

# Dichtungsbahnen zur Abdichtung von Deponien und Altlasten

## 1. Einleitung

Die Fachtagung „Die sichere Deponie“ findet dieses Jahr zum 25sten Mal statt. In jedem Jahr war die Veranstaltung auch ein Forum für die intensive Diskussion der Entwicklung bei den Kunststoffdichtungsbahnen. Hersteller von Kunststoffen und Kunststoffdichtungsbahnen, Verlegefachbetriebe, fremdprüfende Stellen, Zulassungs-, Fach- und Genehmigungsbehörden, Prüf- und universitäre Forschungseinrichtungen, Ingenieurbüros und Baufirmen, Deponiebetreiber und für die Sicherung der Altlasten verantwortliche Stellen haben zunächst in München, Düsseldorf und Mannheim und dann regelmäßig in Würzburg neue Entwicklungen und Beispiele von Baumaßnahmen vorgestellt, zur Kenntnis genommen und darüber gestritten. Mehr als über jedes andere Medium wurde daher über diese unter der Leitung von F.-W. Knipschild tagende und vom SKZ veranstaltete Fachtagung der Stand der Technik bei den Kunststoffdichtungsbahnen definiert und öffentlich verbreitet. Die BAM ist fast von Anfang an in beinahe allen Jahren mit Vorträgen vertreten gewesen – zunächst vor allem durch Dr. Hans August und seit 1992 auch durch den Autor sowie durch weitere Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (G. Lüders, R. Preuschmann, S. Seeger, R. Tatzky-Gerth).

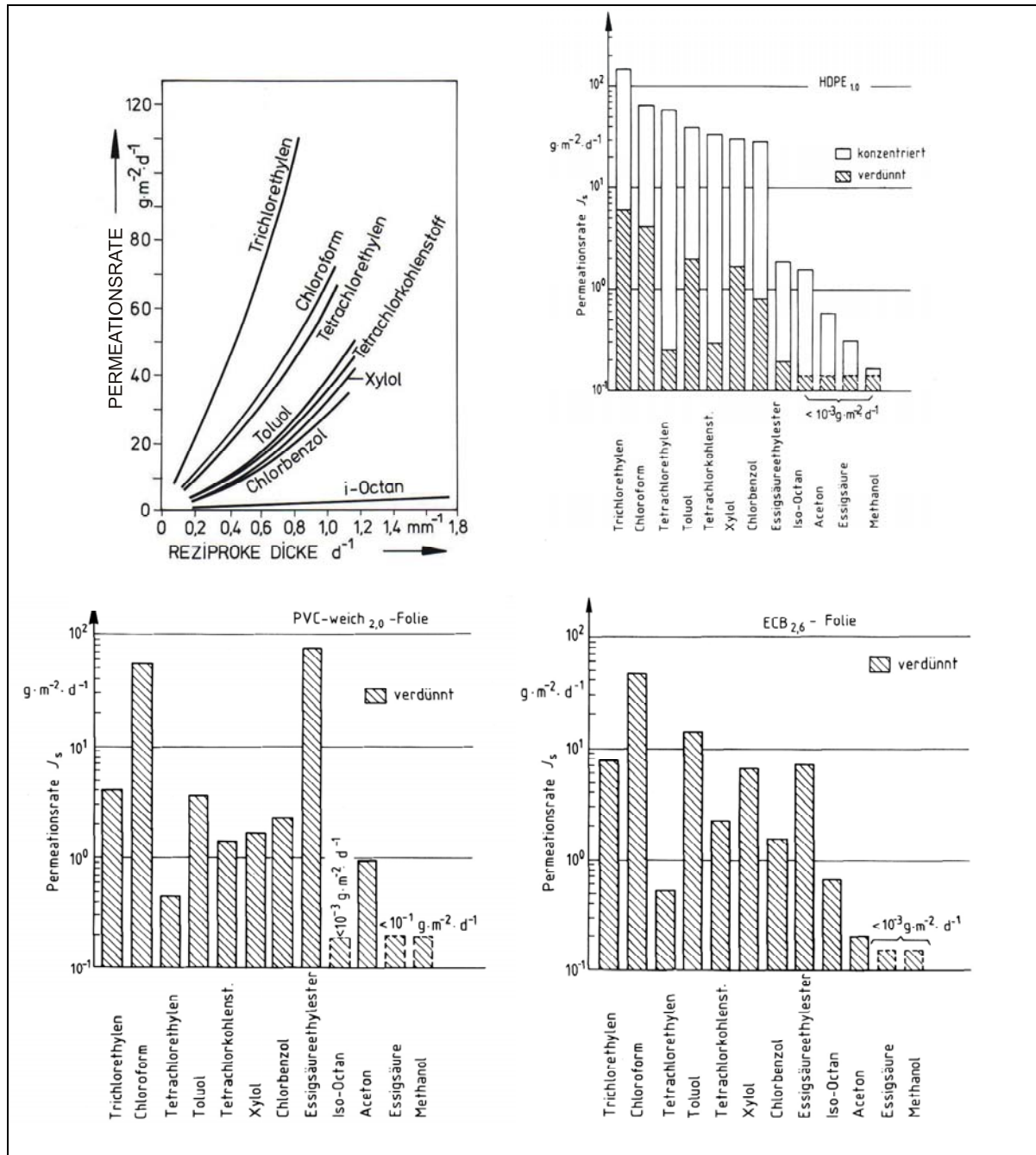
Dieser Aufsatz kann keinen vollständigen Überblick über sein Thema geben. Auch andere Aspekte als die wenigen hier angesprochenen wurden in Würzburg diskutiert. Man denke etwa an die Vielzahl interessanter Bauvorhaben, die vorgestellt wurden. Selbst bei den hier behandelten Fragestellungen werden nicht alle maßgeblichen und schon gar nicht alle relevanten Vorträge angesprochen. Im Folgenden soll vor allem an die Beiträge des ehemaligen Labors „Deponietechnik“ und der heutigen Arbeitsgruppe „Kunststoffe in der Geo- und Umwelttechnik“ der BAM zum Thema Kunststoffdichtungsbahnen in diesen 25 Jahren erinnert werden. Die Darstellung folgt dabei keiner chronologischen, sondern einer thematischen Ordnung. In der Literaturliste sind alle Vorträge von Mitarbeitern der BAM zusammengestellt.

Zweifellos ist es notwendig, dass ein ausgesuchtes polymeres Material mit bestimmten Eigenschaften verwendet und die Kunststoffdichtungsbahnen mit hoher Qualität gefertigt werden, wenn man eine tatsächlich flüssigkeitsdichte und über lange Zeit beständige Abdichtung für eine Deponie oder Altlast errichten will. Erreicht wird dieses Ziel aber nur, wenn erfahrene und qualifizierte Verlegefachbetriebe im Zusammenwirken mit erfahrenen und qualifizierten fremdprüfenden Stellen die Kunststoffdichtungsbahnen auch fachgerecht einbauen.

