Altdeponien einfacher und standortangepasster abdichtet, als dies mit dem Regelabdichtungssystem möglich wäre, indem man nur noch ein Abdichtungselement verwendet. Im Altlastenbereich, aber auch im Deponiebereich, sind inzwischen eine große Zahl von Oberflächenabdichtungen und temporären Abdeckungen nur aus Kunststoffdichtungsbahnen gebaut worden. Die BAM hatte diese Entwicklung unterstützt und ihr Rechnung getragen: Die 1999 neu herausgegebene Zulassungsrichtlinie für Kunststoffdichtungsbahnen gilt nicht mehr nur für Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung, sondern auch für Abdichtungen nur aus Kunststoffdichtungsbahnen⁴. In den LAGA-Arbeitspapieren zur Gestaltung von Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen wird empfohlen, dass Oberflächenabdichtungen von Deponien der Klasse I und von sonstigen Deponien mit geringem Gefährdungspotential (z. B. Bodenaushub- und Bauschuttdeponien) mit einer (BAM-zugelassenen) PEHD-Dichtungsbahn als Alternative zur mineralischen Dichtung abgedichtet werden können⁵. Dennoch wird die Kunststoffdichtungsbahn oft nur im Zusammenhang mit anderen Dichtungskomponenten gesehen. Traditionell gilt sie als Bestandteil einer wie auch immer gearteten Kombinationsdichtung.

Vor diesem Hintergrund wurde die BAM vom AK GWS beauftragt, gutachtlich die Eigenschaften und die Eignung einer Deponieoberflächenabdichtung aus BAM-zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen, wie sie im folgenden Abschnitt beschrieben wird, im Vergleich mit anderen einlagigen Abdichtungen zu beurteilen. Eine solche gutachtliche Stellungnahme kann nur einen Überblick geben, der viele Einzelergebnisse zusammenfasst. Es wurde jedoch versucht, an möglichst vielen Stellen Quellen anzugeben, in denen ein genannter Sachverhalt genauer beschrieben und ein nur grob dargelegter Gedankengang ausführlicher entwickelt wird, oder wo der Beweis einer gemachten Aussage gefunden und überprüft werden kann. Als Informationsquelle über PEHD-Dichtungsbahnen sei hier zuallererst auf das Handbuch [1] verwiesen. Eine inzwischen sehr wertvolle Quelle zu allen Fragen der Oberflächenabdichtung bilden die Tagungsberichte des Karlsruher Deponie- und Altlastenseminars. Die von Egloffstein, Burkhardt und Czurda im Auftrag des AK GWS und der Überwachungsgemeinschaft „Bauen für den Umweltschutz“ herausgegebenen Bücher sind in der Reihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis beim Erich Schmidt Verlag erhältlich. Über den Einsatz von Kunststoffen in der Deponietechnik wird in den Tagungsberichten der vom AK GWS mitveranstalteten Fachtagung „Die sichere Deponie“ umfassend informiert. Diese Bände können beim Süddeutschen Kunststoffzentrum in Würzburg bestellt werden⁶.

Das Gutachten ist folgendermaßen aufgebaut. Nach der Beschreibung der zu betrachtenden Abdichtungssysteme wird im Zusammenhang mit einer Darstellung der Einwirkungen auf Oberflä-

chenabdichtungen ein Überblick über die Eigenschaften der PEHD-Dichtungsbahnen im Vergleich auch mit anderen Abdichtungen gegeben. Nach einigen allgemeinen Anmerkungen zum Nachweis der Dauerbeständigkeit wird dann genauer auf die Beständigkeit, das Verformungsverhalten und die Dichtigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen eingegangen. Schließlich wird der Einbau der Dichtungsbahnen diskutiert, der letztlich über die Wirksamkeit der Dichtung entscheidet. Eine der Stärken der Dichtungsbahn nämlich wirklich dicht zu sein, wird ihr in jüngster Zeit kurioserweise als Nachteil ausgelegt. Auf diesen Streitpunkt wird in einem abschließenden Exkurs eingegangen.

Das Gutachten bezieht sich ausschließlich auf von der BAM derzeit zugelassene Kunststoffdichtungsbahnen, die nach den im Regelwerk der Zulassung verankerten Anforderungen hergestellt und eingebaut werden. Nicht nur bei den verschiedenen oben genannten Abdichtungsmaterialien, sondern auch bei den auf dem Markt erhältlichen PEHD-Dichtungsbahn-Produkten ist eine enorme Bandbreite der Materialeigenschaften möglich. Die Wirksamkeit der eingebauten Abdichtung hängt wesentlich von der Qualität des Einbaus ab. Es müssen daher genaue Anforderungen an die Produkte und deren Einbau formuliert und im Rahmen eines Zulassungsverfahrens überprüft werden. Nur dann können Deponieabdichtungen mit der erforderlichen großen Wirksamkeit hergestellt werden.

2. Oberflächenabdichtung mit PEHD-Dichtungsbahnen

Eine Deponieoberflächenabdichtung mit der Kunststoffdichtungsbahn als eigentlichem Abdichtungselement besteht darüber hinaus aus der Stützschiicht, auf der die Dichtungsbahn verlegt wird, aus einer eventuell erforderlichen Schutzschicht über der Dichtungsbahn sowie aus der Drainage- und der Rekultivierungsschicht. Zusammen mit der Kunststoffdichtungsbahn kann ein Dichtungskontrollsystem eingebaut werden, mit dem Löcher in der Dichtungsbahn erkannt und geortet werden können. Die Kombination Dichtungsbahn-Dichtungskontrollsystem ist das Herzstück eines sogenannten „aktiven“ Sicherungskonzepts. Dieses Konzept soll eine Alternative zu dem „passiven“ Sicherungskonzept der technischen Anleitungen bieten, die Regelabdichtungssysteme aus mehreren Komponenten mit hoher Fehlertoleranz und Redundanz fordern [2]. Die Anforderungen an Dichtungskontrollsysteme sowie Anwendungsfälle werden in [3] beschrieben. Im Folgenden geht es jedoch vor allem um die Wirksamkeit einer Abdichtung nur aus Kunststoffdichtungsbahnen.

Die Stützschiicht kann so gestaltet werden, dass sie zugleich die Funktion einer Ausgleichsschiicht oder einer Gasdränageschiicht übernimmt. Als Auflager für die Kunststoffdichtungsbahn muss ihre Oberflächenbeschaffenheit jedoch bestimmten Anforderungen erfüllen, die in der Zulassungsrichtlinie für Dichtungsbahnen beschrieben werden [4].

Bei großer Auflast und grober Körnung der Flächenentwässerung muss auf der Kunststoffdichtungsbahn eine Schutzschicht verlegt werden. Welche Arten von Schutzschichten dabei verwendet werden können und wie deren Notwendigkeit und Eignung geprüft wird, kann der Zu-

lassungsrichtlinie für Schutzschichten, in sinngemäßer Anwendung auf Oberflächenabdichtungen, entnommen werden [5], [6]. Beim Einsatz von Kunststoff-Dränmatten entfällt die Schutzschicht, da neben der Filterschicht und dem Dränkörper eine diesen nach unten abschließende Schutzschicht zumeist Bestandteil der Matten ist, oder der Dränkörper selbst als Schutzschicht wirken kann. Auf den Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränmatten in Deponieabdichtungen wird an anderer Stelle eingegangen [7], [8].

PEHD-Dichtungsbahnen sind wurzelfest, frostsicher (Glastemperatur: -120 °C) und völlig unempfindlich gegen Austrocknung. Für den UV-Schutz genügt eine einfache Erdbdeckung. Im Gegensatz zu fast allen anderen Abdichtungen ergeben sich daher bei Kunststoffdichtungsbahnen keine zusätzlichen, aus den Eigenschaften der Abdichtung resultierenden Anforderungen an Dicke und Beschaffenheit der Rekultivierungsschicht. Dies ist einer der besonderen Vorteile der Abdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen. Im Abschnitt 4 wird darauf kurz eingegangen.

3. Einwirkungen auf eine Deponieoberflächenabdichtung und Eigenschaften der PEHD-Dichtungsbahnen

Mitte der 90er Jahre hatte das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) seine Tätigkeit auf das Gebiet der Deponieabdichtungen ausgeweitet und einen Ausschuss eingerichtet, der „Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen“ erarbeitet hat [9]. Das DIBt hat seine Tätigkeit zwar nach wenigen Jahren aus formalen Gründen wieder eingestellt, der Text wird seither jedoch immer wieder als Grundlage für Eignungsnachweise herangezogen. Dort werden auch die Einwirkungen auf Deponieoberflächenabdichtungen beschrieben. Bei Oberflächenabdichtungen müssen danach die chemischen Einwirkungen aus infiltriertem Niederschlagswasser, die biologischen Einwirkungen, die Temperaturen, die Witterung, die mechanischen Einwirkungen und schließlich die hydraulischen Einwirkungen betrachtet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich mehrere Einwirkungen überlagern und dabei gegenseitig verstärken können.

3.1 Chemische Einwirkungen

Zu den Beanspruchungen und Auswirkungen heißt es in den Grundsätzen [9]: „Grundsätzlich kann es durch die chemische Einwirkung von infiltriertem Niederschlagswasser zu Strukturveränderungen, Gefügebildungen und Spannungen in den beaufschlagten oder durchsickerten Schichten der Oberflächendichtung kommen. Erhöhte Temperaturen und hydraulische Einwirkungen können diese Vorgänge fördern.“ Gedacht wurde dabei z. B. an den Ionenaustausch bei Bentonitmatten, an Ausfällungen im Porenraum einer Kapillarschicht, an die Bildung extrem saurer oder basischer Milieubedingungen, die z. B. Abbaureaktionen in polymervergüteten mineralischen Dichtungen drastisch beschleunigen können. Ebenso kann es bei aus Reststoffen aufgebauten Dichtungen in vielfältiger Weise zu Reaktionen mit den im Bodenwasser gelösten Stoffen kommen.

PEHD-Dichtungsbahnen besitzen aufgrund der einfachen und äußerst stabilen chemischen Grundstruktur des Werkstoffs aus gesättigten Kohlenwasserstoffketten eine sehr hohe chemische Beständigkeit, so dass die chemischen Wechselwirkungen mit dem Niederschlagswasser keine Rolle spielen [1], [10]. Sauerstoff, der in der Oberflächenabdichtung sicherlich immer vorhanden ist, kann jedoch in der Wechselwirkung mit chemischen Radikalen in polyolefinen Werkstoffen eine Reaktionskette in Gang setzen, die nach einiger Zeit auch die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs verändert. Radikale können unter Anwendungsbedingungen allerdings nur in sehr geringem Umfang entstehen. Welche Rolle dieser sogenannte oxidative Abbau bei den PEHD-Dichtungsbahnen spielt, wird im Abschnitt 5 genauer betrachtet.

3.2 Biologische Einwirkungen

Die biologischen Einwirkungen werden untergliedert in Einwirkungen durch Mikroorganismen und Pilze, durch Pflanzen und durch Nagetiere. Mikroorganismen und Pilze können beim Abbau der Polymere in polymervergüteten mineralischen Dichtungen eine große Rolle spielen, da solche Polymere oft funktionelle Seitengruppen besitzen, die von Mikroorganismen gut verwertet werden können. Die Bewertung der mikrobiellen Beständigkeit ist daher eines der Schlüsselprobleme beim Eignungsnachweis z. B. von polymervergüteten Sand-Bentonitmischen, da deren gute Dichtungseigenschaften im Wesentlichen durch den polymeren Zusatz bedingt sind. Gesättigte Kohlenwasserstoffe, aus denen der PEHD-Werkstoff besteht, können dagegen nur sehr schlecht von Mikroorganismen oder Pilzen, und, wenn überhaupt, nur bei sehr geringer Molekülmasse verwertet werden. PEHD-Dichtungsbahnen sind daher ohne Einschränkung beständig gegen Mikroorganismen und Pilze [11], [1].

Pflanzenwurzeln stellen bei Oberflächenabdichtungen ein großes Problem dar [12], [13]. Einerseits kann über Art und Umfang des Bewuchses über die sehr langen Zeiträume, die hier zu betrachten sind, keine sichere Aussage gemacht werden. Die Besiedlung der Rekultivierungsflächen durch Pflanzengesellschaften und die Ausbildung einer stabilen Schlussgesellschaft kann viele Jahrzehnte dauern [14], [15]. Andererseits bilden fast alle Arten von mineralischen Dichtungen in Trockenzeiten ein Feuchtigkeitsreservoir. Selbst beim Beginn der Trockenrissbildung ist die Feuchtigkeit in der Dichtung oft noch höher als in der Umgebung [16]. Unter solchen Bedingungen werden Pflanzenwurzeln den Weg in die Dichtung finden. Wenn es gilt, ein Feuchtigkeitsreservoir zu erschließen, können u. U. sogar Asphaltabdichtungen durchwurzelt werden [17]. Trockenrissbildung in Dichtungen unter einer Rekultivierungsschicht mit Bewuchs ist daher in der Regel von Durchwurzlung begleitet. Die Austrocknung und Rissbildung wird dadurch verschärft. Weiterhin können entlang abgestorbener Wurzeln ergiebige Fließwege entstehen. Wurzeln müssen daher entweder durch eine aufwendige Gestaltung der Rekultivierungsschicht [13], [18] oder eben durch eine PEHD-Dichtungsbahn „abgefangen“ werden. PEHD-Dichtungsbahnen sind wurzelfest, was in vielfältigen Untersuchungen belegt wurde [1]. Sowohl der biophysikalische Effekt des mechanischen Quelldrucks der wachsenden Zellverbände der Wurzel, wie auch der biochemische Effekt der Anlösung der Materialien durch Aussonderungen aus der Wurzel finden keine Angriffspunkte.

Leider gibt es keine veröffentlichten Informationen, welche Rolle die Wühltätigkeit von Nagetieren als Einwirkung auf Oberflächenabdichtungen tatsächlich spielt. Nur im Wasserbau wird darüber berichtet. Da man das Problem bei allen Arten von mineralischen Dichtungen ohnehin nicht grundsätzlich lösen könnte, wird es in der Regel bei Eignungsnachweisen ausgeblendet. PEHD-Dichtungsbahnen bilden dagegen ein sehr wirksames Hindernis für Nagetiere [19]. In einzelnen Fällen wurde jedoch beobachtet, dass am Rand selbst eine 2,5 mm dicke PEHD-Dichtungsbahn von einem großen Nagetier angenagt wurde.