## 2. Gründerzeit

Obwohl schon vor dem 2. Weltkrieg Polyisobutylen-Folien für Bauwerksabdichtungen eingesetzt worden waren, kamen Kunststoffprodukte im Bauwesen und hier vor allem im Wasserbau erst seit den 1950er Jahren in zunehmendem Maße zur Anwendung. Dabei wurden Erfahrungen bei der Abdichtung von Kanälen, Deichfüßen, Becken, Gerinnen, Tunneln usw. mit unterschiedlichen Kunststofffolien aus „PE-weich“, „PE-hart“, „PVC-weich“, „ECB“ (eine Mischung aus Polyethylen und Bitumen), usw. gesammelt [1]. Die Kunststofffolien waren im Gegensatz zu anderen Baustoffen wasserundurchlässig und relativ einfach zu handhaben und einzubauen. Sie wurden daher auch zur Abdichtung von Deponien eingesetzt, die seit Anfang der 1970er Jahre gefordert wurde. Damals wurde die Grundwasserschutz-Diskussion geprägt durch die spektakulären und schwerwiegenden Grundwasserschäden, die von Industriemüllkippen und Müllkippen mit einem Gemisch aus Hausmüll und Industrieabfällen verursacht worden waren. Eine Vielzahl von Industriechemikalien waren in zum Teil konzentrierter Form abgelagert worden. Zum Beispiel fanden sich in solchen Kippen Fässer, Gebinde und Becken mit flüssigen Kohlenwasserstoffen. Die Beständigkeit der Kunststoffe gegen Chemikalien und die Permeation von konzentriert anstehenden Flüssigkeiten wurde daher bei der Eignungsbeurteilung als besonders wichtig erachtet. Man ahnte, dass schon wenige Beschädigungen beim Einbau und Fehler in den Nähten genügen, um den Vorteil der Kunststoffdichtungsbahnen zu Nichte zu machen, nämlich ein tatsächlich wasserundurchlässiges Abdichtungselement bilden zu können. Man forderte daher eine einfache und sichere Füge-technik und wollte möglichst großflächige Dichtungsbahnen, damit die zu schweißenden Nahtlängen möglichst gering blieben. Dies führte dazu, dass sich die PEHD-Dichtungsbahnen zunehmend am Markt durchsetzten. In den 1980er Jahren vom Umweltbundesamt geförderte Forschungsvorhaben über Deponieabdichtungen und die Regelwerke, die in dieser Zeit entstanden, vor allem die sogenannte NRW-Richtlinie „Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen“, zementierten diese Entwicklung. Die Idee der Kombinationsdichtung wurde geboren [2] und im niedersächsischen Deponieerlass wurde die Forderung nach einer Zulassung der Kunststoffdichtungsbahnen umgesetzt, eine Forderung, die dann auch Eingang in die TA Abfall und später in die TA Siedlungsabfall fand. Das Feld war also schon recht weitgehend abgegrenzt und die weitere Entwicklung vorgezeichnet [3], als 1984 die erste Fachtagung „Grundwasserschutz mit Kunststoffdichtungsbahnen – ein aktueller Beitrag zum Umweltschutz“ stattfand. L. Glück vom SKZ konnte auf der dritten Fachtagung 1986 berichten, dass bis Ende 1985 ca. 7 Millionen m<sup>2</sup> Kunststoffdichtungsbahnen überwiegend aus PEHD im Deponiebereich verlegt worden waren. Die jährlichen Absatzmengen in der BRD der damals größten Produzenten wurde mit ca. 250.000 m<sup>2</sup> für die „Carbofol-CHD-Erdbaubahnen“ der Niederberg-Chemie GmbH, mit 200.000 m<sup>2</sup> für die Hostalen GM

5040 T12 und Vestolen A 3512 R PEHD-Dichtungsbahnen der Omniplast GmbH & Co. KG und mit 200.000 m<sup>2</sup> für die Vestolen A 3512 R PEHD-Dichtungsbahnen der Schlegel Lining Technology GmbH angegeben.



**Abb.1:** Permeationsraten von Kohlenwasserstoffen – konzentriert und aus der wässrigen Lösung – durch eine 1,0 mm dicke PEHD-Dichtungsbahn (oben rechts) sowie die Abhängigkeit von der Dicke der PEHD-Dichtungsbahn (oben links). Zum Vergleich sind die Permeationsraten aus der wässrigen Lösung durch eine 2 mm dicke PVC und eine 2,5 mm dicke ECB Dichtungsbahn angegeben. Die wässrigen Lösungen hatten „ungefähr“ folgende Konzentrationen: Trichlorethylen (0,1 Gew.-%), Chloro-

form (0,08 Gew.-%), Tetrachlorethylen (0,015 Gew.-%), Toluol (0,05 Gew.-%), Tetrachlorkohlenstoff (0,08 Gew.-%), Xylol (0,02 Gew.-%), Chlorbenzol (0,05 Gew.-%), Essigsäureethylester (5 Gew.-%), i-Octan (0,001 Gew.-%), Aceton (5 Gew.-%), Essigsäure (5 Gew.-%), Methanol (5 Gew.-%).

In der deponietechnischen Fachöffentlichkeit wurde vor 25 Jahren jedoch vielfach die Kunststoffdichtungsbahn mit größter Skepsis und nur als ein „Hilfselement von 30 Jahren Lebensdauer“ betrachtet. Inzwischen ist die zugelassene PEHD-Dichtungsbahn anerkannt als das Abdichtungselement, das sich am besten bewährt hat und das insbesondere für die Oberflächenabdichtung zentrale Bedeutung hat [4]. Der heutige Stand der Technik wird ausführlich in [5] oder [6] beschrieben.

### **3. Chemische Beständigkeit und Permeation von organischen Stoffen**

Die BAM hatte schon reichlich Erfahrung bei der Zulassung von Kunststofftanks gesammelt, als sie über ein vom Umweltbundesamt gefördertes Forschungsvorhaben zum ersten Mal mit dem Thema Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen in Berührung kam. Im Februar 1984 wurde ein Forschungsbericht über deren „Permeationsverhalten gegenüber Sickerwasser, organischen Lösungsmitteln und deren wässrigen Lösungen“ vorgelegt [7, 8]. Abb. 1 zeigt einige Ergebnisse. Organische Lösungsmittel lösen sich selbst gut in Kunststoffdichtungsbahnen und diffundieren leicht hindurch, wobei sich bei der PEHD-Dichtungsbahn aufgrund der hohen Kristallinität die geringsten Raten zeigen. Dieses Ergebnis lieferte eines von mehreren Argumenten für einen Verbund von „organophilen“ Kunststoffdichtungsbahnen mit anderen „organophoben“ Erdstoffdichtungen zur sogenannten Kombinationsdichtung, deren Dichtigkeit dann in weiteren Vorhaben untersucht wurde [9]. Die Permeationsraten in den Kunststoffdichtungsbahnen nehmen stark mit dem Quadrat der reziproken Dicken zu. Es sollten daher möglichst dicke Dichtungsbahnen eingesetzt werden. Bei der Erarbeitung der TA-Abfall einigte man sich auf eine Mindestdicke von 2,5 mm. Wobei es inzwischen andere gewichtigere Argumente gibt, die für die Verwendung von PEHD-Dichtungsbahnen solcher Dicke sprechen.

In den Versuchen zeigte sich, dass bei anderen Kunststoffdichtungsbahnen als den PEHD-Dichtungsbahnen starke und irreversible Schädigungen auftraten. Aber auch PEHD-Dichtungsbahnen quellen unter der Einwirkung von Lösungsmitteln. Der Vorgang ist jedoch reversibel. In gewissem Umfang werden Stabilisatoren extrahiert, so dass sich die Oxidationsbeständigkeit verschlechtert. Diese Ergebnisse zur Lösungsmittelpermeation sind für die

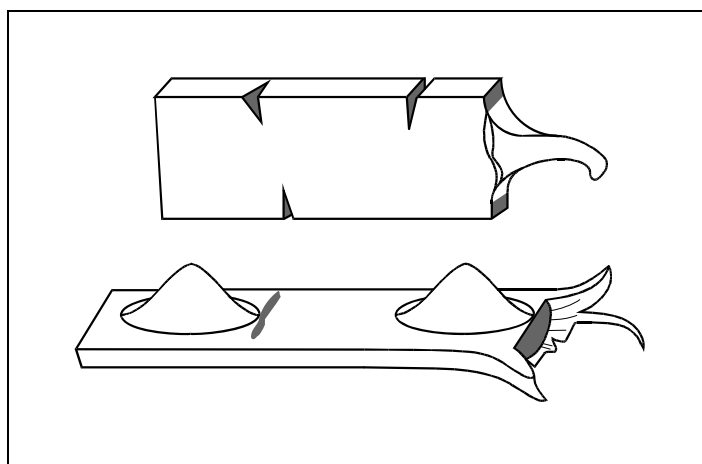
Oberflächenabdichtung oder auch die Basisabdichtung heutiger Deponien nicht mehr relevant, wohl aber für den Einsatz von PEHD-Dichtungsbahnen zur Abdichtung von Anlagen in denen mit organischen Lösungsmitteln in hoher Konzentration gearbeitet wird. Wenn die Lösungsmittel-Beanspruchung lange genug bei erhöhter Temperatur stattfindet, kann es zu starken Wellen in der PEHD-Dichtungsbahn und zu Aufwölbungen in den PEHD-Betonschutzplatten kommen. Dabei können Beschädigungen der Verankerungen und der Schweißnähte auftreten und Spannungsrisse im Bereich der Schweißnähte ausgelöst werden. Selbst PEHD-Dichtungsbahnen finden hier ihre Anwendungsgrenze.

#### **4. „Pressverbund“ und Dichtungsbahnen mit strukturierter Oberfläche**

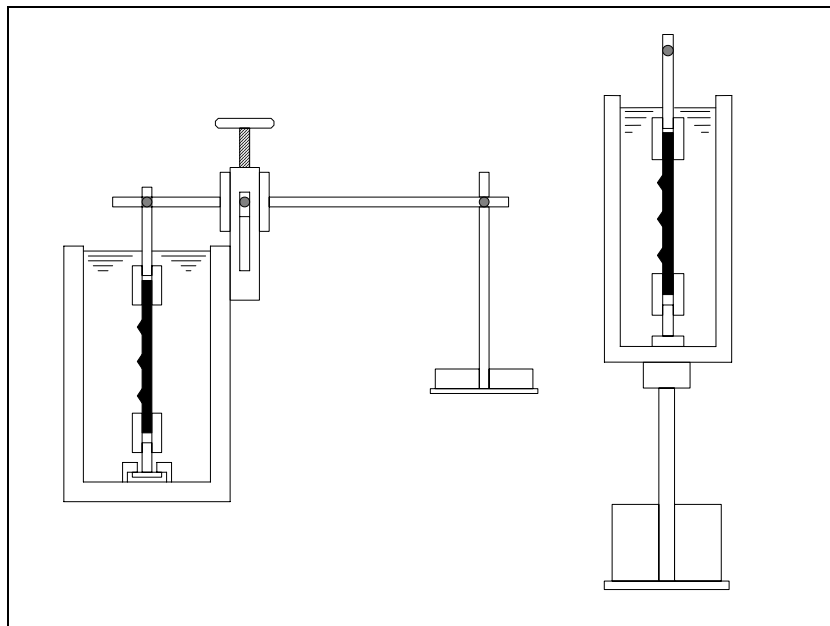
Am 30. August 1989 war die erste Zulassung einer PEHD-Dichtungsbahn für die Deponieabdichtung auf der rechtlichen Grundlage des Niedersächsischen Dichtungserlasses von der BAM erteilt worden [10, 11]. Im Juli 1992 erschien dann die von der BAM im Zusammenwirken mit einem Fachbeirat erarbeitete „Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten“. In einem Abschnitt über „Bestimmungen und Auflagen für den Einbau der Kunststoffdichtungsbahnen als Teil der Kombinationsdichtung“ und einem zugehörigen Erläuterungsteil wurden ausführlich die „Philosophie“ des Baus von Kombinationsdichtungen mit Dichtungsbahnen dargelegt. Die Anforderungen an die Beschaffenheit der Oberfläche der mineralischen Dichtung und die Verfahren der „wellenfreien“ Verlegung und damit die Herstellung des „Pressverbundes“ wurden zum Gegenstand kontroverser Diskussionen.

Es ist erstaunlich, wie weit manche der Fachdiskussionen auf diesen Tagungen den internationalen Diskussionen, wie sie z. B. in den Fachzeitschriften der Internationalen Geokunststoff Gesellschaft (IGS) geführt werden, vorausgeeilt sind. Das Problem „Glattlage“ und „Pressverbund“ wird dort erst seit einigen Jahren thematisiert (ein aktuelles Beispiel: [12]). Es ist schade, dass die Tagungsbände keine ISBN-Nummer haben, weil sie dadurch nur schwer zugänglich sind, und die Tagungsbeiträge in den seltensten Fällen zu Veröffentlichungen auch in englischer Sprache geführt haben.

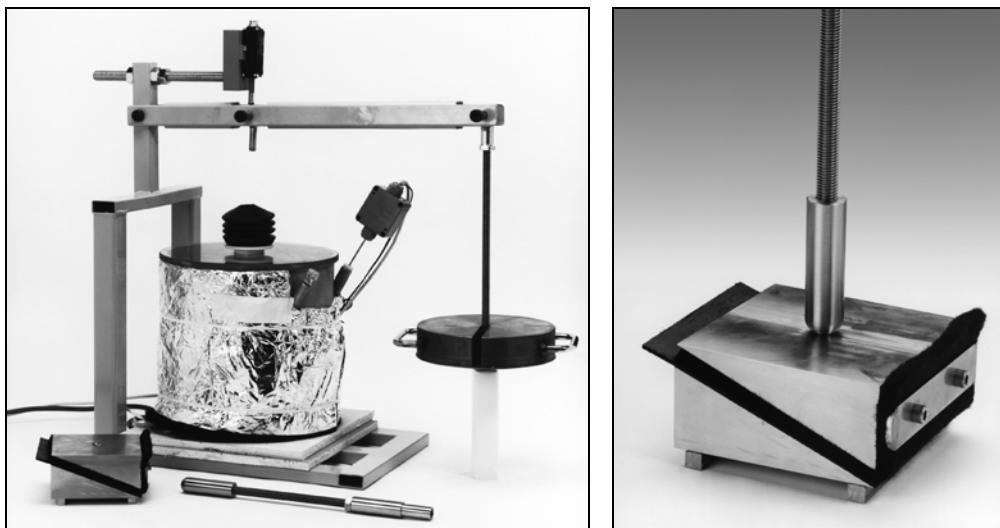
Fachlich stützte sich die Bewertung der Kunststoffdichtungsbahnen bei den ersten Zulassungen weitgehend auf die Anforderungen der NRW-Richtlinie und auf Prüfverfahren und Bewertungskriterien ab, die in den ersten Fachtagungen bereits vorgestellt worden waren. Als neues kunststofftechnisches Thema ergab sich in dieser Zeit die Bewertung des Langzeitverhaltens von strukturierten Dichtungsbahnen. Die Gleitsicherheit einer Kombinationsdichtung erfordert eine genügend hohe Reibung zwischen Kunststoffdichtungsbahn und mineralischer Dichtung sowie zwischen Dichtungsbahn und Schutzschicht. Um diese zu erreichen, kann die Oberfläche der Dichtungsbahn mit unterschiedlichen Verfahren strukturiert werden. Eine Oberflächenstruktur kann bereits bei der Herstellung über die Walzen eingeprägt werden. Es können jedoch auch nachträglich Strukturpartikel aufgebracht werden. In welchem Ausmaß führen Strukturelemente zu lokalen Spannungskonzentrationen und Kerben, die zum Ausgangspunkt der Spannungsrissbildung werden (Abb. 2)? Welche Haftung wird bei den Strukturpartikeln erreicht? Von der BAM wurde mit dem Zeitstand-Zugversuch an Probekörpern aus strukturierten Dichtungsbahnen (Abb. 3) und dem Zeitstand-Scherversuch (Abb. 4) Prüfverfahren entwickelt, mit denen diese Fragen beantwortet werden konnten.



**Abb. 2:** Schematische Darstellung der Schadensbilder von Zugstäben aus der glatten Dichtungsbahn (oben) und einer strukturierter Dichtungsbahn (unten) nach einer Prüfung im Zeitstand-Zugversuch. Bei der glatten Dichtungsbahn wachsen Spannungsrisse vom Rand her – ausgehend von Bearbeitungsspuren aus der Probenvorbereitung – bis der Materialquerschnitt so stark verringert ist, dass es zum Verstrecken und Reißen kommt. Bei strukturierter Dichtungsbahnen entstehen Spannungsrisse an charakteristischen Schwachstellen in der Strukturausbildung [5].