3.3 Temperaturen und Witterung

Die Spannweite der Temperaturen, die in Oberflächenabdichtungen auftreten, ist relativ gering. Gefährlich werden kann dabei aber Frost. Alle anderen unmittelbaren Witterungseinwirkungen spielen nur während des Einbaus eine Rolle. Bei porösen Materialien, die Wasser enthalten, kann es bei Frost zur Bildung von Eislinsen kommen, die lokal das Gefüge der Materialien zerstören und damit deren Wasserdurchlässigkeit erhöhen können. Zusätzlich kommt es je nach Ausmaß der Eisbildung zu weitreichenden Verformungen (Frosthebungen) und dadurch zu Rissen. Solche Materialien (also praktisch alle im Deponiebau verwendeten Dichtungsmaterialien außer den PEHD-Dichtungsbahnen) müssen durch eine ausreichend dicke Rekultivierungsschicht vor Frost geschützt werden [20], [21], [22]. PEHD-Dichtungsbahnen sind dagegen unempfindlich gegen Frost: der sogenannte Glasübergang findet erst bei -120 °C statt. Zu den Zulassungsprüfungen gehört eine Prüfung „Biegen in der Kälte“. Die -20 °C kalte Dichtungsbahn wird dabei längs und quer zur Extrusionsrichtung zusammengefaltet [4]. Diese Prüfung wird von PEHD-Dichtungsbahnen regelmäßig bestanden.

PEHD-Dichtungsbahnen müssen vor der UV-Strahlung geschützt werden. Dies geschieht üblicherweise durch Beimischung von feinem Ruß, der die UV-Quanten absorbiert. So geschützte PEHD-Dichtungsbahnen können viele Jahre der Witterung ausgesetzt sein, ohne dass sich merkliche Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften ergeben [1]. Um aber die anvisierten extrem langen Funktionsdauern zu erreichen, müssen die PEHD-Dichtungsbahnen jedoch im Zuge des Baufortschritts abgedeckt werden.

3.4 Wassergehaltsänderungen

Mineralische Dichtungsmaterialien müssen oft mit hohem Wassergehalt eingebaut und intensiv homogenisiert und verdichtet werden, um die erforderliche geringe Wasserdurchlässigkeit der Abdichtungsschicht zu erreichen [23]. Es entsteht dann jedoch eine Aggregatstruktur, die sehr instabil ist, da eine kleine Wassergehaltsänderung schon zu einer großen Änderung in der Wasserspannung führt. Bei geringem Wasserverlust schrumpft das Material und bildet Risse [24], [16]. Die Wasserdurchlässigkeit nimmt dann drastisch zu [12], [25]. Eine hohe Auflast stabilisiert die Aggregatstruktur und wirkt der Rissbildung entgegen [26]. In einer Oberflächenabdichtung ist die Auflast jedoch zu gering. In Rekultivierungsschichten können bei Trockenperioden hohe Wasserspannungen entstehen. Pflanzenwurzeln können der Dichtungsschicht Wasser entziehen. Auch bei Oberflächenabdichtungen wird über der Dichtung eine Flächenentwässerung eingebaut, die vor allem hydraulische Belastungen reduzieren und eine Beeinträchtigung der Standsicherheit der Rekultivierungsschicht durch Wasseraufstau auf der Dichtung verhindern

soll. Über die Flächenentwässerungsschicht ist jedoch, zumindest in Teilbereichen, eine Belüftung möglich, die enorme Auswirkungen auf das Austrocknen von mineralischen Dichtungen und Rekultivierungsschicht haben kann [27]. Die herkömmlichen tonmineralischen Dichtungen gelten daher inzwischen als wenig geeignet für die Oberflächenabdichtung [27]. Das Problem, dass eine Aggregatstruktur, die eine geringe Wasserdurchlässigkeit garantiert, sich unter Feldbedingungen als wenig stabil erweisen kann, muss jedoch bei allen Arten von mineralischen Dichtungen beachtet werden.

Bei PEHD-Dichtungsbahnen treten all diese Probleme nicht auf.

3.5 Mechanische Einwirkungen

Die Oberfläche der Altdeponien hat oft eine sehr uneinheitliche Tragfähigkeit. Lokale Setzungen führen zu Stauchungen, Dehnungen und zu Biegebeanspruchungen in der Abdichtung. Bei den dicken Abdichtungen, wie den mineralischen Dichtungen oder der Asphaltbetondichtung mit Trag- und Dichtungsschichten, können die Biegungen durch eine lokale Setzung schon bei einer geringen Setzungstiefe so groß sein, dass die jeweiligen Verformungsgrenzwerte weit überschritten werden [28], [23], [29], [30]. Es treten jedoch nicht nur lokale Setzungen auf. Der Müllkörper sackt insgesamt zusammen. In einer darüber liegenden starren Abdichtungsschale, wie sie etwa eine Asphaltbetondichtung darstellt, muss es dadurch unweigerlich auch zu starken Scherbeanspruchungen kommen.

Es ist zumeist sehr unklar, was die diversen Prozentsätze über zulässige Verformungen bedeuten, die für die verschiedenen Abdichtungen genannt werden, da oft weder der zugehörige Spannungszustand noch die Verformungsgeschwindigkeit angegeben werden. Um die Verformbarkeit von Abdichtungen sinnvoll zu vergleichen, müssten vielmehr z. B. die Krümmungsradien von noch zulässigen Setzungsverläufen angegeben werden. Für einen echten Vergleich müssten auch die Auswirkungen von Alterungsvorgängen auf das Verformungsverhalten der Materialien berücksichtigt werden. Außer bei den PEHD-Dichtungsbahnen werden bei keinem anderen Abdichtungsmaterial Langzeiteffekte in der Festlegung der Verformungsgrenze berücksichtigt.

Bei den PEHD-Dichtungsbahnen vermag der Werkstoff die aus der Verformung resultierenden Spannungen durch Veränderung der Anordnung der Polymerketten in gewissem Umfang abzubauen [1]. Es bleibt jedoch trotz dieser sogenannten Spannungsrelaxation eine Restspannung, die über lange Zeiträume zur Bildung von Mikrorissen im Gefüge aus amorphen und kristallinen Bereichen führen kann. Übersteigt die Verformung einen bestimmten Grenzwert können sich die Mikrorisse zu makroskopischen Rissen ausweiten. Man spricht von sogenannter Spannungsrissbildung [31], [32], [33]. Es werden daher nur PEHD-Werkstoffe zugelassen, die besonders unempfindlich gegen dieses Phänomen [4] sind. Zusätzlich wurde - sehr konservativ - die noch zulässige lokale Dehnung einer Randfaser auf 3 % bei 40 °C und 6 % bei 23 °C festgelegt, um Spannungsrissbildung von vornherein auszuschließen [4], [34]. Auch mit diesen langfristig zulässigen Dehnungsgrenzwerten übertrifft die Dichtungsbahn immer noch bei weitem alle anderen Abdichtungsmaterialien (siehe dazu Abschnitt 6). Nur für die Bentonitmatten

wird eine noch größere Dehnung angegeben. Wobei es sich allerdings zunächst nur um einen Kurzzeitwert handelt, der auch bei der Dichtungsbahn wiederum größer ist.

Zum Themenkomplex der mechanischen Einwirkungen gehört auch die innere Langzeit-Scherfestigkeit von Abdichtungsmaterialien und die Reibung in den Grenzflächen, die für die dauerhafte Standsicherheit des ganzen Oberflächenabdichtungsaufbaus wesentlich ist. Durch in die Grundbahn eingeprägte Strukturen oder aber nachträglich aufgebraachte Strukturpartikel kann die Oberfläche der Dichtungsbahn so rau gestaltet werden, dass ausreichende Reibungskräfte zu anderen Lagen der Dichtung mobilisiert werden. In der Zulassung wird genau darauf geachtet, dass die Strukturierung zu keiner wesentlichen Veränderung in der Spannungsrissbeständigkeit führt. Die Frage nach der Langzeit-Scherfestigkeit stellt sich vor allem bei sandwichartig aufgebauten Geokunststoffen aus mehreren Komponenten wie z. B. den nachträglich strukturierten Dichtungsbahnen oder den Bentonitmatten [8]. Das Verhalten der nachträglich strukturierten Dichtungsbahnen wurde intensiv untersucht [35]. Bei Bentonitmatten liegen bislang Untersuchungsergebnisse für die Produkte eines Herstellers vor [8].

3.6 Hydraulische Einwirkungen

Die Höhe des hydrostatischen Aufstaus beeinflusst bei allen konvektiven Transportvorgängen die Durchtrittszeit und die Durchflussrate von Schadstoffen durch die Dichtung. Bei einer Kapillarsperre muss ein Aufstau gänzlich vermieden werden, da es bei einer Wassersättigung der Kapillarschicht zum Durchbruch des Wassers in den Kapillarblock kommt [36]. Hydrodynamische Einwirkungen können äußere Erosions- und Suffosionsvorgänge an der Dichtung auslösen. Dieser Aspekt darf z. B. bei polymervergüteten Sand-Bentonitgemischen (wie z. B. dem sogenannten Trisoplast) nicht gänzlich außer acht gelassen werden. Das dort verwendete Polymer ist empfindlich gegen mechanische Beanspruchungen. Bei starken hydrodynamischen Einwirkungen in der Grenzfläche zu einer z. B. groben Kiesdränage kann es das Sand-Bentonitgemisch nicht vor einer Kontakterosion schützen. Dort, wo man eine Erosion des reinen Sand-Bentonitgemischs erwarten würde, muss daher auch bei Verwendung des polymervergüteten Gemischs ein Filter eingebaut werden.

Hydraulische Einwirkungen können dagegen einer PEHD-Dichtungsbahn nichts anhaben.

Selbst diese nur skizzenhafte Betrachtung der Einwirkungen auf eine Oberflächenabdichtung und der Eigenschaften, die PEHD-Dichtungsbahnen dabei im Vergleich mit anderen Abdichtungsmaterialien zeigen, belegt, dass diese Dichtungsbahnen in besonderer Weise für Oberflächenabdichtungen geeignet sind. Im Folgenden wird die Dauerbeständigkeit der PEHD-Dichtungsbahn, also die Beständigkeit gegen oxidativen Abbau und die Spannungsrissbeständigkeit im Zusammenhang mit dem Verformungsverhalten ausführlicher betrachtet.

4. Zum Nachweis der Dauerbeständigkeit

Ein Abdichtungsmaterial kommt für eine Deponieoberflächenabdichtung nur dann in Betracht, wenn es unter den oben beschriebenen Einwirkungen eine für Baustoffe außergewöhnlich lange Zeit hält. Üblicherweise wird für Bauwerke „nur“ eine maximale Funktionsdauer von 100 Jahren angesetzt und alle Bauteile, die gar nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem wirtschaftlichen Aufwand repariert werden können, müssen ebenso lange funktionstüchtig bleiben. Bauteile, die dagegen, wenn auch mit einem gewissen Aufwand, repariert werden können, brauchen nur 25 Jahre zu halten. Abdichtungssysteme von Deponien und ihre Komponenten sollen dagegen dauerhaft wirksam sein. Im Grundsatzausschuss des DIBt wurde folgende Definition von Dauerbeständigkeit gegeben⁷ [9]: „Unter Dauerbeständigkeit wird hier ein Verhalten verstanden, bei dem der Erhalt der maßgeblichen dichtenden und mechanischen Eigenschaften des betrachteten Dichtungselements nach dem Stand der Technik über Zeiträume, die mehrere hundert Jahre umfassen, angenommen werden kann.“ Es ist offensichtlich, dass der Nachweis eines solchen Verhaltens sehr schwierig ist und über die im Bauwesen üblichen Prüfverfahren hinausgehen muss. Wie weit dabei in die Zukunft geschaut werden muss, wird deutlich, wenn man den Blick über ähnliche Zeitspannen zurück in die Vergangenheit richtet. Dass die Schwierigkeiten unterschätzt werden, sieht man an den vielen Umbrüchen in der Fachdiskussion. Hier drei Beispiele:

Bei den anfänglichen Diskussionen über Bentonitmatten wurde selbst von namhaften Experten die Auffassung vertreten, dass der Ionenaustausch sich nur äußerst langsam vollziehen wird. Erst durch Erfahrungen in Feldversuchen ist klar geworden, dass binnen weniger Jahre die Natrium-Ionen durch Kalzium-Ionen ersetzt werden und die Durchlässigkeit einer Bentonitmatte im Feld nur im Zusammenhang mit den Einwirkungen beschrieben werden kann [25], [37].

Die mit hohem Wassergehalt eingebaute, feinkörnige und bindige mineralische Dichtung galt lange als die entscheidende, weil über geologische Zeiträume beständige Abdichtungskomponente. Begründet wurde das mit dem Hinweis, dass homogene und dichte Tonformationen in der Natur über solche geologische Zeiträume Bestand haben. Dabei wurde nicht beachtet, dass der Bestand der Formationen ganz spezifischen Bedingungen geschuldet ist, unter denen sie nur überdauern können. Ändern sich diese Bedingungen, so können auch Tonformationen durch vielfältige Umwandlungsprozesse rasch zerstört werden. Erst die Erfahrung mit mineralischen Oberflächenabdichtungen hat ins Bewusstsein gerückt, dass die Oberfläche einer Deponie kein idealer Standort für eine Tonformation ist. Inzwischen gibt es viele Experten, die wie selbstverständlich betonen, dass man eine mineralische Oberflächenabdichtung so wie in den technischen Anleitungen beschrieben natürlich nicht bauen sollte [27].

Asphaltbetone mit einer nach Art und Umfang speziell gewählten Zusammensetzung aus Mineralstoffen und Bindemittel können im Laborversuch praktisch völlig undurchlässig sein. Die im Feld tatsächlich erreichten Systemdurchlässigkeiten von Asphaltbetondichtungen liegen jedoch um Größenordnungen über Laborwerten [17].

Die Liste der Wirren und Wendungen in der Fachdiskussion lässt sich fortsetzen. Die drei Beispiele zeigen jedoch, dass zuverlässige Aussagen über eine Dauerbeständigkeit nur unter zwei Voraussetzungen möglich sind. Zum einen muss der Werkstoff in seiner Eigenart und seinem Verhalten sehr genau bekannt und untersucht worden sein. Zum anderen müssen aber auch möglichst lange und sehr gründlich ausgewertete Erfahrungen in der Anwendung von Bauteilen aus dem Werkstoff und insbesondere in der Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf Anwendungsbedingungen, vorhanden sein. Streng genommen ist eine so weitreichende Prognose „dauerbeständig“ nur möglich, wenn jahrzehntelange Erfahrungen vorliegen⁸. Ausgrabungen nach 5 oder 10 Jahren, bei denen keine wesentlichen Veränderungen festgestellt werden, reichen dabei sicherlich nicht aus. Z. B. können allein schon die Prozesse der Bodenentwicklung und Pflanzensukzession sehr langwierig sein, so dass viel Zeit vergeht bis sich ein stabiler Einwirkungs-zustand einstellt. Der muss sich aber eingestellt haben, wenn man aus ausgegrabenen Proben Schlussfolgerungen über Durchwurzelung oder Austrocknung ziehen will.