**Abb. 3:** Schematische Darstellung von Prüfeinrichtungen für den Zeitstand-Zugversuch. Gezeigt werden das Prüfgefäß, die Probe mit Probeneinspannung und zwei verschiedene Arten, wie die Zugspannung aufgebracht wird. Bei der Prüfeinrichtung links wird das Prüfgefäß mit einer geregelten Heizung temperiert. Die Prüfeinrichtung rechts kann z. B. in einen Wärmeschrank gehängt werden [5].



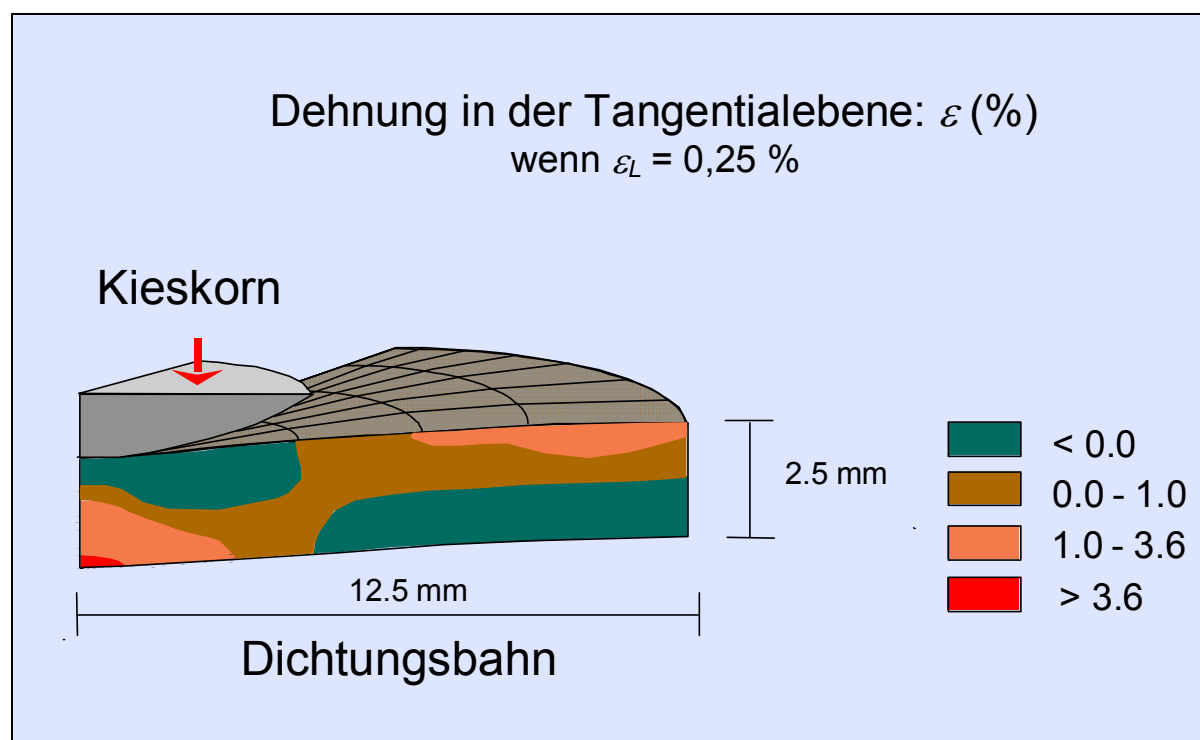
**Abb. 4:** Prüfeinrichtung für den Zeitstand-Scherversuch mit allen Komponenten (links). Vorrichtung zum Einspannen der Probekörper (rechts). Der obere Keil wird allein durch die Reibungskraft hier zwischen Dichtungsbahn auf dem unteren Keil und Vliesstoff auf der Unterseite des oberen Keils gehalten.

## 5. Schutz von Dichtungsbahnen

1989 wurde von G. Heerten zum ersten Mal über das Thema Schutz von Dichtungsbahnen gesprochen, das danach die Fachtagungen immer wieder beschäftigte. Kieskörner können unter hoher Auflast ungeschützte Dichtungsbahnen perforieren oder zumindest die Oberfläche stark beschädigen. Schon in diesem Vortrag wurden Ergebnisse von Lastplatten-Druckversuchen vorgestellt und Überlegungen zu zulässigen Dehnungen und erforderlichen Flächenmassen von schützenden Vliesstoffen angestellt. Im Rahmen eines Workshops wurden im folgenden Jahr dann der Lastplatten-Druckversuch als Prüfverfahren für Schutzschichten festgelegt und Bewertungskriterien angegeben: In der Oberfläche der Dichtungsbahn dürfen nach der Prüfung keine Beschädigungen vorhanden sein und die Ausdehnung der Fläche der Dichtungsbahn, die mit einer Eindellungen verbunden ist (Flächendehnung oder Wölbogendehnung), sollte 0,25 %, also ungefähr die Obergrenze für noch elastisches Verformungsverhalten, nicht übersteigen. Wenn die über lange Zeit zulässige Grenzdehnung für Spannungsrisssbildung einer PEHD Dichtungsbahn aber 3-6 % beträgt, so wurde bald argumentiert, warum sich auf eine so minimale zulässige Dehnung von 0,25 % beschränken, ein Kriterium, das Vliesstoffmassen von bis zu 3000 g/m<sup>2</sup> oder Sandschutzschichten erforderlich macht, um vor dem grobem 16/32 Kies zu schützen?

Tatsächlich ist die mit einer Eindellung verbundene Vergrößerung der Fläche der Dichtungsbahn nicht das einzige Dehnungsmaß. Entlang des Konturverlaufs der Delle treten Biegungen auf und damit in den äußeren und inneren Randfasern Stauchungen und Dehnungen  $\epsilon$ , die – abhängig vom Krümmungsradius – wesentlich größer als die Flächendehnung  $\epsilon_L$  sein können. Bei den Dellen, die ein 16/32 Rundkies über einer Schutzschicht in der Dichtungsbahn erzeugt, ist die Flächendehnung (oder Wölbogendehnung) von 0,25 % tatsächlich verbunden mit lokalen Randfaserdehnungen von 3-4 % (Abb. 5.). Wenn man Spannungsrisssbildung vermeiden will, muss man die lokalen, in der Oberfläche wirkenden Spannungen begrenzen, die für die Rissinitiierung verantwortlich sind. Man muss, streng genommen, die Krümmungsradien entlang der Konturlinie der Dellen ermitteln und daraus die Randfaserdehnungen bestimmen, für die dann tatsächlich die Grenzdehnung als noch zulässiger Wert angesetzt werden kann. Beschränkt man sich jedoch auf die messtechnisch einfach zu ermittelnde Flächendehnung (Verhältnis von Oberfläche der Kugelkalotte, die zur Delle passt, zur Basisfläche minus 1), dann muss die in der Tat sehr klein sein, damit die Randfaserdehnungen (ungefähr Dicke der Dichtungsbahn dividiert durch doppelten Radius der Kalotte) nicht zu groß werden. Die BAM hat versucht, diese Zusammenhänge zu erklären und ihr Festhalten an dem „0,25 % Kriterium“ zu begründen [13].





**Abb. 5:** Verformungszustand in einer Kunststoffdichtungsbahn, nachdem durch Eindrücken eines Stempels mit einem vorgegebenen Stempelweg von ca. 0,77 mm bei einer lateralen Ausdehnung der Delle von ca. 25 mm eine für die Körnung 16/32 mm typische Eindellung mit einer rechnerischen Wölbogendehnung von 0,25 % entstanden ist. Die Stempelform simuliert hier die durch eine Schutzlage vergrößerte Aufstandsfläche eines Kieskorns auf der Kunststoffdichtungsbahn.