Der Umfang der Werkstoffkenntnisse und Erfahrungen bei PEHD-Dichtungsbahnen ist größer als bei fast allen anderen Abdichtungselementen⁹ [1]. Nur bei der Asphaltbetondichtung verfügt man über einen vergleichbaren Kenntnisstand. Polyethylen ist wegen seiner einfachen Struktur eine Modellschubstanz, an der das Verhalten und die Eigenschaften thermoplastischer Werkstoffe exemplarisch studiert werden kann. Es gibt daher unzählige wissenschaftliche Grundlagenuntersuchungen zur Oxidation, zur oxidativen Beständigkeit bei Verarbeitung und Anwendung, zur Spannungsrisbildung, zur Diffusion und Löslichkeit von Stoffen usw.. PEHD-Rohre werden seit vielen Jahrzehnten in der chemischen Verfahrenstechnik und in der Gasversorgungstechnik eingesetzt. Der Einsatz erfolgt dabei oft unter kritischen Bedingungen (aggressive Medien und Innendruck). Schadensfälle können gravierende Auswirkungen auf Leben und Gut haben. Schon seit den 50er Jahren waren daher bei vielen Rohrformmassen- und Rohrherstellern, bei Prüf- und Forschungsinstituten und bei den Versorgungsunternehmen anwendungstechnische Abteilungen aufgebaut worden, die sich mit dem Langzeitverhalten der Rohre befassen und Prüftechniken zu dessen Charakterisierung entwickelt hatten. Die Erfahrungen sind auch hier in unzähligen Aufsätzen, Prüfberichten und Tagungsbeiträgen dokumentiert¹⁰.

PEHD-Dichtungsbahnen werden seit dem Beginn der 70er Jahre in der Geotechnik eingesetzt. Die dabei verwendeten Formmassen stammten aus dem Rohrbereich. Von Koch und Mitarbeitern wurden daher die Erkenntnisse und Erfahrungen aus diesem Bereich verwendet, um zu Langzeitaussagen auch über PEHD-Dichtungsbahnen zu kommen [38]. Mit ihrer weltweiten Verbreitung wurden die Dichtungsbahnen selbst immer stärker Gegenstand von Langzeituntersuchungen zur Oxidation und Spannungsrisbildung [39], [40],[41]. Die - was die Vielzahl der unterschiedlichen Formmassen und die Dauer angeht - umfangreichsten Untersuchungen an PEHD-Dichtungsbahnen wurden seit Mitte der 80er Jahre an der BAM durchgeführt. Im Mittelpunkt standen dabei der oxidative Abbau und die Permeation von Schadstoffen [42], [43], [44], [45].

Im Gegensatz zur PEHD-Dichtungsbahn hängt das Langzeitverhalten der meisten Dichtungsmaterialien stark von der langzeitigen Entwicklung der Einwirkungen ab. Die Diskussion im Abschnitt 3 hat dafür viele Beispiele geliefert: Das Eindringen von Wurzeln, die Bildung von Eislinen und die Austrocknung kann in porösen Dichtungsmaterialien zu irreversiblen Gefügeänderungen und damit zur Vergrößerung der Durchlässigkeit führen. Diese Materialien müssen daher vor Durchwurzelung, Frost und starken Schwankungen in der Wasserspannung geschützt werden. Dazu gehören die herkömmlichen mineralischen Dichtungen, die mit Polymeren oder sonstigen Zuschlagstoffen vergüteten mineralischen Dichtungen, die Bentonitmatten und alle Arten von Dichtungen aus mineralischen Reststoffen. Aber auch bei einer Kapillarschicht muss eine zu hohe Dränspende, eine Durchwurzelung oder die Bildung von Ausfällungen, die den Porenraum und die Wasserleitfähigkeit reduzieren, verhindert werden. Unter sehr ungünstigen Bedingungen können sogar Asphaltbetondichtungen durchwurzelt oder durch Frost beschädigt werden. Die Rekultivierungsschicht und die Flächenentwässerung muss daher bei diesen Abdichtungen so dimensioniert werden, dass die genannten Einwirkungen sicher verhindert werden. Besteht jedoch nur die Möglichkeit dieser Einwirkungen, dann kann man über Zeiträume, die nach Jahrhunderten zählen, kaum wirklich zuverlässige Angaben über einen sich in so ferner Zukunft einstellenden Zustand der Abdichtung mehr machen, sondern nur noch Vermutung und Plausibilitätsbetrachtungen anstellen. Ein Nachweis des Langzeitverhaltens solcher Abdichtungen ist also im Vergleich zu den PEHD-Dichtungsbahnen doppelt schwierig, da zugleich auch eine Beschreibung des Langzeitverhaltens der Rekultivierungsschicht und der Auswirkungen der Flächenentwässerungsschicht erarbeitet werden müsste.

Inzwischen hat man versucht aus der Not eine Tugend zu machen, indem man die Rekultivierungsschicht als sogenannte Wasserhaushaltsschicht zum eigentlich wesentlichen Bestandteil der Oberflächenabdichtung erklärt. Die Rekultivierungsschicht und ihr Bewuchs soll dabei so ausgelegt werden, dass die Wasserhaushaltsbilanz aus Niederschlag, Oberflächenabfluss, Verdunstung und Speichervermögen schon in dieser Schicht weitgehend ausgeglichen ist. Erreichbar ist dieses Ziel unter den klimatischen Verhältnissen in Deutschland vielfach nur, wenn ein Wald mit geschlossenem Kronendach als Schlussgesellschaft entstanden ist. Der Aufwand für die Herstellung solcher Schichten ist daher enorm und die Wirksamkeit an vielen Standorten zumindest während vieler Jahrzehnte nur gering¹¹ [18], [46].

5. Beständigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen gegen oxidativen Abbau

Die PEHD-Formmassen der zugelassenen Dichtungsbahnen bestehen aus sehr langen, linearen Polyethylenketten, von denen in unregelmäßigen Abständen aliphatische Seitenketten aus nur wenigen Kohlenstoffatomen abgehen. Ein Teil der Kettensegmente fügt sich eng zu Kristallen zusammen, die in einen Bereich nur amorpher Verteilung der Segmente eingebettet sind. Knapp über 50 % des Materials ist kristallin [1]. Mit dieser molekularen Struktur und Morphologie ist Polyethylen hoher Dichte einer der gegen Chemikalien beständigsten Kunststoffe überhaupt [10]. Über sehr lange Zeiträume kann jedoch ein oxidativer Abbau zu einer nachteiligen Materialveränderung führen [47]. Voraussetzung für die Oxidation ist einmal natürlich die

Anwesenheit von Sauerstoffmolekülen, zum anderen aber, dass sich Kohlenstoffatome finden, bei denen eines der Elektronen noch nicht in eine chemische Bindung eingebunden ist. Moleküle mit einem solchen noch ungepaarten Elektron nennt man Radikale. Ein Radikal entsteht im Polyethylen bei normalen Temperaturen nur äußerst selten. Die Bindungsenergie der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen oder der Kohlenstoff-Wasserstoffbindung ist so hoch, dass die Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Radikalen durch thermische Fluktuationen extrem gering ist. Die Wechselwirkung mit Sauerstoff oder mit Verunreinigung im Polyethylen (z. B. Katalysatorreste oder reaktionsfreudige Moleküle, die bei der Verarbeitung bei hohen Temperaturen entstanden sind) kann jedoch zum Entstehen von Radikalen beitragen. Aber auch bei Berücksichtigung solcher Quellen für Radikale bleibt deren Auftreten sehr selten. Nur UV-Strahlung erzeugt in starkem Maße Radikale und löst dadurch die sogenannte Photooxidation aus. PEHD-Dichtungsbahnen müssen daher vor UV-Strahlung geschützt werden [48]. Dafür wird feiner Ruß beigemischt, der die UV-Strahlung absorbiert.

Die wesentliche Aussage zur Langzeitbeständigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen kann man sich anhand des folgenden, sehr stark vereinfachten Bildes des oxidativen Abbaus klar machen. Bei der Reaktion eines Radikals mit einem Sauerstoffmolekül kann sich eine Hydroperoxydgruppe bilden. Ganz allmählich können sich so im amorphen Bereich des Materials diese Gruppen ansammeln. Erst wenn nach einer extrem langen Zeit, der sogenannten Induktionszeit, eine genügende Anzahl solcher Gruppen vorhanden sind, kann eine sich selbst beschleunigende autokatalytische Oxidationsreaktion in Gang kommen, in deren Verlauf dann auch Polymerketten brechen und die mechanische Festigkeit des Materials sich merklich verändert [49]. Um die schädliche Wirkung von Radikalen zu verhindern, werden dem Polyethylen sogenannte Antioxidantien oder Stabilisatoren beigemischt [50]. Das sind Substanzen, die chemische Radikale einfangen und „neutralisieren“ können. Solange also Antioxidantien im Material wirksam sind, kann eine Oxidationsreaktion nicht in Gang kommen. Die relativ großen Stabilisatormoleküle besitzen nur eine relative geringe Beweglichkeit im Polyethylen. Sie sind jedoch nicht im Lösungsgleichgewicht, sondern diffundieren langsam an die Oberfläche, gehen dort verloren, oder werden im Polyethylen selbst durch die Reaktion mit den Radikalen ganz allmählich verbraucht. Es vergeht jedoch wiederum eine extrem lange Zeit, die sogenannte Antioxidantien-Verlust-Zeit (Antioxidant depletion time), bis deren Konzentration unter eine kritische Schwelle sinkt. Die wesentliche Aussage zur oxidativen Beständigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen besteht nun darin, dass unter den Bedingungen in einer Oberflächenabdichtung die Antioxidantien-Verlust-Zeit und die Induktionszeit von geeignet ausgesuchten, gut stabilisierten PEHD-Werkstoffen so extrem groß sind, dass Jahrhunderte vergehen müssen, bis die Eigenschaften des Materials sich durch Oxidation merklich verändern werden. Dieser Sachverhalt ist inzwischen durch vielfältige Untersuchungen auch an Dichtungsbahnen belegt [38], [40], [42].

6. Verformungsverhalten der PEHD-Dichtungsbahnen und Spannungsrisssbeständigkeit

Die Klärung des Verformungsverhaltens einer Abdichtung ist Voraussetzung für den Einsatz in einer Oberflächenabdichtung, da dort auch nach dem Einbau erhebliche lokale Setzungen auftreten können, die der Abdichtung Verformungen mit relativ kleinen Krümmungsradien und großen Längungen aufzwingen. Die Verformungen rufen einen im Wesentlichen ebenen (biaxialen) Spannungszustand hervor. Wird dabei die Bruchfestigkeit eines Abdichtungsmaterials überschritten, entstehen irreversibel Risse. Welche Verformungen bei diesem Spannungszustand noch zulässig sind, hängt sehr stark von der Temperatur, der Verformungsgeschwindigkeit und der Spannungsverteilung im jeweiligen Material ab. Auch wenn die Bruchfestigkeit nicht erreicht wird, können die Spannungen allmähliche Materialveränderungen hervorrufen, die schließlich doch in eine makroskopische Rissbildung münden.

Wirken auf ein Bauteil aus einem teilkristallinen Thermoplasten dauerhaft Spannungen ein und wird dabei eine bestimmte werkstoffabhängige Verformungsgrenze überschritten, so bilden sich im amorphen Bereich Mikrorisse, die schließlich zu makroskopisch großen Rissen zusammenwachsen können. Nach einer ganz einfachen Modellvorstellung rührt die Bildung der Mikrorisse vom Entschlaufen der unter Spannung stehenden Polymerketten her [31]. Man spricht von sogenannter Spannungsrisssbildung¹². Beim Einsatz von Rohren aus solchen Werkstoffen, die dabei in der Regel unter einem Innendruck stehen – man denke etwa an Gasrohre – ist diese Spannungsrisssbildung der kritische Versagensmechanismus, der die Funktionsdauer begrenzt. Ähnlich wie der oxidative Abbau ist daher die Spannungsrisssbildung bei teilkristallinen Thermoplasten schon seit langem Gegenstand gründlicher wissenschaftlicher und technischer Untersuchungen. Ein Überblick wird in [1] gegeben. Es stehen ausgefeilte Prüfmethode für die Auswahl spannungsrisssbeständiger Werkstoffe und zur Charakterisierung der Beständigkeit von Rohren aus diesen Werkstoffen zur Verfügung.

Auch bei den PEHD-Dichtungsbahnen muss das Phänomen der Spannungsrisssbildung bei Werkstoffauswahl und Dimensionierung beachtet werden. Die Struktur der Ketten und die Morphologie des Werkstoffs bestimmt im Wesentlichen dessen Spannungsrisssbeständigkeit. Beim linearen Polyethylen führen möglichst lange Polymerhauptketten mit einer Vielzahl kleiner Seitenketten, die sich im amorphen Bereich vielfach verschlaufen und dabei verhaken können, dementsprechend zu einer sehr hohen Spannungsrisssbeständigkeit. Heutzutage werden für PEHD-Dichtungsbahnen nur noch solche linearen α -Olefin-Copolymere des Polyethylens verwendet. Eine wichtige Prüfung bei der Zulassung ist der sogenannte NCTL-Test, mit dem direkt an der Dichtungsbahn deren Spannungsrisssverhalten geprüft und ein in dieser Hinsicht geeignetes Produkt ausgewählt werden kann [51].

Bei der Zulassung verlässt man sich jedoch nicht allein auf die Werkstoffauswahl, sondern schließt Spannungsrisssbildung als relevanten Versagensmechanismus auch durch folgende Anforderungen aus:

PEHD-Dichtungsbahnen dürfen grundsätzlich nicht so eingebaut werden, dass ihnen dauerhaft eine äußere Zugspannung aufgezwungen wird¹³. Das wäre z. B. der Fall, wenn eine Dichtungsbahn zugleich als in der Böschungskrone verankertes Bewehrungselement verwendet würde.