Eine solche Fachtagung ist natürlich immer wieder auch ein „Jahrmarkt der Eitelkeiten“. Unvermeidliche gefühlsmäßige Regungen wie Abneigungen, Konkurrenz, Rechthaberei, sowie berechnete wirtschaftliche Interessen behindern das Bemühen um einen gemeinsamen Standpunkt nicht weniger als die Schwierigkeiten des eigentlichen technischen Sachverhalts. Schwierige Probleme müssen immer wieder neu durchgearbeitet werden. Dann kann sich eine rationale Einschätzung Bahn verschaffen. Die strengen Anforderungen der BAM an die Schutzschichten, deren Wirksamkeit und Haltbarkeit, hat letztlich auch zur Entwicklung der ausrollbaren, mit Sand gefüllten Geotextilmatten geführt, die sicher eine große technische Bereicherung für den Deponiebau darstellen. Interessanterweise wird in der internationalen Fachdiskussion das Thema lokale Verformungen von Dichtungsbahnen jetzt aufgenommen und die großen Randfaserdehnungen diskutiert, die mit relativ unscheinbaren Dellen verbunden sein können [14, 15].

## 6. Alterung und Spannungsrisssbeständigkeit, „Gleichwertigkeit“

1993 trat die TA Siedlungsabfall in Kraft. Die Kombinationsdichtung war Regelabdichtung geworden. Nur zur Kombinationsdichtung gleichwertige Dichtungen durften noch eingebaut werden. Damit begann die Gleichwertigkeitsdiskussion [16]. Wie „operationalisiert“ man den Begriff „Gleichwertigkeit“, der in der TA Siedlungsabfall genannt wird [17, 18]? Die Asphaltindustrie drängte auf den Deponiemarkt. Die Asphaltbetondichtung sollte auch in Deutschland als zur Kunststoffdichtungsbahn gleichwertige „Konvektionssperre“ eingeführt werden. Etwa zur selben Zeit wurde auch intensiver über Oberflächenabdichtungen und damit auch über die Gleichwertigkeit von Bentonitmatten zur herkömmlichen mineralischen Abdichtung diskutiert. Auch die Frage, welche Rolle können die Dichtungskontrollsysteme spielen, können sie z. B. in der Oberfläche Abdichtungselemente ersetzen, und welche Anforderungen müssen gestellt werden, wurde zum Thema der Fachtagung [19-21].

In dieser Diskussion kam auch die Kombinationsdichtung erneut auf den Prüfstand. Wie dicht ist die Kombinationsdichtung [22]? Trocknen die mineralischen Dichtungen aus und verlieren sie so ihre Funktionstüchtigkeit? Diese Fragestellung aber auch kunststofftechnische Themen, wie geotextile Schutzlagen für Kunststoffdichtungsbahnen, deren Reibungs- und Verformungsverhalten, Leckerkennung und die Bauverfahrenstechnik und Qualitätssicherung bei der Herstellung von Kombinationsdichtungen, waren in einem Verbundforschungsvorhaben zur Weiterentwicklung von Deponieabdichtungen bearbeitet worden [23].

Vor allem aber wurde die Frage diskutiert: wie lange halten die zugelassenen Kunststoffdichtungsbahnen. Stand anfangs vor allem die chemische Beständigkeit der Dichtungsbahnen im Vordergrund, so ging es jetzt um die Alterung der PEHD-Dichtungsbahnen und die Lebensdauer, die sie haben. Die beiden wesentlichen Alterungsmechanismen sind die Oxidation und natürlich die Spannungsrisssbildung. Die oxidative Alterung der PEHD-Dichtungsbahnen wurde an der BAM sehr gründlich untersucht. Ausgehend von der Prüfmethodeentwicklung für PEHD-Rohre im Forschungslabor der Hoechst AG wurde in den USA der NCTL-Test entwickelt und eingeführt, mit dem direkt die Spannungsrisssbeständigkeit von Dichtungsbahnen gemessen werden kann. Diese Entwicklungen veränderten auch die Zulassungsanforderungen. 1999 erschien eine überarbeitete Fassung der Zulassungsrichtlinie „Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Abdichtung von Deponien und Altlasten“ [24]. Ausdrücklich wurde kein Bezug mehr auf die Kombinationsdichtung genommen, da für Oberflächen schon damals andere Dichtungsvarianten mit Kunststoffdichtungsbahnen als durchaus zweckmäßig erkannt wurden [25].

Wenn sie nicht schon durch den Einbau verursacht worden sind, dann werden später auftretende Schäden an PEHD-Dichtungsbahnen praktisch immer auf die Spannungsrisssbildung zurückgeführt werden können, unter Umständen in Verbindung mit einer oberflächennahen Versprödung. Die Spannungsrisssbildung ist der bedrohlichste potentielle Schadensmechanismus [26]. Er kann vermieden werden, wenn:

erstens, nur PEHD-Materialien mit hoher Spannungsrisssbeständigkeit verwendet werden. (In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass die DIBt-Zulassung keine eigentliche Spannungsrisssprüfung an der Dichtungsbahn (NCTL-Test) vorsieht und auch keine eigentliche Untersuchung der langfristigen oxidativen Beständigkeit, bei der das Verhalten des Stabilisatorsystems betrachtet wird. Strukturierte Dichtungsbahnen werden gar nicht speziell geprüft. Dies sollte beim Vergleich von DIBt-zugelassenen Dichtungsbahnen mit BAM-zugelassenen Dichtungsbahnen im Deponiebereich beachtet werden),

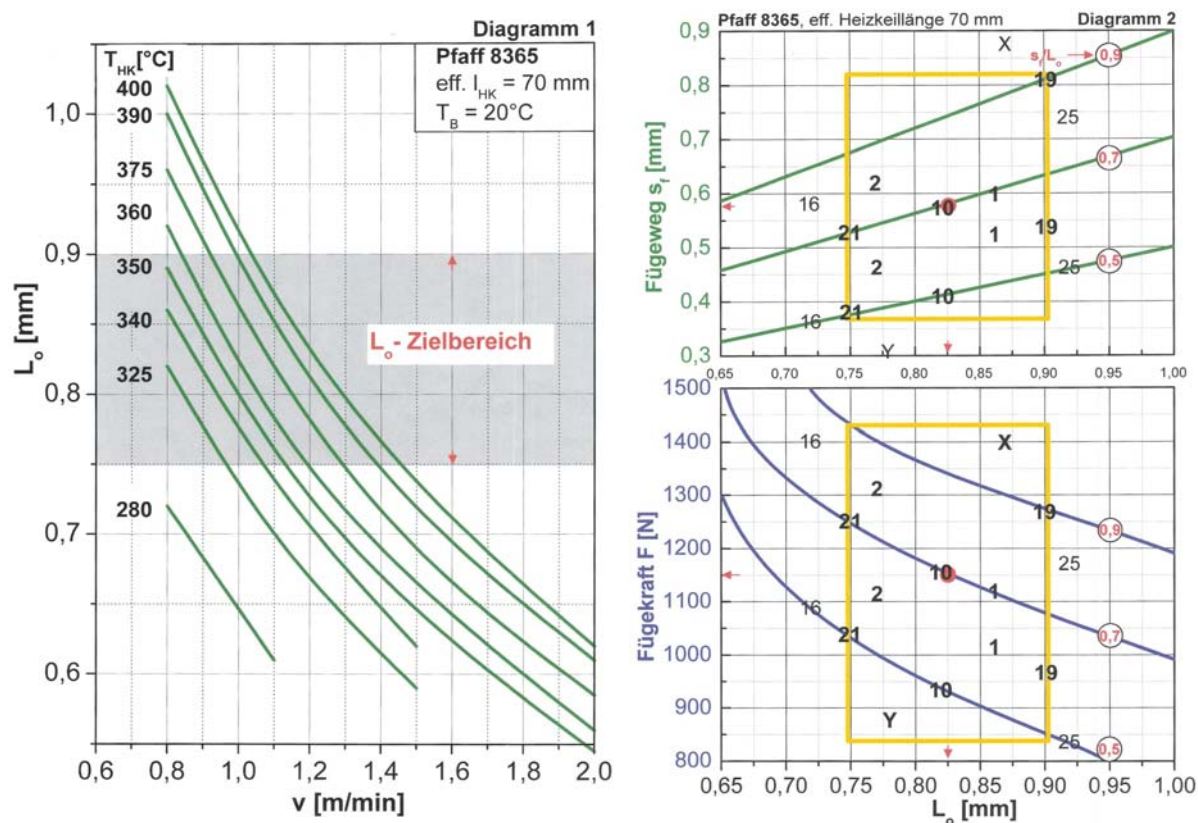
zweitens, die Schweißnähte fachgerecht ausgeführt werden. (Auf alle Fälle muss hier vermieden werden, dass Kerben oder Riefen, also Ausgangspunkte für eine Rissinitiierung, entlang von Querschnittsveränderungen verlaufen, wo Spannungskonzentrationen vorhanden sind), schließlich,

drittens, die Dichtungsbahn keiner mehr oder weniger dauerhaft wirkenden Zugspannung ausgesetzt wird, sei es durch große Verformungen über Setzungen, Wellen, Eindrücke, sei es durch Hangabtriebskräfte, Windsog, starke Temperaturschwankungen usw. (Es gilt der Grundsatz, dass die lokalen Randfaserdehnungen 3% und die Dehnungen durch großflächige Setzungen 3 bzw. 6 % nicht übersteigen dürfen und die Dichtungsbahnen möglichst bald überbaut werden müssen.)

## **7. Bewertung von Schweißnähten**

Wie bei jeder aus Elementen gefügten großflächigen Abdichtung sind es die Fügenähte wo am ehesten Einbaufehler gemacht werden, so auch bei der Kunststoffdichtungsbahn. Zwar werden über 2/3 aller Fehlstellen erst nach dem Schweißen durch den Einbau der weiteren Schichten verursacht. Von dem Drittel während des Verlegens entstehender Fehlstellen sind jedoch wiederum 60-90 % unerkannte Fehler an Schweißnähten. Aus der Nahtvorbereitung dürfen keine Riefen und Kerben zurückbleiben, die Geometrie und äußere Beschaffenheit der Naht muss den Anforderungen entsprechen und im Fügebereich selbst muss ein möglichst gleichmäßiger homogener Materialverbund entstanden sein. Inwieweit dieses letztgenannte Ziel erreicht wurde, zeigt sich am besten im Zeitstand-Schälversuch, nämlich an den in diesem Versuch erreichten Standzeiten und der Beschaffenheit der Bruchspiegel. Von G.

Lüders wurde angegeben, wie die Schweißparameter (Geschwindigkeit, Anpresskraft und Temperatur) einer bestimmten Heizkeilschweißmaschine gewählt werden müssen, damit hier ein optimales Ergebnis erzielt wird. Das Schweißen von Kunststoffdichtungsbahnen war natürlich immer wieder ein Thema der Fachtagung. Das Lüder'sche Prozessmodell für das Heizkeilschweißen wurde in mehreren Vorträgen in Würzburg vorgestellt [27-29].



**Abb. 6:** Nommogramme für die Heizkeilschweißmaschine Pfaff 8365 mit einer effektiven Heizkeillänge  $I_{HK} = 70$  mm. Bei einer Bahntemperatur  $T_B = 20$  °C kann für die Heizkeiltemperatur  $T_{HK}$  und die Schweißgeschwindigkeit  $v$  die Schmelzeschichtdicke  $L_0$  im Diagramm 1 abgelesen und überprüft werden, ob der Wert im Zielbereich liegt. Bei abweichender Bahntemperatur muss  $L_0$  korrigiert werden und zwar pro  $\pm 10$  °C um  $\pm 0,025$  mm. Der korrigierte Wert muss im Zielbereich liegen. Mit dem so bestimmten  $L_0$  kann für die gewählte Fügekraft und den gemessenen Fügeweg bestimmt werden, ob man im zulässigen Schweißfenster (gelber Rahmen) liegt (rechtes Nomogramm). Die Zahlen im rechten Diagramm illustrieren Werte aus der Tabelle, die den Nomogrammen zu Grunde liegt. (Abweichungen in  $I_{HK}$ , also der Kontaktlänge mit der die Bahn den Heizkeils direkt berührt, können gemäß  $\Delta L_0 = \pm 0,06$  mm pro  $\pm 10$  mm eff.  $I_{HK}$  korrigiert werden).

Nicht allein der Fügeweg  $s_f$  entscheidet über ein gutes Schweißergebnis, sondern auch die Schmelzeschichtdicke  $L_0$ , also die Masse geschmolzenen Materials die im Fügeprozess entsteht. Lange Standzeiten im Zeitstand-Schälversuch werden dann erreicht, wenn der Fügeweg zwischen 0,4 und 0,8 mm und gleichzeitig die Schmelzeschichtdicke, die rechnerisch sich aus den Schweißparametern und Schweißbedingungen ergibt, im Bereich zwischen 0,75 und 0,9 mm liegt. Auf der Grundlage des Modells kann angegeben werden, wie die Schweißparameter bei gegebenen Bedingungen (Schmelztemperatur des Materials, Temperatur der Dichtungsbahn, effektive Heizkeillänge) zu wählen sind, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Für die Schweißmaschinen wurden jeweils Tabellen bzw. Nomogramme erarbeitet, anhand derer überprüft werden kann, ob die gewählten Schweißparameter „zusammenpassen“ und im zulässigen „Schweißfenster“ liegen (Abb. 6).

Schweißparameter werden auf der Baustelle aufgrund der Erfahrungen eingestellt und in Kurzzeit-Schälversuchen und durch Messung der Nahtgeometrie das Ergebnis überprüft. So ermittelte Parameter entsprechen in der Regel einer nach den Nomogrammen zulässigen Wahl, wie G. Lüders in einem gemeinsamen Vorhaben mit dem AK GWS zeigen konnte. Es gab jedoch auch wenige Fälle, wo die gewählten Parameter aus dem Fenster heraus fielen. Es erfolgte dann scheinbar ein nach der DVS 2225-4 anforderungsgerechtes Schweißen, obwohl die Nähte wegen spezifischer unerkannter handwerklicher oder maschinentechnischer Fehler nicht optimal waren. Es lohnt sich daher, die Nomogramme wenigstens für eine Überprüfung heranzuziehen, ob die Schweißparameterwahl tatsächlich „stimmig“ ist.

## **8. Güteüberwachung von Verlegefachbetrieben**

Die Wirksamkeit und Langlebigkeit einer fertigen Kunststoffabdichtung hängt wesentlich vom fachgerechten Einbau durch eine erfahrene, ausreichend mit qualifiziertem Personal, Maschinen und Geräten ausgestatteten Fachfirma ab, soviel ist schon aus den vorausgegangenen Bemerkungen deutlich geworden. Zunächst wurde die Zulassung sogar so aufgefasst, dass nicht die Kunststoffdichtungsbahn, sondern das fertige Abdichtungselement Gegenstand der Zulassung sei. Die Verlegefachbetriebe wurden in die Zulassung miteinbezogen. Die Verantwortung für die Auswahl geeigneter Firmen lag bei den Dichtungsbahnenherstellern. Es zeigte sich jedoch bald, dass die BAM nicht die Voraussetzungen hatte, um auch die Fachverlegebetriebe angemessen bewerten zu können und die Dichtungsbahnenhersteller hatten bei der Auswahl primär kaufmännische Gesichtspunkte im Auge. Hatte irgendein Verlegebetrieb einen Auftrag in Aussicht, so wollte ein Dichtungsbahnenhersteller ihn auch gleich in den Zulassungsschein mit aufgenommen haben. Es ergaben sich so bedenkliche

Wettbewerbsverzerrungen. Das Problem löste sich dann 1997 mit dem Aufbau einer Güteüberwachung auf der Grundlage einer Richtlinie der BAM für Verlegefachbetriebe durch den neu organisierten Fachverband der Dichtungsbahnenhersteller und Verlegefachbetriebe AK GWS e. V. (Abb. 7). Im Auftrag des Überwachungsausschusses wird ein Mitarbeiter der BAM als Auditor tätig. Grundlage ist letztlich jedoch die Selbstverpflichtung der teilnehmenden Firmen bestimmte fachliche und technische Voraussetzungen zu gewährleisten und die Überwachungsordnung einzuhalten. Auch diese Vorgehensweise hat international Nachahmer gefunden (Abb. 8). Inzwischen gibt es einen zweiten Fachverband AGAS e.V. für dessen Überwachungsausschuss der Mitarbeiter der BAM ebenfalls als Auditor tätig wird (Abb. 7).