2. Bei den aufgezwungenen Verformungen darf eine bestimmte Dehnungsgrenze nicht überschritten werden.

Eine Grenzdehnung kann mit verschiedenen Methoden abgeleitet werden, je nach dem theoretischen Modell, mit dem das Phänomen der Spannungsrisssbildung beschrieben wird. Alle Methoden führen jedoch in etwa zum gleichen Grenzwert [1]. Von Koch und Mitarbeitern wurde vorgeschlagen, die Grenzdehnung durch den Vergleich des langzeitigen Spannungsrisssverhalten, wie es sich im Zeitstand-Rohrinnendruckversuch zeigt, mit dem langzeitigen Spannungsrelaxationsverhalten, das in Relaxationsversuchen ermittelt werden kann, festzulegen. Dieser Vorschlag wurde in den Zulassungsrichtlinien der BAM aufgegriffen [4]. Eine aktuelle Beschreibung und Diskussion des Vorgehens findet sich in [34]. Danach beträgt die langfristig zulässige lokale Dehnungsgrenze der PEHD-Dichtungsbahnen bei einer mehrachsigen Verformung (ebener Spannungszustand) 3 % bei 40 °C und 6 % bei 23 °C. Die Dehnung, bei der in einem Wölbversuch eine PEHD-Dichtungsbahn verstreckt, ist dagegen erheblich größer, nämlich 15 - 20 % Wölbogendehnung [1].

Im Zusammenhang mit der Dimensionierung von Schutzschichten, bei der diese Dehnungsgrenze zur Festlegung der noch zulässigen Größe von Eindellungen durch grobe Kieskörner dient, wurde immer wieder kritisiert, dass der mit diesem Verfahren festgelegte Grenzwert äußerst konservativ ist und dass die Einschränkung bei der Auswahl von Schutzschichten daher zu groß ist. In der Tat führt diese Dehnungsgrenze sehr weit auf die sichere Seite, da sie die Auswirkungen einer Restspannung, die aus der Spannungsrelaxation bei aufgezwungener Dehnung noch übrig bleibt, mit den Auswirkungen einer gleich großen dauerhaft wirksamen äußeren Zugspannung gleichsetzt. Man muss jedoch immer bedenken, dass die Schweißnähte die eigentlichen Schwachstellen für die Spannungsrisssbildung sind, da dort aufgrund der Geometrie der Nähte durch Verformungen lokale Spannungskonzentrationen sich im Bereich von Kerben bilden können, an denen naturgemäß Risse leicht entstehen. Die konservative Festlegung der Verformungsgrenze schafft hier den erforderlichen Sicherheitsspielraum.

Wie für viele Abdichtungseigenschaften, die hier diskutiert wurden, gilt auch für das Verformungsverhalten, dass es nur bei der PEHD-Dichtungsbahn technisch nachvollziehbar begründete Grenzwerte gibt, während bei anderen Abdichtungsmaterialien die Bedeutung und der Geltungsbereich genannter Grenzen oft unklar ist. Man verlässt sich letztlich fast immer auf eine ausreichende Tragfähigkeit des nach gängiger bautechnischer Praxis vorbereiteten und überprüften Auflagers der Dichtung. In der Zulassung des DIBt für Deponieabdichtungen aus Asphaltbeton wird eine zulässige Dehnungsgrenze von 0,75 % für die Dichtungsschicht und von 1,5 % für die Tragschicht genannt [52]. Zur Ableitung dieser Grenzwerte finden sich jedoch keine näheren Angaben. Es ist auch unklar, ob die Grenzen auch für den bei Setzungen typischen ebenen Spannungszustand gelten. Für mineralische Dichtungen wird abhängig von der

Zusammensetzung des Erdstoffs in Laborversuchen eine weite Spanne von zulässigen Dehnungen gefunden [28]. Bentonitmatten können in Laborversuchen sehr stark verformt werden (10 % - 15 %), ohne dass die Durchlässigkeit sich merklich verändert [77]. Es handelt sich dabei um einen Kurzzeitwert und es stellt sich die Frage, wie sich eine derart hohe Dehnung langfristig z. B. auf die innere Scherfestigkeit und das Erosionsverhalten auswirken würde. Ein mit geringem Wassergehalt eingebautes polymervergütetes Sand-Bentonitgemisch wie Trisoplast hat aufgrund der zunächst krümeligen Struktur und des zähen Zusammenhalts durch den polymeren Zuschlag im Einbauzustand ebenfalls ein sehr gutes Verformungsverhalten. Das langfristige Verformungsverhalten hängt jedoch von der Vorgeschichte aus Austrocknungs- und Wiederbefeuchtungsvorgängen ab, so dass im Labor bei Wölbversuchen erzielte Werte nur mit großer Vorsicht verwendet werden dürfen. Die zulässigen Verformungen von polymervergüteten Sand-Bentonitgemischen werden daher im Bereich sehr verformungsfreudiger mineralischer Abdichtungen anzusiedeln sein, (da sie aber fünf mal dünner sind, ist auch der zulässige Krümmungsradius fünf mal so klein). Bei Kapillarsperren gilt die Grundregel, dass keine Setzungsmulden entstehen dürfen, in denen Wasser anstehen kann (jedenfalls nicht über die für ein Durchbruchereignis erforderliche geringe Druckhöhe hinaus). Kapillarsperren sind daher relativ setzungsempfindlich. Tabelle 1 stellt die in verschiedenen Quellen gefundenen Dehnungsgrenzwerte ϵ_{max} zusammen.

Tabelle Zulässige Verformungen bei Abdichtungsmaterialien

Dichtungselement	ϵ_{max} (%)	Anmerkung
Mineralische Dichtung	0,1 - 3	stark abhängig vom verwendeten Material [28]
Asphalttragschicht	1,75	Grenzwert für uniaxialen Zug, ohne Berücksichtigung von Alterung [52]
Asphaltdichtungsschicht	0,85	Grenzwert für uniaxialen Zug, ohne Berücksichtigung von Alterung [52]
PEHD-Dichtungsbahn	6	langzeitig zulässige Verformung bei 25 °C
Bentonitmatte	~ 10 - 15	Zulässiger Kurzzeitwert, ohne Berücksichtigung von Langzeiteffekten [77]

Die mit der Konturlinie $y(x)$ einer Setzung an der Stelle x verbundene Verformung $\epsilon(x)$ eines Elements der Abdichtung kann durch folgende Gleichung näherungsweise beschrieben werden [28], [1]:

$$\epsilon(x) = \left(\frac{y'(x)}{\sin(\arctan(y'(x)))} \right) + \frac{d}{2} y''(x)$$

d ist die Dicke der Abdichtung. Der erste Term gibt die Längung des Elements und der zweite die Dehnung seiner äußersten Randfaser bei einer Biegung. Dabei wird angenommen, dass bei der Biegung die neutrale Faser in der Mitte der Dichtung liegt¹⁴. Da dies in der Regel nicht der Fall ist, werden mit dieser Formel die Biegebeanspruchungen bis etwa um den Faktor 2 unterschätzt. Es sind nur Setzungsverläufe zulässig für die entlang der ganzen Konturlinie gilt:

$$\epsilon(x) \leq \epsilon_{max}$$

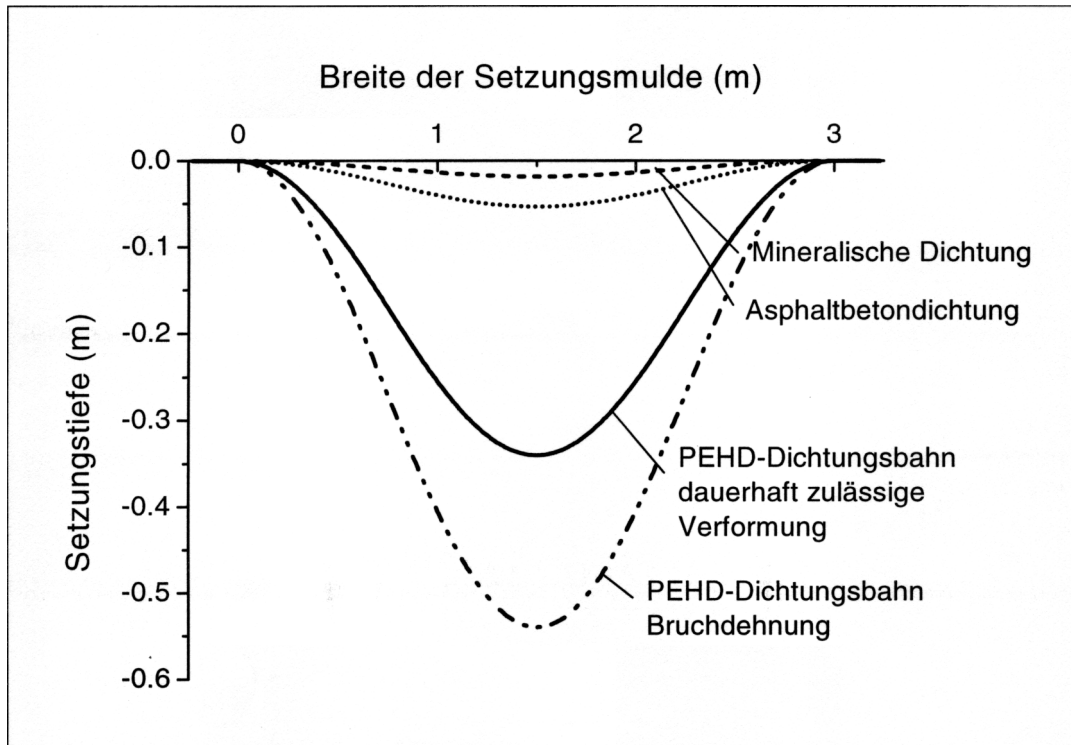


Abb.1: Noch zulässige Konturlinien, wenn bei der Randfaserdehnung und Längung die Dehnungsgrenzwerte der Tabelle 1 nicht überschritten werden sollen. Für die mineralische Dichtung wurde ein Dehnungsgrenzwert von 1 % angenommen.

Die Zahlenwerte und Formeln vermitteln noch keinen anschaulichen Eindruck über das Verformungsverhalten. Dazu müssten die noch zulässigen Krümmungsradien sowie Setzungstiefen und damit die zugehörigen Setzungsverläufe dargestellt werden. Soviel ist immerhin sofort klar: Bei der dünnen Dichtungsbahn spielen Biegungen keine Rolle. Der zulässige Krümmungsradius liegt bei 0,03 m. Bei den Asphaltbetondichtungen und insbesondere bei der mineralischen Dichtung sind die noch zulässigen Krümmungsradien dagegen selbst in sehr günstigen Fällen groß ($\gg 5$ m bzw. $\gg 25$ m) und schon geringe Setzungen führen zu großen Biegebeanspruchungen. Mit dem folgenden sehr einfachen Beispiel einer Setzungslinie soll eine Vorstellung von der Größenordnung der Unterschiede im Verformungsverhalten gegeben werden. Es wird eine kreisförmige Setzungsmulde mit einem Durchmesser von 3 m angenommen. Die Konturlinie der Setzung soll dabei idealer Weise einer Cosinus-Kurve¹⁵ folgen. Die Dehnungen durch die Längung und durch die Biegung des Abdichtungselements sind dann ganz einfach zu berechnen. Abbildung 1 zeigt die zulässigen Setzungstiefen, wenn die Dehnungsgrenzen der Tabelle 1 sowohl für die Längung als auch für die Randfaserdehnung bei der Biegung angesetzt werden. Trotz der bestehenden Unsicherheit bei den Angaben zu den zulässigen Dehnungen der anderen Abdichtungen, illustriert Abbildung 1, dass die PEHD-Dichtungsbahnen alle anderen Abdichtungen (außer Bentonitmatten) in ihrer Verformungsfreudigkeit weit übertreffen.

7. Dichtigkeit der PEHD-Dichtungsbahnen

Aus Kunststoffdichtungsbahnen kann eine völlig wasserdichte Abdichtung hergestellt werden. Dies gilt auch, wenn man das Problem der Anschlüsse an eine bereits vorhandene Abdichtung oder an Durchdringungen wie Gasbrunnen und Schächte berücksichtigt, die gerade bei Altdeponien zahlreich vorkommen können. Bei allen Arten von Bauwerksabdichtungen stellt immer die Gestaltung der Fugen zu bereits vorhandenen Dichtungen oder zu Bauteilen, die die Abdichtung durchdringen, eine schwierige Aufgabe dar, von deren Lösung letztlich die Systemdurchlässigkeit der Abdichtung abhängt. Bei Asphaltbetondichtungen liegen z. B. die im Asphaltwasserbau tatsächlich erreichten Systemdurchlässigkeiten um Größenordnungen über den Laborwerten der Durchlässigkeit der eigentlichen Abdichtungsschicht [17]. Dies hängt mit der Fugenproblematik zusammen. Bei PEHD-Dichtungsbahnen kann durch Schweißen ein werkstoffgleicher, homogener und stoffschlüssiger Verbund hergestellt und eine Fuge im eigentlichen Sinne daher ganz vermieden werden: Bei einer bereits vorhandenen Dichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen kann der Anschluss durch eine Heizkeil-Doppelnah oder durch eine Auftragnah hergestellt werden. Polyethylen-Gasrohre oder Polyethylen-Schachtrohre können werkseitig mit einem Polyethylen-Kragen versehen werden, an den die Dichtungsbahn vor Ort mit einer Auftragnah angeschweißt wird.

Völlig wasserdicht ist eine Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahnen aber nur dann, wenn beim Einbau und den Schweißarbeiten keine Löcher entstanden sind. Der Durchfluss nach Volumen Q durch ein Loch in einer Kunststoffdichtungsbahn, die auf einer wassergesättigten Stützschiht eben aufliegt, hängt von folgenden Größen ab [53]: dem Radius R des Loches, der Durchlässigkeit k und der Dicke d der Stützschiht und der Differenz der hydraulischen Potentiale oberhalb der Dichtungsbahn φ_0 und unterhalb der Stützschiht φ_* . Kann das Wasser unterhalb der Stützschiht frei abfließen, setzt man das hydraulische Potential unterhalb der Stützschiht also Null, so ist Q bei einem Wasseraufstau auf der Dichtungsbahn der Höhe h_w gegeben durch:

$$Q = 4kR(\varphi_0 - \varphi_*) = 4kR(h_w + d)$$

Immerhin braucht es 4 Löcher pro 100 m² mit einem Durchmesser von jeweils 1 cm bei einer Durchlässigkeit der Stützschiht von 1·10⁻⁶ m/s bis sich die Systemdurchlässigkeit vom Wert Null der fehlerfreien Abdichtung auf den Wert 5·10⁻¹⁰ m/s einer mineralischen Dichtung erhöht. Dieses - etwas akademische - Beispiel illustriert jedoch, dass die im Vergleich zu allen anderen Abdichtungen außerordentlich hohe Wirksamkeit der Abdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen nur dann erreicht wird, wenn sie weitgehend fehlerfrei eingebaut wurde. Die Kunststoffdichtungsbahn ist eine sehr dünne Abdichtungsschiht, die beim rauen Erdbaubetrieb mit schweren Geräten und scharfkantigen Werkzeugen und bei unsachgemäßer Verlege- und Schweißtechnik relativ leicht beschädigt werden kann. Die letztlich erreichte Wirksamkeit der Dichtung hängt daher entscheidend von einem sachgerechten und sorgfältigen Einbau ab. Auf diese Thematik wird im nächsten Abschnitt noch ausführlicher eingegangen.

Die wasserdichten PEHD-Dichtungsbahnen sind auch weitgehend dicht gegen alle Arten von Schadstoffen. Im Wasser gelöste Stoffe (Anionen und Kationen) können grundsätzlich nicht durch eine PEHD-Dichtungsbahn diffundieren [45]. Schwach polare oder unpolare organische und anorganische Gase können jedoch im amorphen Bereich der PEHD-Dichtungsbahn diffundieren [54], [1].

Im einfachsten Fall steht bei einer Altdeponie oberhalb einer Dichtungsbahn das Gasgemisch Luft an, das im Wesentlichen aus Sauerstoff und Stickstoff besteht, und unterhalb das Deponiegasgemisch aus im Wesentlichen Methan und Kohlendioxid. Unter solchen Bedingungen werden immer chemische Kräfte (Gradienten in den chemischen Potentialen) wirksam, die nach einem Ausgleich der Konzentrationen der Gasgemische oberhalb und unterhalb der Dichtungsbahn streben. Es wird daher durch Diffusion zu einem Gasaustausch kommen. Die Diffusionsraten bei einer Dichtungsbahnabdichtung werden bestimmt, durch den Diffusionskoeffizienten und die Löslichkeit der Gase in der PEHD-Dichtungsbahn, durch deren Dicke, Kristallinität und durch den wirksamen Partialdruckunterschied. Die Diffusionsraten sind dabei im Vergleich zu den Transportraten des diffusiven und konvektiven Gastransports, wie er durch den Luftporenraum bei teilgesättigten porösen Dichtungen, wie alle Arten von mineralischen Dichtungen, Erdabdeckungen, Methan-Oxidationsschichten und dergleichen, stattfinden kann, außerordentlich gering¹⁶. Im technischen Sinne kann daher die PEHD-Dichtungsbahn auch als gasdicht bezeichnet werden. Insbesondere wird durch den Unterdruck einer aktiven Gasfassungseinrichtung keine Luft über die Oberflächenabdichtung mit angesaugt.

8. Einbau der PEHD-Dichtungsbahnen

PEHD-Dichtungsbahnen werden in einem automatisch gesteuerten und durch eine Qualitätssicherung laufend eigen- und fremdüberwachten industriellen Produktionsprozess gefertigt und als Rollenware auf die Baustelle geliefert. Im Gegensatz dazu müssen die meisten anderen Abdichtungsmaterialien vor Ort durch verschiedene Gewinnungs-, Transport-, Aufbereitungs- und Verarbeitungsprozesse aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen erst hergestellt werden. Daraus resultieren notwendigerweise große Schwankungen in den Eigenschaften, die durch begleitende umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen nur bedingt in engen Schranken gehalten werden können. Deshalb muss z. B. die Asphaltbetondichtung zweilagig fugenversetzt eingebaut werden [52], um eine ausreichende Dichtigkeit im Fugenbereich sicherzustellen. Eine mineralische Dichtung muss aus mindestens 3 Lagen aufgebaut werden, um die Schwankungen in den physikalischen Eigenschaften so auszugleichen, dass die anhand der Laborwerte prognostizierte Durchlässigkeit auch tatsächlich im Feld erreicht wird ([9], siehe E 2-15).

Auch die PEHD-Dichtungsbahnen müssen jedoch auf der Baustelle verlegt und durch Heizkeil-Überlappnähte mit Prüfkanal sowie durch Auftragnähte zu einer durchgehenden Abdichtung zusammen gefügt werden. Im vorigen Abschnitt wurde hervorgehoben, dass die außerordentlich hohe Wirksamkeit einer solchen Abdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen nur dann gegeben ist, wenn sie fehlerfrei eingebaut wurden. Die Vorbehalte gegenüber Kunststoffdichtungsbahnen

wurzeln daher vor allem in der Vorstellung, dass dieses dünne Abdichtungselement den mit schwerem Gerät und grobem Erdstoff durchgeführten Erdbau kaum heil überstehen kann. Inzwischen wurden weltweit bei unterschiedlichsten Abdichtungsmaßnahmen mit Kunststoffdichtungsbahnen auch Dichtungskontrollsysteme eingesetzt. Die Ergebnisse der Kontrollen wurden gesammelt und ausgewertet [55], [56]. Die bautechnischen Standards, Art und Umfang der Qualitätssicherung und die Qualität der Dichtungsbahnen bei den ausgewerteten Beispielen entsprechen durchweg nicht dem Stand der Technik, der bei der Herstellung von Deponieabdichtungen mit zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen in Deutschland erreicht wird. Dennoch lassen sich einige wichtige Schlussfolgerungen ziehen: Es sind nämlich immer die gleichen, inzwischen wohlbekannten Gründe, deren Zusammenwirken zu Fehlstellen führt.

Es werden ohne Rücksicht auf die Erfordernisse einer Abdichtung mit Kunststoffdichtungsbahnen grobkörnige und mit Fremdkörpern verunreinigte Stüttschichtmaterialien ausgewählt, eingebaut und deren Oberfläche nur unzureichend planiert.

2. Es werden zu dünne Kunststoffdichtungsbahnen eingesetzt.
3. Schweißgeräte und –maschinen, Prüftechnik, Erfahrungen und Qualifikation der Schweißer entsprechen nicht den Anforderungen der einschlägigen Richtlinien.
4. Die Kunststoffdichtungsbahnen werden unzureichend geschützt bzw. der Einbau weiterer Schichten erfolgt ohne Rücksicht auf das bereits verlegte Abdichtungselement.

Fast drei Viertel aller mit Dichtungskontrollsystemen gefundenen Schäden (73 %) waren durch Baumaßnahmen verursacht worden, die erst nach dem eigentlichen Einbau der Dichtungsbahn durchgeführt worden waren; nur ein Viertel der Fehlstellen waren bei den eigentlichen Verlege- und Schweißarbeiten entstanden (24 %). Die Wahrscheinlichkeit, dass nach Abschluss aller Baumaßnahmen im Laufe der Zeit noch Fehler auftraten, war sehr gering (3%). Wenn also die ganze Abdichtung erst einmal einwandfrei hergestellt worden ist, dann ist sogar unter den genannten kritischen Randbedingungen (zu dünne Dichtungsbahnen, mangelhafter Schutz) nur in geringem Umfang mit Spätschäden zu rechnen.

Eine Abdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen kann nach diesen Erfahrungen fehlerfrei hergestellt werden, wenn folgende Punkte beachtet werden:

Die Anforderungen an die Stüttschicht werden eingehalten [4].

2. Die Bauverfahrenstechnik des Einbaus von Drainage- und Rekultivierungsschichten werden sorgfältig auf die Erfordernisse einer Abdichtung aus Dichtungsbahnen abgestimmt [57].
3. Es werden nur zugelassene PEHD-Dichtungsbahnen mit einer Dicke von mindestens 2,5 mm verwendet (siehe unten) und die Bestimmungen und Anforderungen der Zulassungsrichtlinie und des Zulassungsscheins eingehalten. Das heißt genauer:
4. Die Verlege- und Schweißarbeiten werden auf der Grundlage der jeweils gültigen Zulassungsanforderungen und der einschlägigen DVS-Richtlinien, insbesondere DVS-R 2225-4, von erfahrenen und qualifizierten Verlegefachbetrieben durchgeführt, die einer Güteüberwachung (z. B. durch den AK GWS) nach den Anforderungen der Zulassung unterliegen.

5. Sowohl die Herstellung der Dichtungsbahnen wie auch deren Einbau werden im Rahmen von Qualitätsmanagementsystemen eigen- und fremdüberwacht, wobei die fremdprüfenden Stellen sowohl für die erforderlichen Inspektionsmaßnahmen (nach DIN EN 45004) wie auch für die dabei durchzuführenden Prüfungen (nach DIN EN ISO 17025) akkreditiert sein müssen.

Die Ergebnisse von Abnahmemessung bei nach diesem Stand der Technik errichteten Deponieabdichtungen und Altlastensicherungen aus PEHD-Dichtungsbahnen, bei denen zusätzlich ein Dichtungskontrollsystem mit eingebaut wurde, bestätigen, dass so tatsächlich fehlerfreie Abdichtungen hergestellt werden können.

Ein Vergleich der Anforderungen an den Einbau und die Qualitätssicherung bei den verschiedenen Abdichtungsmaterialien - also ein Vergleich der Zulassungsrichtlinie für Kunststoffdichtungsbahnen [4] und der DVS-Richtlinien [58] z. B. mit den Merkblättern des DIBt für die Herstellung von Asphaltbetondichtungen [52], mit der NRW-Richtlinie für mineralische Dichtungen [23] und den einschlägigen GDA-Empfehlungen [9], mit dem Qualitätssicherungshandbuch für das polymervergütete Sand-Bentonitgemisch Trisoplast, das auf der homepage des niedersächsischen Landesamts für Ökologie zu finden ist¹⁷, oder mit den einschlägigen Merkblättern und Empfehlungen für Bentonitmatten [59] - zeigt, dass Aufwand und Umfang der Inspektionsmaßnahmen und Prüfungen bei Dichtungsbahnen selbst bei diesem Stand der Technik sogar geringer, jedenfalls nicht größer, als bei den anderen Abdichtungskomponenten ist. Der ganz wesentliche Unterschied besteht nur darin, dass bei der Dichtungsbahn mit der Zulassung durch die BAM, der Güteüberwachung durch den AK GWS und der Akkreditierung durch den DAP die Instrumente vorhanden sind, um die Durchsetzung der vielfältigen Anforderungen auch tatsächlich mit hoher Wahrscheinlichkeit zu gewährleisten.

Der genannte Vergleich zeigt auch, dass der Einbau der Dichtungsbahnen nicht witterungsempfindlicher ist als der anderer Dichtungen. Die Anforderungen ähneln sich hier oder sind sogar bis in die Wortwahl identisch. Für die Verlegeleistung (verlegte Fläche pro Verlegetag) wurden bei Dichtungsbahnen in einer breit angelegten Untersuchung Werte zwischen 489 m²/d und 1750 m²/d mit einem Durchschnitt von 800 m²/d gefunden [60]. Bezogen auf die Betriebstage insgesamt lag die Verlegeleistung zwischen 141 m²/d und 1355 m²/d. Regelmäßig war es dabei der langsame Baufortschritt der anderen Gewerke, der die Verlegung der Dichtungsbahn behinderte. Dichtungsbahnabdichtungen können daher relativ rasch hergestellt werden.

Bei allen Abdichtungen sind grundsätzlich Fugen oder gefügte Bereiche jene Schwachstellen, an denen sich am ehesten Undichtigkeiten ergeben können. PEHD-Dichtungsbahnen bestehen aus einem thermoplastischen Werkstoff und können daher relativ einfach durch Schweißen zusammengefügt werden [1], [58]. Es entsteht dabei, wie eingangs hervorgehoben, ein fester und stoffschlüssiger Verbund. Dennoch werden durch Alterungsvorgänge bedingte Materialveränderungen sich am ehesten im Bereich der Schweißnähte vollziehen. Dies gilt besonders für die Spannungsrissbildung vor allem bei dünnen Dichtungsbahnen. Auf ein Hektar Abdichtung mit PEHD-Dichtungsbahnen sind durchschnittlich etwa 1500 m Schweißnaht herzustellen. 90 %

davon sind Heizkeil-Überlappnähte mit Prüfkanal [60]. Die Dichtungsbahnen werden dabei vorsichtshalber maschinell gleich mit zwei von einander unabhängigen Schweißnähten gefügt, die über den Prüfkanal durchgängig auf ihre Dichtigkeit geprüft werden können. Etwa 10 % sind Auftragnähte, die nur als Einfachnaht und nur in Handarbeit hergestellt werden können. Spannungskonzentrationen bei Verformungen aufgrund des geometrischen Verlaufs der Schweißnaht, Unstetigkeiten in der Morphologie im Übergang vom Grundmaterial zur eigentlichen Schweißnaht und thermische Belastung des Materials durch den Schweißvorgang lassen sich bei beiden Nahttypen nicht vermeiden. Die oben angestellten Betrachtungen zur Beständigkeit und zum Verformungsverhalten sind daher nur dann auf Schweißnähte anwendbar, wenn die Verformungsgrenzen strikt eingehalten, die Nähte materialschonend mit hoher Güte hergestellt und ausschließlich gut stabilisierte Formmassen mit hoher Spannungsrissbeständigkeit verwendet werden. Letzteres gilt vor allem auch für die Schweißzusätze.

Mit dem Zeitstand-Schälversuch besteht die Möglichkeit die Güte von Überlappnähten qualitativ und quantitativ zu beurteilen [61]. Die Güte kann auf Prozessparameter zurückgeführt werden, die den Schweißvorgang beschreiben, der aus einem thermischen Prozess (Aufschmelzen) und einem rheologischen Prozess (Durchmischen) besteht. Die Prozessparameter können dann mit den eigentlichen Schweißparametern - Heizkeiltemperatur, Fügekraft und Schweißgeschwindigkeit - verknüpft werden [62]. Abhängig von den verwendeten Schweißmaschinen kann so ein Prozessmodell-gestütztes Fenster für die Auswahl optimaler Schweißparameter unter gegebenen Schweißbedingungen angegeben werden [63], [64]. Nur güteüberwachte Verlegefachbetriebe sind in der Lage derart qualitätsgesicherte Überlappnähte herzustellen.

Die Beurteilung von Auftragnähten erfolgt erst nach Fertigstellung aufgrund von Erfahrungen und Kriterien, die in anderen Anwendungsbereichen gesammelt wurden. Die Güte dieser Nähte wird vor allem bestimmt durch das quantitativ nicht erfassbare Geschick und die Erfahrung des Schweißers. Da es zudem nur Einfachnähte sind, sollte ein Fügen durch Auftragnähte nur dort erfolgen, wo dies tatsächlich unvermeidlich ist.