Jedes Jahr erfolgen eine Betriebsprüfung und eine Prüfung auf einer Baustelle durch den Auditor im Beisein des Vorsitzenden des Überwachungsausschusses. Im Deponiebereich hat sich damit ein sehr hohes „verlegetechnisches“ Niveau etabliert. Dem ist sicherlich auch geschuldet, dass die Kunststoffdichtungsbahn als Abdichtungselement der Wahl inzwischen hohes Ansehen in der „Deponiebranche“ genießt.



**Abb. 7:** Die Überwachungszeichen des Arbeitskreises Grundwasserschutz (AK GWS) e.V., und der Arbeitsgemeinschaft Abdichtungssysteme (AGAS) e.V., zweier Fachverbände von Dichtungsbahnherstellern und Verlegefachbetrieben. Ein Fachbetrieb darf dieses Überwachungszeichen tragen, wenn er der Güteüberwachungsgemeinschaft angehört, die Anforderungen der Überwachungsordnung erfüllt und dies in regelmäßigen Überprüfungen nachweist.



**Abb. 8:** Das Überwachungszeichen des Güteüberwachungsprogramms der International Association of Geosynthetic Installers (IAGI).

## 9. Liste fremdprüfender Stellen

Auch wenn alle Voraussetzungen für einen einwandfreien Einbau der Kunststoffdichtungsbahnen gegeben sind, garantiert erst die Kontrolle durch einen unabhängigen und fachkundigen Fremdprüfer in Zusammenarbeit mit der Überwachungsbehörde, dass dies auch tatsächlich geschieht. Fremdprüfer haben in den 1980er und Anfang der 1990er Jahre eine große Rolle in der technischen Entwicklung gespielt. Man denke etwa an die Einführung der „Riegelbauweise“ durch R. Schicketanz, mit der gezeigt wurde, dass ein wellenfreier Einbau der Dichtungsbahnen möglich ist (Abb. 9). F.-W. Knipschild, der die Fachtagungen in all den Jahren geleitet hat, verkörpert sozusagen Fremdprüfer-„Urgestein“. Es begannen sich dann jedoch viele Ingenieurbüros um Aufträge in diesem Bereich zu bemühen, die nicht die fachlichen Voraussetzungen hatten. Vom Fachbeirat für die Zulassung der BAM wurde daher eine Richtlinie über die Anforderungen an fremdprüfende Stellen erarbeitet. Die fremdprüfenden Stellen müssen danach für ihre Inspektionstätigkeit nach der Inspektionsstellennorm DIN EN ISO 17020 akkreditiert sein. Sie müssen über ein kunststofftechnisches Labor verfügen, das über eine Akkreditierung nach der Prüflabornorm DIN EN ISO 17025 nachgewiesen hat, dass die erforderlichen Prüfungen tatsächlich normgerecht durchgeführt werden können. Die Akkreditierung wird durch einen Gutachter des Deutschen Akkreditierungssystems Prüfwesen (DAP) durchgeführt. Stellen, die diese Anforderungen erfüllen, werden von der BAM in eine Liste eingetragen.

Auf der letzten Fachtagung wurde vom Autor über die Probleme im Bereich der Fremdprüfung auf der Deponiebaustelle ausführlich referiert. Darauf sei hier verwiesen [31]. Der Fachverband AK GWS und die dort organisierten Fremdprüfer sind aktiv geworden. Um ein einheitliches hohes technisches Niveau der Fremdprüfung sicherzustellen, sollen jetzt Art und Umfang der erforderlichen Inspektionsanweisungen detaillierter vorgegeben werden und die Leistungsfähigkeit der Labors durch Ringversuche überprüft werden. Diese Aktivitäten ermöglichen der BAM eine entsprechende Fortschreibung der Richtlinie.

## 10. Ausblick

Die Zulassung der Kunststoffdichtungsbahn, die Güteüberwachung der Verlegefachbetriebe, die Akkreditierung der fremdprüfenden Stellen und ihrer Labore: das Zusammenwirken dieser Verfahren soll sicherstellen, dass das Kunststoffabdichtungselement in der Deponie mit hoher Wirksamkeit über Jahrhunderte funktioniert. Der Grund für diesen Regelungsaufwand besteht darin, dass Schäden in Deponieabdichtung zumeist erst nach einer längeren Zeit der Schadensakkumulation erkannt werden, dabei erhebliches Ausmaß annehmen können und nur mit großem Aufwand reparierbar sind. Eine Gewährleistung besteht wegen der langen Zeiträume praktisch nicht. Abdichtungen müssen also von vornherein einwandfrei gebaut werden.







**Abb. 9:** Mit der Riegelbauweise können Dichtungsbahnen im Winter und Sommer wellenfrei verlegt werden [30].

Dieses System hat sich letztlich aus den praktischen Erfahrungen heraus entwickelt, wie sie auf den Fachtagungen auch immer wieder dokumentiert worden sind. Nur dem in diesem Gebiet nicht bewanderten Laien erscheinen der Aufwand und die Kosten des Systems als zu groß. Wo Fachkunde und Überblick fehlt, wird dann immer wieder versucht zu sparen: bei der Dichtungsbahn (z. B. „BAM-Rohstoff“ aber keine „BAM-Dichtungsbahn“, zur „BAM-Dichtungsbahn“ angeblich gleichwertige Dichtungsbahn mit geringerer Dicke usw.), bei der Auswahl des Verlegefachbetriebs oder beim Umfang der Fremdprüfung. Soll ein technisch anspruchsvolles Bauwerk errichtet werden, dann lohnen sich solche „Tricksereien“ bei der Interpretation des Standes der Technik für den Geldgeber letztlich aber nicht.

Die neue Deponieverordnung, die jetzt wohl im Sommer in Kraft treten wird, bestätigt den erreichten Stand der Technik. Die BAM wird ausdrücklich als Zulassungsstelle für Geokunststoffe und Dichtungskontrollsysteme benannt. Ein Fachbeirat begleitet die Zulassungstätigkeit. Es kommt also einige Arbeit auf die BAM zu: Der Fachbeirat muss neu konstituiert werden und eine der erweiterten Aufgabenstellung angemessene Zusammensetzung und Organisationsstruktur bekommen. Die Zulassungsrichtlinie für die Dichtungsbahnen muss in einigen Punkten aktualisiert, und, wo möglich, auch vereinfacht werden. Die Richtlinien über die Anforderungen an die Verlegefachbetriebe und die fremdprüfenden Stellen müssen nach

Maßgabe der gemachten Erfahrungen verbessert und verfeinert werden. Die Empfehlung über Anforderungen an Dichtungskontrollsysteme und die Prüfrichtlinie für die Kunststoff-Dränelemente [32-34] müssen überarbeitet und aktualisiert werden und als Zulassungsrichtlinien neu herausgegeben werden. Hierbei wird es sicherlich auch um die Überprüfung und Weiterentwicklung des Standes der Technik gehen, also um die Auswertung der Erfahrungen, die mit den begutachteten Produkten gemacht wurden, und der wissenschaftlichen Erkenntnisse, die in den letzten Jahren gesammelt wurden [35, 36]. Die Eignungsgutachten müssen in Zulassungen umgewandelt werden, was zumindest die sorgfältige Überprüfung erforderlich macht, ob die Produkte tatsächlich noch in allen Einzelheiten den ursprünglich begutachteten Produkten entsprechen. Schließlich wird neu das Thema der Anwendung von Geogittern im Deponiebau zu behandeln sein. Genügend Stoff also, um auf den zukünftigen Fachtagungen mit dem einen oder anderen Vortrag weiterhin vertreten sein zu können.