Abschließend sei noch auf die Frage nach der erforderlichen Dicke der PEHD-Dichtungsbahnen eingegangen. Es ist klar, dass 1,5 mm oder gar nur 1 mm dicke PEHD-Dichtungsbahnen zu empfindlich gegen mechanische Beanspruchungen sind, sich nicht wellenfrei verlegen lassen und auf der Baustelle nicht zuverlässig und mit der erforderlichen Güte geschweißt werden können [60], [65]. PEHD-Dichtungsbahnen mit einer Dicke von 2,5 mm sind dagegen unter Berücksichtigung und im Abwägen aller Aspekte (mechanische Robustheit, Langzeitverhalten, Herstellungs- und Verlegetechnik, Schweißtechnik) optimal geeignet [1], [66]. Ob und inwieweit bei Verwendung von 2 mm dicken Dichtungsbahnen Abstriche gemacht werden müssen, darüber lässt sich endlos streiten: Es ist derzeit völlig unklar, ob sie mehr im Eigenschaftsbereich der nicht akzeptablen 1,5 mm dicken PEHD-Dichtungsbahnen oder eher noch im Bereich der optimalen 2,5 mm dicken Dichtungsbahnen liegen. Die aus Langzeituntersuchungen an Schweißnähten und einem Prozessmodell abgeleiteten Qualitätsstandards für Heizkeil-Doppelnähte sind jedenfalls nicht unmittelbar auf 2 mm dicke Dichtungsbahnen anwendbar. Darüber hinaus sollten grundsätzlich eher dicke PEHD-Dichtungsbahnen gewählt werden, um den relati-

ven Materialanteil der im Schweißprozess thermisch belastet wird und die Größe der Spannungskonzentration im Bereich von Kerben so gering wie möglich zu halten. Der mit dünnen Dichtungsbahnen zunächst scheinbar erzielte wirtschaftliche Gewinn wird durch die Probleme und dadurch verursachten Kosten beim Einbau und durch den Verlust an Güte der eingebauten Abdichtung aufgewogen. Aus all diesen Gründen werden von der BAM derzeit keine 2 mm PEHD-Dichtungsbahnen, auch nicht für Oberflächenabdichtungen, zugelassen. Neben diesen fachlichen Gründen ist dabei allerdings auch der formale Aspekt zu beachten, dass die geltenden gesetzlichen Vorschriften (TA Abfall und TA Siedlungsabfall in Verbindung mit Ablagerungsverordnung und Deponieverordnung) eine Mindestdicke von 2,5 mm für Kunststoffdichtungsbahnen fordern.

9. Exkurs: Bewässerung des Müllkörpers und Oberflächenabdichtungen sollen dicht sein: ein Widerspruch?

Der Vorteil der Kunststoffdichtungsbahn, nämlich unter diesen vielfältigen Einwirkungen auch tatsächlich dicht zu sein und zu bleiben, wird aber in jüngster Zeit zu ihrem Nachteil ausgelegt. Im Mai 2001 erschien im Müllhandbuch ein Arbeitspapier „Strategie zum Umgang mit Altdeponien“[67]. In dem Papier wird für die undichte Abdichtung plädiert. In den Müllkörper der Altdeponien soll nämlich auch nach der Stilllegung ständig in gewissem Umfang Niederschlagswasser sickern dürfen, in der Hoffnung, dass dadurch viele organischen Stoffe vollständig chemisch-biologisch abgebaut werden. Da *„die Funktionstüchtigkeit der Oberflächenabdichtung ... bei realistischer Einschätzung auf lange Sicht ebenso wenig wie die Funktionstüchtigkeit eines etwaigen Leckdetektionssystems garantiert werden [kann]“*, kann nur - so behaupten die Autoren - über die *„Stabilisierung des Müllkörpers“* ein langfristig sicherer Zustand erreicht werden. Die Aufbringung einer dichten Oberflächenabdichtung gemäß den Anforderungen der TA Siedlungsabfall, also einer Kombinationsdichtung, würde dagegen zu einer Mumifizierung des Mülls führen. Sein Emissionspotential bliebe langfristig erhalten. Es wird dann der Schluss gezogen: *„Als Konsequenz dieser Betrachtungsweise könnten folglich Oberflächenabdeckungen eingesetzt werden, die geringe Restemissionen zulassen, dabei aber eine biologische Stabilisierung des Deponiekörpers ermöglichen und auf lange Sicht wartungsarm sind. Dieses bedeutet, dass das Emissionspotential einer Deponie nicht konserviert, sondern weitgehend kontrolliert reduziert, die Sickerwasserbildung weitgehend vermindert und das anfallende Sickerwasser mit möglichst geringem ... Aufwand wartungsarm behandelt wird.“* Solche undichten Abdichtungen sind nach Auffassung der Autoren einfache mineralische Abdichtungen, Bentonitmatten oder Kapillarsperren in Verbindung mit Wasserhaushaltsschichten.

Man wird den Autoren sicherlich zustimmen, dass man dort, wo eine Basisabdichtung oder eine gute geologische Barriere vorhanden ist und das Sickerwasser gesammelt werden kann, die Abbauprozesse in Altdeponien möglichst weit vorantreibt. Die Schlussfolgerung, dass man dazu am besten eine undichte endgültige Oberflächenabdichtung wählt, ist jedoch aus zwei Gründen nicht richtig:

Es wird dabei unterstellt, dass sich die Durchlässigkeit einer undichten Abdeckung aus mineralischen Materialien in irgendeiner Weise dimensionieren und kontrollieren ließe. Tatsächlich hat die mineralische Dichtung, die Bentonitmatte oder die Kapillarsperre zusammen mit der Rekultivierungsschicht nach dem Einbau zunächst eine relativ hohe Dichtigkeit. Die Restdurchlässigkeit reicht bei weitem nicht aus, um den chemisch-biologischen Abbau in Gang zu halten. Regelmäßig wird ein starker Abfall der Gasproduktion nach dem Aufbringen auch solcher Dichtungen beobachtet, siehe z. B. [68]. Die Mumifizierung kommt in Gang. Es gibt nun zwei Möglichkeiten für die weitere Entwicklung. Einmal können die Bedingungen - z. B. die Dicke und Beschaffenheit der Rekultivierungsschicht, die klimatischen Verhältnisse, usw. - so günstig sein, dass die langfristige Funktionstüchtigkeit der Abdichtung durch die oben besprochenen Einwirkungen nicht beeinträchtigt wird. Dann wird sich aber die Mumifizierung fortsetzen. Lassen diese Abdichtungen aber tatsächlich nach einer gewissen Anfangszeit doch wieder Niederschlagswasser im für den Abbau relevantem Ausmaß durch, dann manifestieren sich darin die Auswirkungen der oben diskutierten Einwirkungen. Typischerweise haben dann Austrocknungsvorgänge und vielleicht schon Durchwurzelungsvorgänge in der mineralischen Dichtung, der Bentonitmatte und der Rekultivierungsschicht über der Kapillarsperre begonnen. Der entscheidende Punkt ist nun, dass sich solche Materialveränderungen, wenn sie einmal in Gang gekommen sind, eben nicht auf dem erhofften Niveau einer „weitgehend minimierten Sickerwasserbildung“ und eines „weitgehend kontrolliert reduzierten Emissionspotentials“ einpendeln. Vielmehr wird im Laufe der Zeit die Durchlässigkeit immer weiter anwachsen. Bei der mineralischen Dichtung ist die mit der Wassergehaltsänderung verbundene Rissbildung schon im Anfangsstadium irreversibel und weitet sich mit jedem Austrocknungszyklus aus. Pflanzenwurzeln finden den Weg in die Dichtung. Solchen Bodenbildnern folgt schließlich sogar das Bodengeetier. Vor allem aber werden die Abbauprozesse unweigerlich zu Setzungen führen, gegen die gerade die mineralischen Dichtungen und die Kapillarsperre außerordentlich empfindlich sind. Auch Bentonitmatten können nicht beliebig viele Austrocknungszyklen durchlaufen, ohne dass sich die Durchlässigkeit nach und nach verschlechtert. Man muss auch vermuten, dass sich die Durchlässigkeit der Kapillarsperre bei regelmäßigen Durchbruchereignissen verändern wird. Zumindest kann derzeit niemand zuverlässige Aussagen über deren Langzeitverhalten machen.

Es wäre also reiner Zufall, wenn sich langfristig der von den Autoren gewünschte Zustand einstellen würde. In der Regel muss vielmehr damit gerechnet werden, dass die Niederschlagsmenge, die im Deponiekörper versickert, im Laufe der Zeit immer größer wird. Der Deponiebetreiber wird sich zwar zunächst darüber freuen, dass die Deponiegasproduktion nach anfänglichem Abfall doch wieder in Gang gekommen ist. Er wird dann jedoch einen stetigen Anstieg, jedenfalls nicht ein allmähliches Versiegen der Sickerwassermengen beobachten und daher irgendwann vor der Aufgabe stehen, seine undichte Abdichtung schließlich doch durch eine dichte Abdichtung zu ersetzen.

Die zweite Schwäche in der Argumentation besteht in der Annahme, dass mit dem anaeroben Abbau, wenn er denn wirklich vollständig möglich ist, eine so weitgehende Stabilisierung des Müllkörpers erreicht werden kann, dass eine Oberflächenabdichtung eigentlich überflüssig ist. Im Rahmen des sehr weitgespannten Zeithorizonts, den die Autoren bei ihrem Urteil über Ab-

dichtungen im Auge haben, muss man damit rechnen, dass sich allmählich wieder ein aerobes Milieu im Deponiekörper einstellt. Man kann dann nicht ausschließen, dass es mit dem eindringenden Niederschlagswasser wieder zur Schadstofffreisetzung durch Oxidation der unter anaeroben Bedingungen gebildeten Verbindungen kommt. Ohne Oberflächenabdichtung lässt sich das Gefährdungspotential einer Altdeponie daher nicht beherrschen.

Gerade dort wo man anstrebt, chemisch-biologische Abbauprozesse voranzubringen, sollte man vielmehr statt der vermeintlich emissions- und wartungsarmen mineralischen Abdichtungen die Oberfläche mit den im Vergleich außerordentlich verformungsfreudigen Kunststoffdichtungsbahnen (siehe Abb. 1) konsequent abschließen. Durch eine Sickerwasserrückführung über eine in die Kunststoffabdichtung leicht zu integrierende Bewässerungsanlage kann dann dem Müllkörper Wasser tatsächlich kontrolliert und im erforderlichen Umfang zugeführt werden. Die Deponieverordnung eröffnet ausdrücklich die Möglichkeit der Sickerwasserrückführung [69]. Mit diesem Verfahren wurden im Einzelfall schon gute technische und wirtschaftliche Erfahrungen gemacht [70].

Die Unsicherheit in der Beurteilung, inwieweit eine in situ Belüftung eine Altdeponie tatsächlich ausreichend stabilisieren kann, ist sicherlich wesentlich größer als die in der Beurteilung des Langzeitverhaltens von Abdichtungen. Es ist kaum möglich bei einer bereits bestehenden Ablagerung durch eine nachträgliche aerobe Behandlung eine Stabilisierung oder Inertisierung zu erreichen, die dem Zustand nach einer thermischen oder mechanisch biologischen Abfallvorbehandlung vergleichbar wäre. Auch die Empfehlung einer in situ Belüftung, so sinnvoll sie bei kleinen Ablagerungen möglicherweise ist, kann daher die Forderung nach einer dichten Abdichtung nur ergänzen und nicht ersetzen.

Die „biologische Stabilisierung“ als integraler Bestandteil des Abdichtungskonzepts ist schließlich nur dann akzeptabel, wenn das in die Altdeponie eindringende Wasser auch tatsächlich gesammelt und der Verbleib kontrolliert werden kann [69]. Bei Altdeponien, bei denen, wie im eingangs beschriebenen Beispiel, bereits eine Kontamination des Grundwassers stattfindet, bleibt daher ohnehin nur die Sicherung durch eine wirklich dichte Abdichtung, selbst nach Auffassung der Autoren des Arbeitspapiers also nur durch Kunststoffdichtungsbahnen oder Asphaltbetondichtungen. Die Mumifizierung des Mülls, die man bei einer sicheren und dichten Einschließung an einem gegebenen Ort in Kauf nimmt, wird in fast allen Fällen einer unabsehbar langanhaltenden und unkontrollierten Ausbreitung und Verdünnung von Schadstoffen im Grundwasser vorzuziehen sein [71].

Dieses Gutachten plädiert daher für die Anerkennung der Gefährdungen durch Altdeponien und deren Beherrschung mit einfachen aber konsequenten technischen Maßnahmen und gegen den bei diesen Deponien immer zweifelhaften Versuch eine Art unschuldigen Naturzustands herstellen zu wollen.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
12200 Berlin, 2003-03-31

Fachgruppe IV.3
Abfallbehandlung und
Altlastensanierung

Laboratorium IV.32
Deponietechnik

im Auftrag

im Auftrag



Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. F.-G. Simon
Leiter der Fachgruppe IV.3

RD Dr. rer. nat. W. Müller
Leiter des Laboratoriums IV.32

Verteiler: 1. bis 3. Ausfertigung: Arbeitskreis Grundwasserschutz e. V. (AK GWS)
4. Ausfertigung (Urschrift): BAM IV.32

Anlagen

A-1 Anmerkungen

1. Die Interpretation einer solchen Ausnahmeregelung führt naturgemäß zum Streit. Siehe dazu:
Engelmann, B.: Die Umsetzung der EU-Deponierichtlinie in deutsches Recht,
Bräcker, W.: Möglichkeiten und Grenzen der Abfallablagerungs- und Deponieverordnung, und
Sondermann, D.: Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Stilllegung und Nachsorge von Deponien unter Berücksichtigung der Aktiven Sicherheitsdichtung.
Alle Aufsätze in: Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.
2. „VKS fürchtet Milliardenkosten durch die EU-Deponierichtlinie“, VKS-News, 60. Ausgabe, März 2002, S. 9.
3. Siehe dazu insbesondere den oben zitierten Beitrag von *D. Sondermann*
4. Die Zulassungsrichtlinie für Kunststoffdichtungsbahnen und alle anderen Richtlinien der BAM sowie Informationen über die zugelassenen Dichtungsbahnen und Schutzschichten und über akkreditierte Fremdprüfer sind auf der homepage des Labors Deponietechnik www.bam.de/deponietechnik.htm als pdf-Dateien bereit gestellt.
5. In der LAGA hatte sich eine „Arbeitsgruppe zu Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen sowie weiteren Fragen“ gebildet, die Arbeitspapiere zur Ausgestaltung und Interpretation der genannten Vorschriften erarbeitet hat. Die Papiere waren Ende Juni 1999 in der Arbeitsgruppe verabschiedet und dann vom Abfalltechnischen Ausschuss der LAGA und schließlich auch im Februar 2000 von der LAGA selbst gebilligt worden. Inzwischen sind sie den Vollzugsbehörden als Hinweise zum Umgang mit den Vorschriften zur Kenntnis gebracht worden. Die Arbeitspapiere sollten daher im Vollzug, aber sicherlich auch in der Diskussion um die Deponieverordnung, eine wichtige Rolle spielen. Sie sind veröffentlicht in: *Bräcker, W.* (Hrsg.): Abfallwirtschaftsfakten 6.1, Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen. Hildesheim: Niedersächsisches Landesamt für Ökologie 2002.
Siehe dazu auch: *Müller, W. W.*: Dichtungselemente für die Oberflächenabdichtung von Altdeponien. In: Tagungsband der 17. Fachtagung: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2001, S. C1-C20.
6. Verschiedene der angeführten Quellen sowie weitere Informationen sind auch über das Internet zugänglich und dort zuallererst über die Adresse www.deponieonline.de. Dort findet man auch einen interessanten Beitrag zu dem hier behandelten Thema, nämlich: *Stief, K.*: Deponieabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen - Wie geht es weiter? Anforderungen - Bedarf - Notwendige Aktivitäten. Manuskript des Vortrages auf der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.
7. In der deponietechnischen Fachdiskussion wurde unter „dauerbeständig“ oft „ohne Ende“, oder „ewig“ verstanden. Bei näherem Hinsehen zeigte sich dann, dass man damit irgendeine Art von „in natürlicher Weise dicht sein“, irgendeine Art von dichter Formation, wie sie auch in der Natur vorkommt, meinte. Diese Überlegungen liegen noch der Forderung nach einer Wasserhaushaltsschicht zugrunde. In seinen Zulassungen hatte das DIBt jedoch sehr rigoros umgesetzt, dass auch Dauerbeständigkeit prüftechnisch erfass- und bewertbar sein muss. Dieser Standpunkt wird inzwischen auch von vielen Umweltfachbehörden akzeptiert. So wurde vor allem auch auf der Grundlage von Untersuchungen der Hydrolyse-Stabilität und der Beständigkeit gegen mikrobiellen Abbau der polymeren Komponente des polymervergüteten Sand-Bentonitgemischs Trisoplast sowie der Erfahrungen, die mit solchen polymeren Zusätzen zur Bodenverbesserung vorliegen, von einem vom Landesamt für Ökologie in Niedersachsen initiierten Arbeitskreis anerkannt, dass eine einwandfrei hergestellte, mindestens 10 cm dicke Trisoplast-Dichtung im Sinne der DIBt-Zulassung als dauerbeständig angesehen werden kann. Es sei hier hervorgehoben, dass - auf der Basis dieser Nachweise geurteilt - eine Abdichtung aus PEHD-Dichtungsbahnen auf alle Fälle mindestens so beständig ist wie eine aus dem Geokunststoff Trisoplast. Solche prüftechnisch erfassbaren Kriterien

muss man nun aber fairer Weise auch bei der Beurteilung anderer Geokunststoffprodukte, wie z. B. Kunststoff-Dränelementen, heranziehen.

Allerdings hat sich bisher nur ein Hersteller solcher Produkte auf echte Langzeituntersuchungen eingelassen. Alle anderen Hersteller verzichten noch aus drei Gründen auf Langzeitprüfungen: Für die üblichen geotechnischen Anwendungen, wo die Möglichkeit zur Reparatur mit vertretbarem Aufwand besteht oder ohnehin eine Sanierung in Abständen vorgesehen ist, ist ein Langzeitnachweis nicht erforderlich. Langzeituntersuchungen sind sehr teuer. Bislang können aber auch für Oberflächenabdichtungen immer wieder Produkte verkauft werden, für die keine echten Nachweise vorliegen.

8. Eigentlich dürften in Deponieabdichtungen nur Materialien eingesetzt werden, die sich in anderen Anwendungsgebieten der Geotechnik, z. B. im Wasserbau oder bei Bauwerksabdichtungen, bewährt haben. Statt dessen ist umgekehrt die Deponietechnik das Experimentierfeld für alle möglichen Abdichtungsrezepturen geworden. Das liegt vermutlich an dem unterschwellig eben doch vorhandenen Gefühl bei einem Müllhaufen käme es technisch gesehen nicht so sehr darauf an wie bei einem Speicherbecken oder einem Kanalbauwerk.

9. Die Deponietechnik ist eine noch relativ junge und unreife Fachdisziplin. Je weniger man über eine Abdichtung tatsächlich weiß, umso mehr kann sie daher zur Projektionsfläche von weitgespannten Erwartungen werden. Neue Abdichtungsideen (Kapillarsperre, Wasserhaushaltsschicht, alle Arten von Dichtungen aus Reststoffen) stoßen daher immer auf eine erstaunlich große Begeisterung, die dann aber mit zunehmendem Wissen und zunehmender Erfahrung stetig abklingt.

10. Das Vorhandensein von Kenntnissen und Prüfverfahren bedeutet aber nicht notwendigerweise, dass sie auch wirklich angewendet werden. So spielen Anforderungen an die Qualität der Formmassen bei der Auswahl von PEHD-Rohren für die Sickerwassersammlung kaum eine Rolle. Die Qualität hängt von der Seriosität des Herstellers ab, an den der Bauherr gerät. Entsprechend gibt es einzelne Fälle, wo unter kritischen Anwendungsbedingungen massive Schäden durch Spannungsrissbildung beobachtet werden.

11. Warum muss man alte Müllhaufen unter solchen gewaltigen Erdmassen begraben? Ist es wirklich technisch und ökologisch sinnvoll, diese gewaltigen (Schad)Stoffansammlungen „auf ewig“ verbergen und vergessen zu wollen? Beträgt man dadurch nicht die kommenden Generationen mehr, als dass man ihnen ein Problem wirklich abnimmt? Der Gedanke lässt sich schwer von der Hand weisen, dass im tiefen Vergraben des eigenen Unrats vor allem ein tief liegendes emotionales Bedürfnis und nicht ein nur technisch und ökologisch bedingter Sachzwang Ausdruck findet.

12. Die Spannungsrissbildung darf nicht mit der Spannungsrisskorrosion verwechselt werden. Bei dieser finden chemische Umwandlungen des Materials statt, die zur Schwächung und damit zur Auslösung und zum Weiterwachsen von Rissen führen. Die Spannungsrissbildung ist dagegen ein rein physikalisches Phänomen, das durch Chemikalien nur insoweit beeinflusst wird, als diese die Oberflächenspannung der Bruchflächen herabsetzen können.

13. In der US-amerikanischen Fachliteratur wurde früher vereinzelt über eine schlagartige weitreichende Rissbildung (rapid crack propagation) berichtet. Dieses Phänomen wurde beobachtet, wenn aus eigentlich hochdichten PEHD-Formmassen hergestellte, spannungsrissempfindliche Dichtungsbahnen bei tiefen Temperaturen ($< -10\text{ °C}$) dauerhaft unter Zugspannung standen [72].

14. Wenn die neutrale Faser in der Mitte liegt, so wird die Dichtung auf der einen Seite gedehnt auf der anderen aber gestaucht. Die Dichtung wird dann durch eine zu große Biegung zwar in unzulässiger Weise beschädigt, die Risse wandern jedoch nicht durch die Dichtung hindurch. Dies ist erst bei einer Setzungslinie der Fall, wo die neutrale Faser unterhalb der Dichtung liegt und die Biegung von einer Längung überlagert wird. Um das überlegende Verformungsverhalten der Dichtungsbahn zu illustrieren, reicht dieses einfache Beispiel jedoch schon aus.

15. Eine solche Konturlinie wirkt zunächst etwas akademisch, da der Krümmungsradius im Randbereich einen Sprung macht. Dafür bestimmt aber - bei gegebener Dicke der Abdichtung - die maximale Verformung eindeutig die zulässige Setzungstiefe. Tatsächlich im Labor gemessene Setzungslinien stimmen jedoch offenbar gut mit dieser Konturlinie überein [28].

16. Der Unterschied zwischen der Gasdichtigkeit einer mineralischen Dichtung und einer PEHD-Dichtungsbahn kann der Größenordnung nach durch folgende Überlegung abgeschätzt werden. Der Einfach-

heit halber sei angenommen, dass das Deponiegas nur aus Methan besteht. Unterhalb der Dichtung ist also eine reine Methanatmosphäre und oberhalb Luft, wobei in beiden Gasen Atmosphärendruck von $P = 1$ bar herrschen soll. Die Temperatur in der Dichtung sei z. B. $T = 300$ K. Der Porenraum der mineralischen Dichtung ist teilweise mit Wasser und teilweise mit Luft gefüllt. Die Emission durch die mineralische Dichtung wird dann durch die Diffusion des Methans in dem mit Luft gefüllten Teil des Porenraums verursacht. Für die Permeationsrate (ausgedrückt als diffundierte Masse pro Flächen- und Zeiteinheit) gilt [73]:

$$q_{MD} = -D_{MD} \frac{\partial c}{\partial z} = - \left(\frac{D_{MD}}{\beta} \right) \frac{\partial P}{\partial z} = \left(\frac{D_{MD}}{\beta} \right) \frac{\Delta P}{d_{MD}}$$

D_{MD} ist dabei der Diffusionskoeffizient für Methan in der Bodenluft der mineralischen Dichtung. β gibt das Verhältnis des Partialdrucks P zur Konzentration c . Für die einfache Näherung eines idealen Gases ist $\beta = R \cdot T / M$. $R = 8.3145$ J/(mol K) ist dabei die allgemeine Gaskonstante und $M = 16.04$ g/mol die Molmasse des Methans. d_{MD} ist die Dicke der mineralischen Dichtung. ΔP ist die Differenz zwischen dem Druck der Methanatmosphäre unter der Dichtung und dem Partialdruck oberhalb, der in unserem Falle gleich Null angenommen wird. D_{MD} kann auf die Eigenschaften des Porenraums und den Diffusionskoeffizienten in freier Luft zurückgeführt werden [73]: $D_{MD} = (\Gamma \cdot f_a) D_0$, wobei $D_0 = 0,187$ cm²/s der Diffusionskoeffizient des Methans in freier Luft [74], Γ der sogenannte Tortuositätsfaktor [75], [76] und f_a die luftgefüllte Porosität ist. Es gilt $f_a = f - \theta$, mit f als totaler Porosität und θ als volumetrischem Wassergehalt der Dichtung. Der Faktor $\Gamma \cdot f_a$ hat die Größenordnung 10^{-3} bis 10^{-1} [76]. Mit der Dichte von Methan $\rho_{STP} \approx 7 \cdot 10^{-4}$ g/cm³ unter Standardbedingungen (STP) kann die Masse-Permeationsrate in die volumetrische Permeationsrate (Gasvolumen bei STP pro Flächen- und Zeiteinheit) umgerechnet werden: $Q_{MD} = q_{MD} / \rho_{STP}$. Insgesamt ergibt sich dann für die volumetrische Permeationsrate:

$$Q_{MD} = \left(\frac{\Gamma \cdot f_a \cdot D_0 \cdot M}{\rho_{STP} \cdot R \cdot T} \right) \frac{\Delta P}{d_{MD}} \approx 10^{-8} \frac{\text{m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m}}{\text{bar} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2} \frac{\Delta P}{d_{MD}}$$

Für die Diffusion von Methan durch eine PEHD-Dichtungsbahn gilt dagegen [1]

$$Q_{KDB} \approx \left(10^{-14} \frac{\text{m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m}}{\text{bar} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2} \right) \frac{\Delta P}{d_{KDB}}$$

Das Verhältnis der volumetrischen Permeationsraten ist dann $Q_{MD} / Q_{KDB} \approx 10^3$. Die PEHD-Dichtungsbahn ist daher um Größenordnungen gasdichter als alle Arten von mineralischen Dichtungen.

A-2 Literatur

- Müller, W. W.: Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik. Basel: Birkhäuser Verlag 2001.
2. *Sondermann, D.*: Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Stilllegung und Nachsorge von Deponien unter Berücksichtigung der Aktiven Sicherheitsdichtung. In: Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.
 3. *Seeger, S.* (Hrsg.): Anforderungen an Dichtungskontrollsysteme in Oberflächenabdichtungen von Deponien, Empfehlungen des Arbeitskreises Dichtungskontrollsysteme (AK DKS). Berlin: Labor Deponietechnik, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 2000.
 4. *Müller, W. W.* (Hrsg.): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Abdichtung von Deponien und Altlasten. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaften GmbH 1999.
 5. *Müller, W. W.* (Hrsg.): Anforderungen an die Schutzschicht für die Dichtungsbahnen in der Kombinationsdichtung, Zulassungsrichtlinie für Schutzschichten. Berlin: BAM, Labor Deponietechnik 1995.
 6. *Seeger, S., Müller, W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. und August, H.*: Anforderungen an die Schutzschicht für die Dichtungsbahn in der Kombinationsdichtung, Teil 1: Wirksamkeit (lastverteilende Wirkung und Beständigkeit), Materialien und Prüfverfahren bei Schutzschichten. Müll und Abfall, 27(1995), H. 8, S. 544-560.
Müller, W. W.: Kunststoff-Dränmatten im Deponiebau Teil 1: Eigenschaften und Beurteilung. Bautechnik, 79(2002), H. 3, S. 178-192.
 8. *Müller, W. W., Seeger, S. und Thies, M.*: Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten. In: Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.
 9. *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGt)* (Hrsg.): GDA-Empfehlungen. Berlin: Verlag Ernst & Sohn 1997, 716 Seiten.
 10. *Dolezel, B.*: Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi. München: Carl Hanser 1978.
Albertson, A.-C.: Biodegradation of Polymers. In: Handbook of Polymer Degradation. *Hamid, S. H., Amin, M. B., und Maadhah, A. G.* (Hrsg.). New York, Basel, Hong Kong: Marcel Dekker, Inc. 1992.
 12. *Melchior, S.*: In-situ Untersuchungen zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungen. In: Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik. *Stegmann, R. und Rettenberger, G.* (Hrsg.). Bonn: Economica Verlag 1998.
 13. *Egloffstein, T. A. und Burkhardt, G.*: Die Wasserhaushaltsschicht als "Ewigkeitskomponente" für alle "mineralischen" Oberflächenabdichtungen (Erdstoffdichtung, Bentonitmatte, Kapillarsperre). In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2001. *Egloffstein, T. A., Burkhardt, G., und Czurda, K.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 2001, S. 317-351.
 14. *Konold, W. und Zeitner, G.-H.*: Vegetation und Rekultivierung von abgedeckten Mülldeponien (4624). In: Müll-Handbuch, Band 4. *Hösel, G., et al.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 1983, S. 1-10.
 15. *Bönecke, G.*: Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien - Deponiewald statt Oberflächenabdichtungen. In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2001. *Egloffstein, T. A., Burkhardt, G., und Czurda, K.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 2001, S. 263-280.
 16. *Holzlohner, U.*: Rechnerische Abschätzung der Austrocknungsgefährdung von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponieabdichtungssystemen. In: Oberflächenabdichtung oder -abdeckung? *Czurda, K. und Stief, K.* (Hrsg.). Karlsruhe: Technische Universität 1996, S. S. 9-1 bis 9-27.