## 11. Literatur

1. *Zitscher, F.-F.*: Kunststoffe für den Wasserbau. Berlin: Verlag Ernst und Sohn 1971.
2. *Stief, K.*: Anforderungen an die Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen. In: Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen, Müll und Abfall, Beiheft 22. *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Berlin: Erich Schmidt Verlag 1985, S. 9-12.
3. *Knipschild, F.W.* (Hrsg.): Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen, Müll und Abfall, Beiheft 22. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1985.
4. *Ramke, H.-G., Witt, K.-J., Bräcker, W. und Tiedt, M.* (Hrsg.): Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme, Status-Workshop, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 06. Höxter: Fachbereich 8 (Technischer Umweltschutz) und Fachbereich 9 (Landschaftsarchitektur und Umweltplanung) an der Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter 2007, 362 Seiten.
5. *Müller, W.W.*: Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik. Basel: Birkhäuser Verlag 2001.
6. *Müller, W.W.*: HDPE geomembranes in geotechnics. Heidelberg, Germany: Springer Verlag 2007.

7. *August, H.:* Dichtigkeit von Dichtungsbahnen und Dichtungssystemen gegenüber Schadstoffen. In: Tagungsband der **3. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Grundwasserschutz mit Kunststoff-Dichtungsbahnen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1987, S. 53-66.
8. *Tatzky-Gerth, R. und August, H.:* Permeationsuntersuchungen an Dichtungsbahnen aus PE-HD. In: Tagungsband der **5. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Grundwasserschutz mit Kunststoff-Dichtungsbahnen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1988, S. 173-187.
9. *August, H.:* Die Dichtigkeit von Mehrfachdichtungssystemen gegenüber Schadstoffen. In: Tagungsband der **2. Fachtagung** "Grundwasserschutz mit Kunststoffdichtungsbahnen - ein Beitrag zum aktuellen Umweltschutz". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1986, S. 82-95.
10. *Hanisch, J. und August, H.:* Zulassungsfragen bei Deponiesystemen. In: Tagungsband der **6. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Kunststoff-Dichtungssysteme - ein wichtiger Beitrag zum Umweltschutz". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1990, S. 47-61.
11. *Müller, W.W., Müller, U., Preuschmann, R. und Tatzky-Gerth, R.:* Zulassung von Kunststoff-Komponenten für Deponieabdichtungssysteme - Dichtungsbahnen und Schutzsysteme. In: Tagungsband der **8. Fachtagung** "Die sichere Deponie, wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1992, S. 31-44.
12. *Take, W.A., Chappel, M.J., Brachmann, R.W.I. und Rowe, K.:* Quantifying geomembrane wrinkles using aerial photography and digital image processing. *Geosynthetics International*, 14(2007), H. 4, S. 219-227.
13. *Seeger, S.:* Zulassung von Schutzlagen. In: Tagungsband der **11. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1995, S. 35-48.
14. *Brachmann, R.W.I. und Gudina, S.:* Gravel contacts and geomembrane strains for a GM/CCL composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(2008), S. 448-459.

15. *Brachmann, R.W.I. und Gudina, S.*: Geomembrane strains from coarse gravel and wrinkles in a GM/GCL composite liner. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(2008), S. 488-497.
16. *Müller, W.W.*: Anforderungen an Werkstoffe für Deponie-Abdichtungssysteme. In: Tagungsband der **9. Fachtagung** "Die sichere Deponie". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Bad Homburg: Kunststoffinformation Verlagsgesellschaft 1993, S. 31-55.
17. *Müller, W.W.*: Dichtigkeit und Beständigkeit von Baustoffen für Deponieabdichtungen, Überlegungen zur Gleichwertigkeit von Deponieabdichtungssystemen. In: Tagungsband der **11. Fachtagung** "Die sichere Deponie". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Bad Homburg: Kunststoffinformation Verlagsgesellschaft mbH 1995, S. 49-76.
18. *Müller, W.W.*: Zulassung, Eignung und Gleichwertigkeit von Abdichtungselementen und Abdichtungssystemen für Deponien. In: Tagungsband der **13. Fachtagung**: Die sichere Deponie. *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1997, S. C1-C26.
19. *Seeger, S.*: Anforderungen an Dichtungskontrollsysteme aus der Sicht des Anwenders. In: Tagungsband der **15. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1999, S. J1-J18.
20. *Seeger, S.*: Dichtungskontrollsysteme für Oberflächenabdichtungen. In: Tagungsband der **16. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2000, S. H1-H22.
21. *Seeger, S.*: Anforderungen an die Dichtungskontrollsysteme in Oberflächenabdichtungen von Deponien - Überblick der Empfehlungen des Arbeitskreises Dichtungskontrollsysteme. In: Tagungsband der **17. Fachtagung**: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2001.
22. *Müller, W.W.*: Wie dicht sind Kombinationsdichtungen? In: Tagungsband der **10. Fachtagung** "Die sichere Deponie". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Bad Homburg: Kunststoffinformation Verlagsgesellschaft mbH 1994, S. 57-84.

23. *August, H.*: Bericht über das BMBF-Verbundforschungsvorhaben "Weiterentwicklung von Deponie-Abdichtungssystemen". In: Tagungsband der **12. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Grundwasserschutz mit Kunststoff-Dichtungsbahnen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1996, S. B1-B26.
24. *Müller, W.W.*: Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen. In: Tagungsband der **18. Fachtagung**: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 2000, S. E1-E12.
25. *Müller, W.W.*: Kunststoffdichtungsbahnen in Oberflächenabdichtungen. In: Tagungsband der **14. Fachtagung**: Die sichere Deponie, wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen. *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1998, S. B1-B16.
26. *Giroud, J.P.*: Quantification of geosynthetic behavior. *Geosynthetics International*, 12(2005), H. 1, S. 2-27.
27. *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, S. D1-D29.
28. *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.
29. *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.
30. *Schicketanz, R.*: Bau von Kombinationsabdichtungen unter einem Zeltschutz. In: Tagungsband der **11. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) 1995, S. 147-166.

31. *Müller, W.W.*: Kunststofftechnische Fremdprüfung beim Bau von Abdichtungen für Deponien und Altlasten. In: **24. Fachtagung**, Die sichere Deponie. *Jost, D. und Albers, K.* (Hrsg.). Würzburg: SKZ-ConSem GmbH 2008, S. C1-C18.
32. *Müller, W.W.*: Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen. In: Tagungsband der **20. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Knipschild, F.W.* (Hrsg.). Würzburg: SKZ-ConSem GmbH 2004, S. G1- G12.
33. *Müller, W.W.*: Eignungsgutachten für Kunststoff-Dränelemente durch die BAM. In: Tagungsband der **21. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Jost, D. und Albers, K.* (Hrsg.). Würzburg: SKZ-ConSem GmbH 2005, S. C1-C17.
34. *Müller, W.W.*: Funktionsdauer von Kunststoff-Dränelementen für Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten. In: **23. Fachtagung** "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen". *Jost, D. und Albers, K.* (Hrsg.). Würzburg: SKZ-ConSem GmbH 2007, S. C1-C20.
35. *Müller, W.W., Jakob, I. und Tatzky-Gerth, R.*: Long-term water flow capacity of geosynthetic drains and structural stability of their drain cores. *Geosynthetics International*, 15(2008), H. 6, S. 437-451.
36. *Müller, W.W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. und Li, C.S.*: Durability of polyolefin geosynthetic drains. *Geosynthetics International*, 16(2009), H. 1, wird veröffentlicht.