17. *Schubauer, A.*: Asphaltbeton als Basisabdichtung von Deponien. Bautechnik, 71(1994), H. 9, S. 566-581.
18. *Ramke, H.-G.*: Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht - Ergebnisse und Empfehlungen der Arbeitsgruppe "Oberflächenabdichtungssysteme" des AK 6.1 "Geotechnik der Deponien" der DGGT. In: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2000. *Egloffstein, T. A., Burkhardt, G., und Czurda, K.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 2000, S. 25-64.
19. *Rumberg, E., Einbrodt, H. J., Erpenbeck, J. und Weisheit, W.*: Untersuchungen über das Verhalten von Abdichtungsfolien gegen Nagetiere, Abschlußbericht des BMI Forschungsvorhabens Nr. 102 02 401. Berlin: Umweltbundesamt 1982.
20. *Burkhardt, G. und Egloffstein, T. A.*: Über die Frostempfindlichkeit mineralischer Abdichtungen und Möglichkeiten zu deren Schutz. Müll und Abfall, (1992), H. 12.
21. *Holzlhöner, U.*: Chemische und physikalische Einwirkungen auf mineralische Abdichtungsmaterialien, innovative Baustoffe. In: Deponieabdichtungssysteme, Statusbericht, BAM-Forschungsbericht. *Holzlhöner, U., August, H., und Meggyes, T.* (Hrsg.). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 1994, S. 105-116.
22. *Voigt, T.*: Frosteinwirkung auf mineralische Deponieabdichtungen. Braunschweig: Technische Universität 1995.
23. *N.N.*: Mineralische Deponieabdichtung - Richtlinie Nr. 18. Essen: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen 1993.
24. *Holzlhöner, U.*: Feuchtehaushalt, Austrocknungsgefährdung von Erdstoff-Abdichtungsschichten. In: Deponieabdichtungssysteme, Statusbericht, BAM-Forschungsbericht. *Holzlhöner, U., August, H., und Meggyes, T.* (Hrsg.). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 1994, S. 69-84.
25. *Melichor, S.*: Bentonitmatten als Element von Oberflächenabdichtungen. In: Tagungsband der 16. Fachtagung "Die sichere Deponie, Wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Deutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1999.
26. *Holzlhöner, U.*: Austrocknung und Rißbildung in mineralischen Schichten der Deponiebasisabdichtung. Wasser & Boden, (1992), H. 5, S. 289-293.
27. *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". In: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. *Egloffstein, T. A., Burkhardt, G., und Czurda, K.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 2002, S. 167-182.
28. *Scherbeck, R. und Jessberger, H. L.*: Zur Bewertung der Verformbarkeit mineralischer Abdichtungsschichten. Bautechnik, 69(1992), H. 9, S. 497-506.
29. *August, H.*: Abdichtungssysteme mit Asphalt. In: Deponieabdichtungssysteme, Statusbericht, BAM-Forschungsbericht. *Holzlhöner, U., August, H., und Meggyes, T.* (Hrsg.). Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 1994, S. 185-210.
30. *Schuhbauer, A.*: Asphaltbeton als Basisabdichtung von Deponien. Bautechnik, 71(1994), H. 9, S. 566-581.
31. *Lustiger, A. und Markham, R. L.*: Importance of tie molecules in preventing polyethylene fracture under long-term loading conditions. Polymer, 24(1983), S. 1647-1654.
32. *Menges, G.*: Das Verhalten von Kunststoffen unter Dehnung, Teil 1. Phänomenologie der Rißerscheinungen. Kunststoffe, 63(1973), H. 2, S. 95-100.
33. *Menges, G.*: Das Verhalten von Kunststoffen unter Dehnung, Teil 2. Deutung der kritischen Dehnung und Verhalten der Kunststoffe bei überkritischer Dehnung. Kunststoffe, 63(1973), H. 3, S. 173-177.
34. *Seeger, S. und Müller, W. W.*: Theoretical approach to designing protection: Selecting a geomembrane strain criterion. In: Proceedings of the 1st UK Geosynthetics Symposium. London: Thomas Telford Publishing 2003.

35. *Seeger, S. und Müller, W. W.*: Langzeitbeständigkeit strukturierter Dichtungsbahnen, BAM-Forschungsbericht 256. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH 2001.
36. *Melchior, S. und Steinert, B.*: Die Kapillarsperre - Stand der Technik, Leistungsfähigkeit und Kosten. In: Oberflächenabdichtungen für Deponien, Technische Entwicklung, Wirtschaftlichkeit, Genehmigungsfähigkeit, Heft 29 der Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der TU Berlin. *Savidis, S. A.* (Hrsg.). Berlin: Universitätsbibliothek der Technische Universität Berlin 2001.
37. *Egloffstein, T. A.*: Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. Karlsruhe: Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH (ICP) 2000.
38. *Koch, R., Gaube, E., Hessel, J., Gondro, C. und Heil, H.*: Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen. Müll und Abfall, 20(1988), H. 8, S. 3-12.
39. *Sangam, H. P. und Rowe, K. R.*: Durability of HDPE geomembranes. Geotextiles and Geomembranes, 20(2002), S. 77-95.
40. *Hsuan, Y. G. und Koerner, R. M.*: Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylene Geomembranes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(1998), H. 6, S. 532-541.
41. *Hsuan, Y. G., Koerner, R. M. und Lord, A. E.*: Stress Cracking Resistance of High Density Polyethylene Geomembranes. J. of Geotechnical Engineering, 119(1993), S. 11.
42. *Mueller, W. W. und Jakob, I.*: Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes. Polymer Degradation and Stability, 79(2003), H. 1, S. 161-171.
43. *August, H., Tatzky-Gerth, R., Preuschmann, R. und Jakob, I.*: Permeationsverhalten von Kombinationsdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen, Bericht zum FuE Vorhaben 10302208 des BMBF. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Labor Deponietechnik 1992.
44. *Kalbe, U., Berger, W. und Müller, W. W.*: BAM-Forschungsbericht 251: Mineralogische und chemisch-physikalische Auswirkung der Permeation von Kohlenwasserstoffen in Kombinationsdichtungen und -dichtwänden. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH 2002.
45. *Müller, W. W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. und August, H.*: Stofftransport in Deponieabdichtungssystemen, Teil 1: Diffusions- und Verteilungskoeffizienten von Schadstoffen bei der Permeation in PEHD-Dichtungsbahnen. Bautechnik, 74(1997), H. 3, S. 176-190.
46. *Berger, K. und Sokollek, V.*: Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich? In: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten, Planung - Bau - Kosten. *Egloffstein, T. und Burkhardt, G.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 1997, S. 222.
47. *Emanuel, N. M. und Buchachenko, A. L.*: Chemical Physics of Polymer Degradation and Stabilization. Utrecht, The Netherlands: VNU Science Press 1987.
48. *Gugumus, F.*: Lichtschutzmittel. In: Taschenbuch der Kunststoff-Additive. *Gächter, R. und Müller, H.* (Hrsg.). München: Carl Hanser Verlag 1990.
49. *Popov, A., Rapoport, N. und Zaikov, G.*: Oxidation of stressed polymers. New York: Gordon and Breach Science Publishers 1991.
50. *Gugumus, F.*: Antioxidantien. In: Taschenbuch der Kunststoff-Additive. *Gächter, R. und Müller, H.* (Hrsg.). München: Carl Hanser Verlag 1990, S. 1-103.
51. *Hsuan, Y. G.*: Data base of field incidents used to establish HDPE geomembrane stress crack resistance specifications. Geotextiles and Geomembranes, 18(2000), H. 1, S. 1-22.
52. *Deutsches Asphaltinstitut* (Hrsg.): Asphaltbeton für Deponieabdichtungen, Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung "Deponieasphalt für Deponieabdichtungen der Deponieklasse II". Bonn: Deutsches Asphaltinstitut e.V. 1996.

53. *Müller, W. W.*: Stofftransport in Deponieabdichtungssystemen, Teil 3: Auswirkungen von Fehlstellen in der Dichtungsbahn, ein Überblick. *Bautechnik*, 76(1999), H. 9, S. 757-768.
54. *Van Krevelen, D. W.*: Properties of polymers. Amsterdam: Elsevier 1994.
55. *Nosko, V. und Touze-Foltz, N.*: Geomembrane Liner Failure: Modelling of its Influence on Contaminant Transfer. In: Proceedings of the Second European Geosynthetic Conference. *Cancelli, A., Cazzuffi, D., und Soccodato, C.* (Hrsg.). Bologna: Pàtron Editore 2000.
56. *Müller, W. W. und Seeger, S.*: Requirements for leak monitoring systems for HDPE geomembrane landfill liners. *Land Contamination & Reclamation*, 10(2002), H. 2, S. 91-99.
57. *Dornbusch, J., Averagesch, U. und El Khafif, M.*: Bauverfahrenstechnik und Qualitätsmanagement bei der Herstellung von Kombinationsdichtungen für Deponien. Aachen: Shaker Verlag 1996, 283 Seiten.
58. *Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS)* (Hrsg.): Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien, Fügen von Kunststoffen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1998, 540 Seiten.
59. *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGt)* (Hrsg.): Empfehlungen für die Anwendung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen (EAG-GTD). Berlin: Verlag Ernst & Sohn 2002.
60. *Hein, S., Tarnowski, C. und Knipschild, F. W.*: Stand der Technik und Erfahrungen beim Einbau von Dichtungsbahnen aus PEHD für großflächige Abdichtungen im Bereich des Grundwasserschutzes. In: Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.
61. *Lüders, G.*: Zeitstandschälverhalten von Heizkeilschweißnähten in Zusammenhang mit ihren Schweißparametern. In: Tagungsband der 13. Fachtagung "Die sichere Deponie". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1997.
62. *Lüders, G.*: Qualitätssicherung beim Heizkeilschweißen von Dichtungsbahnen. In: Tagungsband der 17. Fachtagung: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2001.
63. *Lüders, G.*: Praxiserprobung eines Modells zur Bewertung der Qualität von heißkeilgeschweißten Überlappnähten. In: Tagungsband der 15. Fachtagung "Die sichere Deponie". Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1999, S. M1-M20.
64. *Lüders, G.*: Stand der Technik bei maschinellen Heizkeilschweißen von Dichtungsbahnen aus PEHD. In: Tagungsband der 17. Fachtagung: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2002.
65. *Gehde, M. und Tüchert, C.*: Extrusionsschweißen von Dichtungsbahnen aus PEHD. In: Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.
66. *Corbet, S. P. und Peters, M.*: First Germany/USA Geomembrane Workshop. *Geotextiles and Geomembranes*, 14(1996), H. 12, S. 647-726.
67. *Stegmann, R., et al.*: Strategie zum Umgang mit Altdeponien (4515). In: Müll-Handbuch. *Hösel, G., et al.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 2001.
68. *Ehrig, H.-J. und Krümpelbeck, I.*: Abschätzung der Restemissionen von Deponien in der Betriebs- und Nachsorgephase auf der Basis realer Überwachungsdaten. Berlin: Umweltbundesamt, Projektträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung des BMBF 1999.
69. *Engelmann, B.*: Die Umsetzung der EU-Deponierichtlinie in deutsches Recht. In: Tagungsband der 19. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F. W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2003.

70. *Bräcker, W. und Möllenbrand, T.:* Temporäre Oberflächenabdeckung von Siedlungsabfalldeponien. In: Braunschweiger Deponieseminar 1998, Entwicklung im Deponie- und Dichtwandbau. *Rodatz, W.* (Hrsg.). Braunschweig: Technische Universität Braunschweig 1998.
71. *Committee on Intrinsic Remediation, Water Science and Technology Board, Board on Radioactive Waste Management und Commission on Geosciences Environment and Resources* (Hrsg.): Natural attenuation for groundwater remediation. Washington: National Academy of Sciences 2000.
72. *EPA* (Hrsg.): Stress cracking behavior in HDPE geomembranes and its prevention. Cincinnati, USA: Environmental Protection Agency (EPA) 1992.
73. *Hillel, D.:* Fundamentals of soil physics. Orlando, USA: Academic Press, Inc. 1980, S. 273.
74. *Lide, D. R.* (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76th edition. Boca Raton, USA: CRC Press 1996, S. 6-255.
75. *Bear, J.:* Dynamics of fluids in porous media. New York: Dower Publication 1988.
76. *Müller, W. W., Büttgenbach, B., Tatzky-Gerth, R. und August, H.:* Stofftransport in Deponieabdichtungssystemen, Teil 2: Permeation in der Kombinationsdichtung. *Bau-technik*, 74(1997), H. 5, S. 331-344.
77. *Koerner, R. M., Daniel, E. D.:* A suggested methodology for Assessing the technical equivalency of GCLs to CCLs. In: *Gartung, E.* (Hrsg.), *Geokunststoff-Ton-Dichtungen (GTD)*. Nürnberg: Grundbauinstitut der Landesgewerbeanstalt (LGA) 1994, S. 59-85.

Druckfehlerverzeichnis

In der Fußnote 16, muss die letzte Formel heißen:

$$Q_{KDB} \approx \left(50 \cdot 10^{-14} \frac{\text{m}^3(\text{STP}) \cdot \text{m}}{\text{bar} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2} \right) \frac{\Delta P}{d_{KDB}}$$

In der folgenden Zeile ist 10^3 durch 10^2 zu ersetzen.

Fußnote 17 lautet:

17. www.nloe.de

Die Aussagen des Gutachtens bleiben davon unberührt.